



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA PÍSTU DISKOVÉ BRZDY OBJEMOVÝM TVÁŘENÍM

BULK FORMING TECHNOLOGY OF PISTON OF DISK BRAKE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Kiza

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Milan Forejt, CSc.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Jakub Kiza**
Studijní program: Strojírenská technologie
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **prof. Ing. Milan Forejt, CSc.**
Akademický rok: 2021/22

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 pístu diskové brzdy objemovým tvářením

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Návrh technologie velkoseriové výroby tělesa pístu diskové brzdy osobního automobilu z nízkouhlíkové oceli 12010.3 objemovým tvářením za studena s důrazem na zpětné protlačování.

Cíle diplomové práce:

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

Seznam doporučené literatury:

LANGE, Kurt, et al. Handbook of Metal Forming. New York: McGraw-Hill, 1985, 1191 s. ISBN 0-07-036285-8.

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno: Akad.nakl. CERM, 2006, 226 s. ISBN 80-214-2374-9.

BABOR, Karel, Augustin CVILINEK a Jan FIALA. Objemové tváření ocelí. 6006. Praha: SNTL, 1967, 332 s.

ELFMARK, Jiří a kol. Tváření kovů: Technický průvodce. 62. Praha: SNTL, 1992, 528 s. ISBN 80-03-00651-1.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Práce predkladá návrh výroby polotovaru piestu diskovej brzdy nachádzajúcej sa v brzdovom strmeni automobilu z materiálu ČSN 41 2010. Vzhľadom na sériovosť výroby 200 000 ks.rok⁻¹, výhodný osovo symetrický tvar súčasti a potrebné rozmerové tolerancie bola zvolená technológia objemového tvárnenia za studena. Na základe štúdie problematiky zvolenej technológie bol navrhnutý výrobný postup, ktorý zahŕňa kalibrovanie a spätné pretlačovanie. Pre navrhnutý technologický postup boli vykonané technologické výpočty a optimalizácia rozmerov nástrojov. Vyrobiteľnosť súčasti bola taktiež overená pomocou numerickej simulácie v programe Simufact Forming. Keďže na trhu je obťažné nájsť postupový automat vyhovujúci tvárneniu za studena relatívne väčších polotovarov s priermi nad 50 mm, tak navrhnutý tvárniaci proces je vykonaný pomocou dvoch nástrojov s využitím hydraulického lisu INWORK 700. Pre zvolenú hodnotu zisku 20 % bola určená cena súčasti na 26,8 Kč. Bod zvratu bol určený na 71 670 ks.

Kľúčové slová

objemové tvárnenie, objemové tvárnenie za studena, spätné pretlačovanie, pretlačovanie kalíška, tvárniaci nástroj

ABSTRACT

The master's thesis presents a proposal for the manufacturing technology of a disk brake piston made of material ČSN 41 2010 for a car brake caliper. Method of cold volume forming was chosen due to the production requirement of 200 000 parts per year, convenient axisymmetric shape of the part and required size tolerance. Based on study of chosen technology, production technique, which contains calibration and backward extrusion, was designed. Technological computations and optimization of tool dimensions were done for the chosen production technique. The manufacturability of the part was verified by numerical simulation in Simufact Forming software. Because of unavailability of automatic cold forming machine designed for bigger sized parts on the market, the forming process is done by two forming tools with use of INWORK 700 hydraulic press. For the selected profit of 20 % the price for the part was set at 26,8 Kč. The turning point was determined as 52 745 pieces.

Keywords

volume forming, cold forming, backward extrusion, cup extrusion, forming tool

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

KIZA, Jakub. *Výroba pístu diskové brzdy objemovým tvářením* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/137024>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Milan Forejt.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som diplomovú prácu na tému Výroba piestu diskovej brzdy objemovým tvárnením vypracoval samostatne s využitím uvedenej literatúry a podkladov, na základe konzultácií a pod vedením vedúceho práce.

V Brne, 17. 05. 2022

POĎAKOVANIE

Týmto ďakujem prof. Ing. Milanovi Forejtovi, CSc. za cenné pripomienky a rady, ktoré mi poskytol nielen pri vypracovaní diplomovej práce, ale aj počas celého štúdia.

OBSAH

ÚVOD	9
1 ROZBOR SÚČIASTKY	10
1.1 Možnosti výroby zadanej súčiastky	13
2 TEÓRIA OBJEMOVÉHO TVÁRNENIA	15
2.1 Kryštalická stavba kovov	17
2.2 Princíp a mechanizmy tvárnej deformácie	18
2.3 Deformačné spevnenie	20
2.4 Krivky spevnenia.....	21
2.5 Ubíjanie	23
2.6 Dopredné pretlačovanie.....	24
2.7 Spätne pretlačovanie.....	25
2.7.1 Technologickosť a vlastnosti súčiastok spätého pretlačovania	26
2.7.2 Príprava polotovaru	27
2.7.3 Určenie objemu výlisku a polotovaru.....	28
2.7.4 Určenie veľkosti deformácie	30
2.7.5 Možnosti riešenia spätého pretlačovania.....	31
2.7.6 Tvárniaca sila a práca při pretlačovaní	35
2.7.7 Nástroje spätého pretlačovania	36
3 NÁVRH RIEŠENIA.....	39
3.1 Zhodnotenie návrhov a výber najvhodnejšej varianty	44
3.2 Výpočet priebehu napätia, pretvárnej sily a práce.....	46
3.3 Voľba stroja a návrh nástroja	51
3.4 Simulácia tvárniacich procesov	56
4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOTENIE	59
ZÁVER.....	62
ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	63
ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK	67
ZOZNAM PRÍLOH	70

ÚVOD

Výrobných technológií a možností pre zhotovenie väčšiny súčastí je mnoho. Preto je dôležité poznať určité výhody a nevýhody jednotlivých možností, pre ich správne využitie a zaistenie hospodárnosti. Objemové tvárnenie za studena patrí k hospodárnym a produktívnym technológiám používaným pri sériovej a hromadnej výrobe širokej škály súčastok. Princípom tejto technológie je úmyselné prekročenie medze klzu materiálu za normálnej teploty okolia, pričom vznikne plastická deformácia. Objemové tvárnenie za studena je vyhľadávané kvôli svojej vysokej produktivite, veľmi dobrej rozmerovej presnosti, zlepšeným mechanických materiálovým vlastnostiam a kvôli minimálnemu vzniku odpadu. Technológiou objemového tvárnenia je možné vyrábať nie len jednoducho tvarové súčastky ako sú šrúby, nity, matice, ale uplatňuje sa aj pri výrobe rôzne zložitých tvarov, ako sú napríklad križe hriadeľa, ozubené kolesá a podobne. Príklady výrobkov a nástrojov objemového tvárnenia sú zachytené na obr. 1. Hospodárnosť a ekonómia spočíva aj v možnosti použitia cenovo dostupných materiálov, ktorých vlastnosti po objemovom pretlačovaní za studena sa môžu vyrovnávať napríklad súčastkam z drahšej legovanej ocele. [1; 2; 3]

Mechanické vlastnosti tvárneného materiálu sú veľmi dôležitým faktorom, ktorý treba zohľadňovať pri navrhovaní technologického postupu. Preto je dôležité pred zahájením výroby získať korektný materiálový model, ktorý je získaný experimentálne pri mechanicko-termických podmienkach, čo najpodobnejších skutočnej výrobe. Ďalším faktorom, ktorý ovplyvňuje správnosť a hospodárnosť výroby je konštrukcia nástrojov. Preto je podstatné brať väčší ohľad na správnu kvalitu nástrojov. [4; 5]

Predložená diplomová práca uvádza prehľad hlavných a dosiaľ poznaných vedomostí spojených s objemovým tvárnením za studena. Zahrňuje návrh postupu a potrebné výpočty pri výrobe súčastí v tvare kalíšku. Taktiež obsahuje prehľad technických noriem, týkajúcich sa postupu pri konštrukcii nástrojov, výstup a zhodnotenie simulácií, pri výrobe danej súčastky, ktoré využívajú metódu konečných prvkov. Nakoniec je spracované technicko-ekonomické zhodnotenie výroby.



Obr. 1 Príklady nástrojov a vyliskov objemového tvárnenia za studena [6; 7; 8; 9].

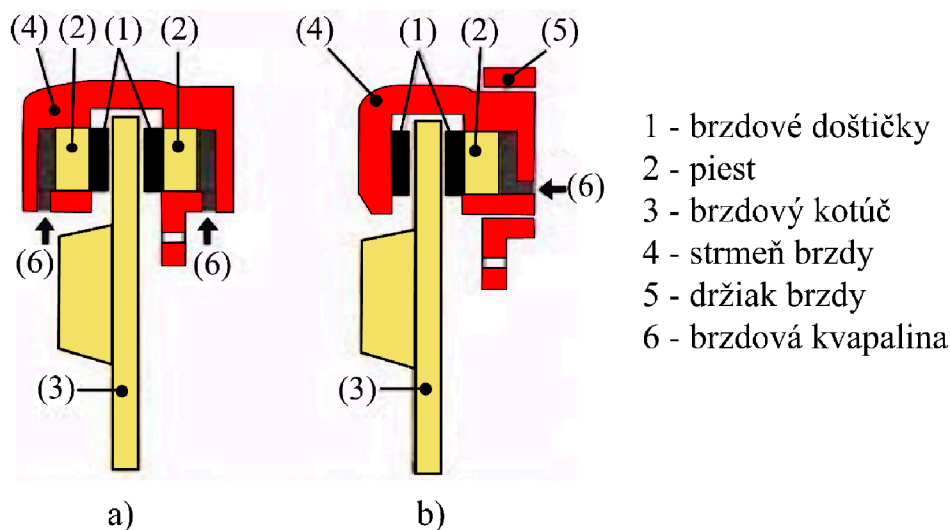
1 ROZBOR SÚČIASTKY

Brzdová sústava osobného automobilu je najdôležitejšou časťou vozidla z hľadiska aktívnej bezpečnosti, ktorá zabezpečuje spomalenie, zastavenie a zaistenie samovoľnému pohybu vozidla. Brzdové sústavy pracujú na princípe premeny jedného typu energie na iný. Pri cestných motorových vozidlách sa zväčša používajú brzdy trecie. Fungujú na princípe zväčšovania odporu trenia, čo spôsobí premenu pohybovej energie na tepelnú. [10; 11] Brzdy je možné deliť podľa ich konštrukcie na [12]:

- brzdy bubnové,
- brzdy kotúčové.

Kotúčové brzdy sa vyznačujú jednoduchou konštrukciou, vysokou účinnosťou, spoľahlivosťou, nízkou hmotnosťou a rýchlym nástupom brzdového účinku. Brzdy bubnové sú menšie a jednoducho prispôbené pre funkciu parkovacej brzdy, ale aj tak v dnešnej dobe pomaly miznú aj zo segmentu malých vozidiel, pretože výhody kotúčových brzd sú väčšie. [10; 11; 13] Kotúčové brzdy dominujú nad brzdami bubnovými v týchto aspektoch [10; 11; 13]:

- Jednoduchšia, spoľahlivejšia a výkonnejšia konštrukcia.
- Pri dlhodobom brzdení dochádza k dôrazne menšiemu opotrebovaniu a zmene súčiniteľa trenia.
- Samočistiaci účinok od prachových častí a nečistôt.
- Výmena trecích segmentov je jednoduchá.



Obr. 2 Schéma kotúčovej brzdy [12]: a) s pevným strmeňom b) s plávajúcim strmeňom.

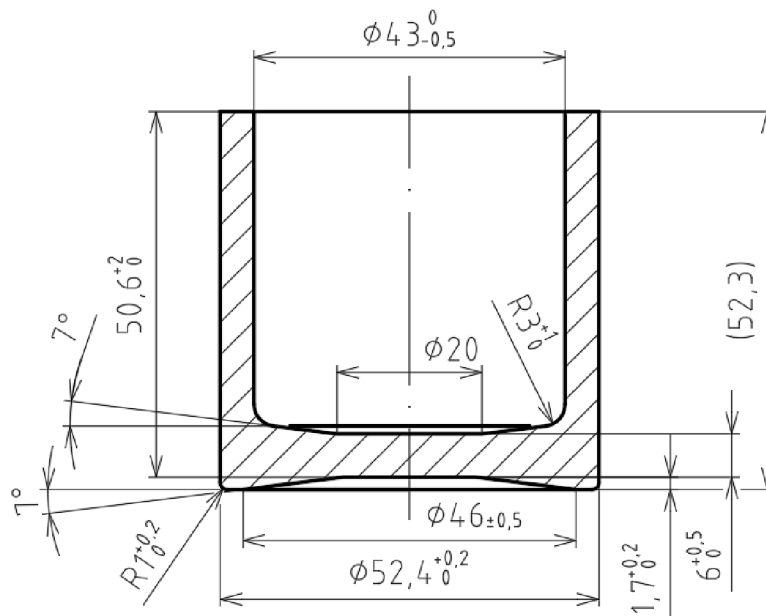
Konštrukcia a princíp fungovania kotúčových brzd je znázornený na obr. 2. Kotúčové brzdy sa zaraďujú do skupiny mechanických axiálnych. Prvé kotúčové brzdy boli s pevným strmeňom, ktorý sa neskôr zjednodušil na prevedenie s jedným piestom (s plávajúcim strmeňom). V prípade kotúčovej brzdy s pevným strmeňom sú na oboch stranách strmeňa umiestnené valčeky, v ktorých sa pohybujú piesty. Počas brzdenia tlačia piesty na brzdové doštičky z oboch strán na brzdový kotúč, pričom strmeň ostáva nepohyblivý a je pevne pripojený k vozidlu na náprave. U kotúčových brzd s plávajúcim strmeňom je strmeň umiestnený posuvne v pevnom držiaku. Piest tlačí brzdovú doštičku k brzdovému kotúču a na druhej strane reakčná sila posúva strmeň, ktorý pritlačí druhú brzdovú doštičku na kotúč na druhej strane. [10; 13]

Piest kotúčovej brzdy sa teda nachádza v brzdovom strmeni, do ktorého je privedená hadička s brzdovou kvapalinou. V prípade zašliapnutia brzdového pedálu v automobile vznikne v brzdovej kvapaline tlak, ktorý pritlačí piest a s ním aj brzdové doštičky k brzdovému kotúču. V dnešnej dobe sa už vo väčšine prípadov používajú piesty so samočinne nastaviteľnou vôľou. V drážke piestu je umiestnený tesniaci gumený krúžok s presahom, ktorý tak piest utesňuje. Pri zvýšení tlaku (vysúvaní piestu) sa elasticky deformuje gumený tesniaci krúžok. V prípade uvoľnenia brzdového pedálu, to znamená ak nezostane žiaden pretlak v brzdovom okruhu, sa tesnenie vracia do svojej pôvodnej elasticky nezdeformovanej polohy. Piest diskovej brzdy, jeho tesnenie a uloženie v brzdovom strmeni je znázornené na obr. 3. [12; 14]



Ob. 3 Piest diskovej brzdy a jeho uloženie [15; 16; 17]: a) piest diskovej brzdy, b) gumové tesnenie, c) piest uložený v brzdovom strmeni.

Zadaná súčiastka je osovo symetrického, kalíškovitého tvaru a relatívne menšieho rozmeru s približne rovnakou výškou a vonkajším priemerom 52 mm, a hrúbkou steny 4,7 mm. Rozmerové úchyľky súčasti sú strednej až hrubej triedy presnosti. Geometrické tolerancie predpísané nie sú, ale pre správnu funkčnosť je vhodné dodržať istú presnosť tolerancie valcovitosti, kolmosti a rovnobežnosti čiel. Presný tvar a rozmery súčasti sú na obrázku 4.



Obr. 4 Tvar a rozmery piestu diskovej brzdy.

Na výrobu zadaného piestu má byť použitá oceľ 12 010.3. Oceľ je nízko uhlíková, žíhaná na mätko, a je vhodná k ďalšiemu chemicko-tepelnému spracovaniu. Cementovaním a kalením tejto ocele je možné získať veľké množstvo výhodných vlastností s menšou pevnosťou v jadre. Žíhaním na mätko sa docieli vznik zrnitého perlitu v štruktúre a tým najväčšej mäkkosti a húževnatosti. Materiál je tak veľmi dobre tváriteľný, vhodný k objemovému tvárneniu za studena a za nízkych pretlačovacích tlakov a vysokej redukcie. Chemické zloženie materiálu je v tabuľke 1. [4; 18; 19]

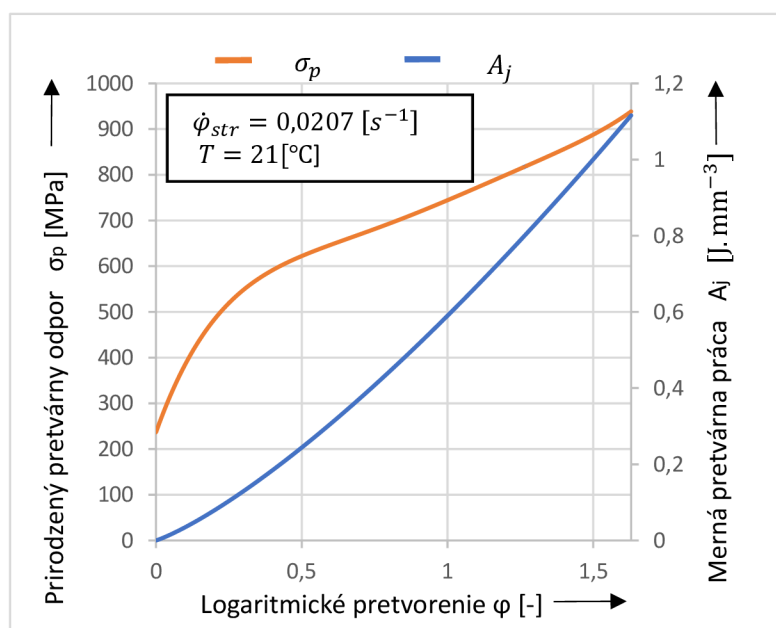
Tab. 1 Chemické zloženie ocele 12 010 [19].

Chemické zloženie [%]	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
oceľ 12 010	0,07 – 0,14	0,35 – 0,65	0,15 – 0,40	max. 0,15	max. 0,30	max. 0,30	max. 0,04	max. 0,04

Mechanické vlastnosti materiálu boli získané experimentálne materiálovou skúškou, pričom vzorka s priemerom $d_v = 17,5$ mm bola namáhaná tlakom. Skúška bola uskutočnená na hydraulickom lise CZR 600 so strednou rýchlosťou pretvorenia $\dot{\varphi}_{str} = 0,0217 \text{ s}^{-1}$ a pri teplote $T = 21$ °C. Získané hodnoty prirodzeného pretvárného odporu σ_p v závislosti na stupni logaritmického pretvorenia výšky vzorky φ boli aproximované metódou najmenších štvorcov polynómom 3. a 5. stupňa, polytropou a racionálne lomenou funkciou. Hodnoty mernej pretvárnej práce A_j boli aproximované polytrópou. Všetky spomenuté aproximačné krivky možno nájsť v prílohe 1. Mechanické hodnoty skúšaného materiálu 12 010.3 možno vidieť v tabuľke 2. Materiálový model znázornený v grafe je vyobrazený na obrázku 5. [20]

Tab. 2 Mechanické hodnoty pre oceľ 12 010.3 (ČSN 41 2010) [20].

Materiál	Aproximovaná medza klzu R_e [MPa]	Kontrakcia Z [%]	Kritické pretvorenie φ_{krit} [-]
Oceľ 12 010.3	236,75	70	1,63



Obr. 5 Materiálový model pre oceľ 12 010.3 [20].

1.1 Možnosti výroby zadanej súčiastky

Zhotoviť daný piest je možné viacerými možnosťami. Vhodnosť technológie závisí hlavne na tvare a rozmeroch súčiastky, na presnosti, cene a veľkosti série výroby. Príklady vhodných použiteľných technológií sú:

- Obrábanie (obr.6) – veľmi dôležitá výrobná technológia, ktorá sa používa najmä pri výrobe hotových súčiastok a taktiež pri výrobe nástrojov potrebných pre ďalšie strojárne technológie, ako je napríklad tvárnenie, odlievanie, strihanie, zváranie a podobne. Princíp metódy je založený na oddeľovaní materiálu z polotovaru v tvare triesok, pričom bežne dosiahnuteľná drsnosť povrchu pri bežnom obrábaní (sústruženie, frézovanie, vŕtanie) je $R_a = 1,6 \mu\text{m}$. Dosahuje sa taktiež dobrá presnosť v rozsahu tolerancií IT 6. Avšak pri dokončovacích operáciách (brúsení, lapovaní) sa dosahujú veľmi kvalitných povrchy a presnosti. No predsa nevýhodou trieskového obrábania je vysoká spotreba materiálu, veľké množstvo odpadu a porušovanie priebehov vlákien vzniknutých pri výrobe polotovaru. Väčšie výrobné časy a veľká spotreba materiálu pri kusovej výrobe nemá veľký vplyv na výrobné náklady, ale pre veľkosériovú výrobu je trieskové obrábanie nevhodné.[5; 21; 22]



Obr. 6 Trieskové obrábanie [23].

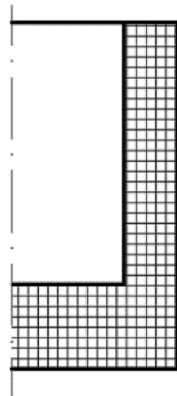
- Odlievanie (obr.7) – metóda pri ktorej sa kov v podobe taveniny vlieva do formy. V určitých oblastiach je to efektívna metóda ako vyrobiť požadovanú súčasť daného tvaru a patričnými vlastnosťami. Výroba sa uskutočňuje v pieskových alebo kovových formách, pričom pieskové formy sú najuniverzálnejšie, čo sa týka materiálu a veľkosti odliatku. Kovové formy zaisťujú väčšiu presnosť, ale ich nevýhodou je vyššia cena, a obmedzenie veľkosťou odliatku a jeho materiálu. Odlievanie do kovových foriem je vhodné hlavne pre sériovú výrobu. Nevýhodou odlievania oproti iným spomenutým technológiám sú väčšie výrobné časy. Po ochladnutí odliatku je nutné odstrániť vtokové systémy a výfuky. Oceľové odliatky sa ešte všetky tepelne spracúvajú z dôvodu odstránenia štruktúrnej, chemickej nehomogenity a vzniknutých vnútorných napätí. Po odliatí je ešte často potrebné obrábať odliatky, kvôli zaručeniu žiadaných tolerancií a kvôli zlepšeniu akosti povrchu. Metóda sa predovšetkým volí pre súčiastky zložitých tvarov, ktoré sa inými spôsobmi vyrobiť nedajú, alebo sa vyrábajú komplikovane a draho. [24; 25; 26]



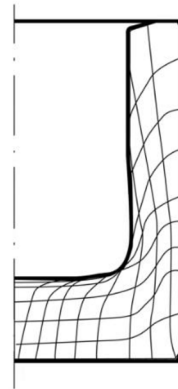
Obr. 7 Odlievanie [27].

- Objemové tvárnenie – spôsob, ktorý s vysokou produktivitou a hospodárnosťou dominuje v hromadnej výrobe. Princípom tejto metódy je vytvorenie plastickej deformácie, čím sa zmení tvar polotovaru. Výhodou technológie objemového tvárnenia je značná úspora materiálu, minimum odpadu, neprerušený priebeh vlákien, krátke výrobné časy a dobrá kvalita výtvarku. Presnosť tejto metódy sa pohybuje v tolerancii IT8, no za dobrých podmienok, pri kvalitnej výrobe a pri užití kvalitných nástrojov sa dosahuje presnosti IT6. Akosť povrchu pri objemovom tvárnení je taktiež kvalitná. Je možné touto metódou dosahovať drsnosti povrchu až $R_a = 0,4 \mu\text{m}$. Pri objemovom tvárnení je možné taktiež zlepšiť mechanické vlastnosti vstupného materiálu a to pri tvárnení za studena bez dodatočného tepelného spracovania. [28; 29; 30]

Ako najvhodnejšia technológia na výrobu zadanej súčiastky je zvolené objemové tvárnenie. Zvolenou technológiou pri správnej konštrukcii nástrojov a pri správnych podmienkach počas tvárnenia by nemal nastať problém pri dosahovaní potrebných presností. Taktiež pre sériovosť $200\,000 \text{ ks} \cdot \text{rok}^{-1}$ je táto technológia najvhodnejšia, z dôvodu krátkych výrobných časov, ktoré sa odrazia na hospodárnosti výroby. Súčiastke je možné touto technológiou zlepšiť mechanické vlastnosti a vylúčiť tak potrebu tepelného spracovania. Pre správnu funkčnosť súčiastky je potrebné súčiastke vyrobenej po objemovom tvárnení za studena (obr. 11) zaradiť dokončovacie operácie obrábania (obr.10). Porovnanie priebehu vlákien po obrábaní a po tvárnení je na obrázku 8 a 9.



Obr. 8 Priebeh vlákien po obrábaní [30].



Obr. 9 Priebeh vlákien po tvárnení [30].



Obr. 10 Piest po dokončovacom obrábaní [31].



Obr. 11 Piest po tvárnení [31].

2 TEÓRIA OBJEMOVÉHO TVÁRNENIA

Tvárnenie kovov je technologický proces, ktorého účelom je dosiahnuť požadovanú zmenu tvaru a požadované mechanicko-fyzikálne vlastností výrobku pomocou pôsobenia vonkajších síl nástroja bez porušenia súdržnosti tvárneného materiálu. Podstatou je vyvolanie plastických deformácií, ktoré vznikajú pri dosiahnutí napätia nad medzou sklzu za danej teploty a rýchlosti zaťažovania. [1; 32] Technológia tvárnenia sa delí podľa stavu napätosti na [32]:

- Objemové tvárnenie – deformácia nastáva v smere všetkých troch osí súradnicového systému.
- Plošné tvárnenie – deformácia nastáva len v dvoch smeroch súradnicového systému.

Technológia tvárnenia sa podľa použitej teploty ďalej delí na [32]:

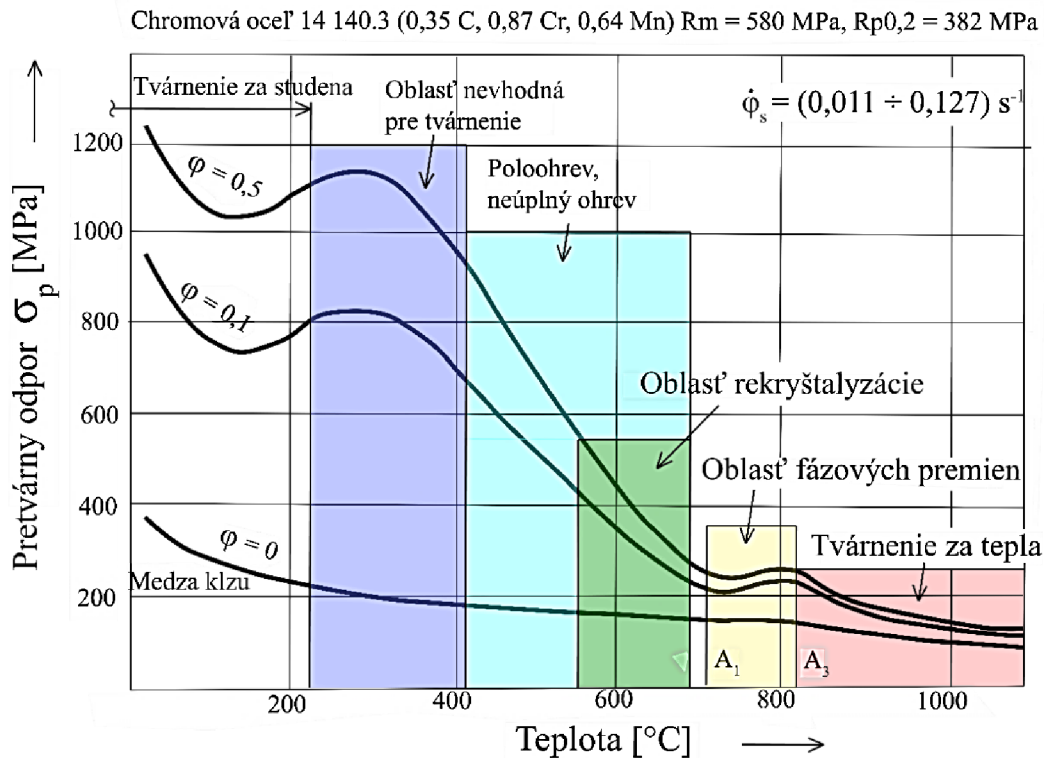
- tvárnenie za tepla,
- tvárnenie za poloohrevu,
- tvárnenie za studena.

Jedná sa o rozdelenie technológie podľa fyzikálnej podstaty dejov, to znamená podľa vzťahu teploty tvárniaceho materiálu k teplote rekryštalizácie. Rozdelenie tvárnenia podľa teploty je možné vidieť na obrázku 12, na príklade chrómovej ocele 14 140.3. [1; 5]

Tvárnenie za tepla je tvárnenie, pri ktorom je teplota tvárniaceho materiálu vyššia, ako je teplota rekryštalizácie, to znamená nad hodnotou 70 % teploty tavenia T_{tav} daného materiálu. Počas rekryštalizácie sa obnovuje tvar zrna, čo umožňuje veľké stupne deformácie. Vďaka uzdravovaniu mriežky počas rekryštalizácie je výsledná štruktúra tvorená nezdeformovanými zrnami a materiál si tak zachová po tvárnení plastické vlastnosti. Nedochádza k spevňovaniu materiálu a k tvárneniu stačia nízke sily. Nevzniká textúra (zrna nie sú deformované v smere tvárnenia), ale povrch sa degraduje pod vplyvom okovín. Nevýhodou tvárnenia za tepla sú väčšie spotreby energie a veľké tepelné namáhanie nástrojov. [1; 5; 32]

Tvárnenie za poloohrevu je charakterizované zvýšenou teplotou, ale nižšou ako je rekryštalizačná teplota. Pri týchto teplotách počas tvárnenia dochádza k tepelne aktivovanému pohybu dislokácií, ktorý zapríčiňuje ich zánik. Znižovanie hustoty dislokácií zapríčiňuje znižovanie pevnosti tvárneného materiálu. Tým pádom je možné dosiahnuť vyššieho stupňa deformácie ako pri tvárnení za studena. [1; 5; 32]

Tvárnenie za studena je tvárnenie pod rekryštalizačnou teplotou, pod hodnotou 30 % teploty topenia T_{tav} daného materiálu. Pri tomto tvárnení dochádza k spevňovaniu materiálu a k vytvoreniu textúry, kde sú zrna deformované v smere tvárnenia. So spevnením sa zvyšujú mechanické vlastnosti ako medza pevnosti a medza sklzu, pričom klesá ťažnosť. Avšak aj keď tvárnenie za studena je význačné vysokou presnosťou rozmerov, kvalitným povrchom bez okovín a zlepšovaním mechanických vlastností, stále jeho najväčšou nevýhodou sú vysoké tvárniace sily (až 10 krát vyššie ako u tvárnenia za tepla), alebo obmedzená tvárnosť materiálu. [1; 5; 32]



Obr. 12 Vplyv teploty na pretvárnny odpor zliatinovej chrómovej ocele a rozdelenie tvárniacich technológií podľa teploty rekryštalizácie [5].

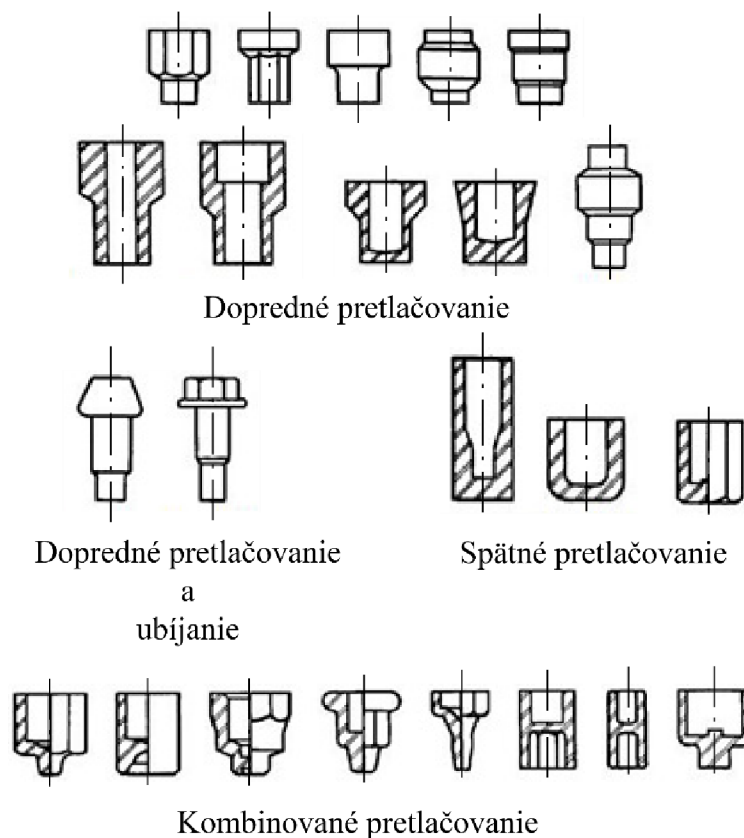
Objemové tvárnenie za studena zahŕňa operácie založené na prerozdelení a premiestňovaní materiálu bez toho, aby došlo k porušeniu materiálu pod teplotou rekryštalizácie tvárneného materiálu. Umožňuje získavať hotové súčiastky, ktoré vo väčšine prípadov už nepotrebujú žiadne následné spracovanie. Súčiastky získané touto technológiou majú výbornú kvalitu povrchov, vysoké geometrické a rozmerové presnosti. Vlastnosti vyrobenej súčiastky, ako je tvrdosť a pevnosť sa zvyšujú vďaka sprievodnému deju, tzv. deformačnému spevňovaniu, ktorý sa uskutočňuje pri teplotách za studena. Hlavným znakom objemového tvárnenia za studena je, že prebieha za pôsobenia nerovnomernej priestorovej napätosti a pod rekryštalizačnou teplotou tvárneného materiálu. [32; 33; 34] Základné spôsoby objemového tvárnenia za studena sú [33]:

- kalibrovanie,
- ubíjanie,
- pretlačovanie,
 - dopredné,
 - spätné,
 - stranové,
 - združené,
- objemové ťahanie (ťahanie tyčí, drôtu),
- kombinované tvárnenie.

Dôvody praktického využitia objemového tvárnenia za studena sú rôzne. Najväčšími výhodami objemového tvárnenia za studena sú vysoká rozmerová a geometrická presnosť, dosiahnutie malých hrúbok, vysoká kvalita povrchu výtvarku, minimálne alebo žiadne požiadavky na obrábanie, zlepšenie mechanických vlastností materiálu, zlepšenie rovnorodosti a zjemnenie štruktúry, zmenšenie nežiadúcich povrchových javov vznikajúcich pri ohreve a tepelnom spracovaní. relatívne nízka energetická náročnosť (nie je potrebný ohrev a nevznikajú tepelné straty pri ohreve), vznik minimálneho odpadu a úspora materiálu,

možnosť dosiahnutia veľkého stupňa pretvorenia na jednu operáciu, krátky výrobný čas. Nevýhoda, ktorá postihuje objemové tvárnenie za studena v porovnaní s tvárnením za tepla, je nižšia tváriteľnosť materiálu, vyššie deformačné odpory, a tým pádom aj vyššie tvárniace sily a tlaky. [28; 32; 33; 34]

Finálnym dejom spracovania za studena tvárneného výrobku je buď tepelné spracovanie (rekryštalizačné žihanie), ktorého hlavným cieľom je odstrániť vyvolané deformačné spevnenie po predošlom tvárnení a získať tak vyhovujúce plastické vlastnosti materiálu, alebo práve naopak, cielené vyvolanie deformačného spevneného stavu materiálu. V praxi je spevnená oceľ tvárnením za studena obmedzená použiteľnosťou len pod rekryštalizačnou teplotou (maximálne asi do 450 °C), pretože pri vyšších teplotách nastávajú odpevňovacie rekryštalizačné procesy, ktoré odstraňujú spevnenie vyvolané tvárnením za studena. Tvárnením za studena je možné spracovávať skoro celý sortiment ocelí, vrátane uhlíkových ocelí až po nízko a vysoko legované ocele. Najčastejšie tvary výliskov vyrobených jednotlivými technológiami sú znázornené na obrázku 13. [32]

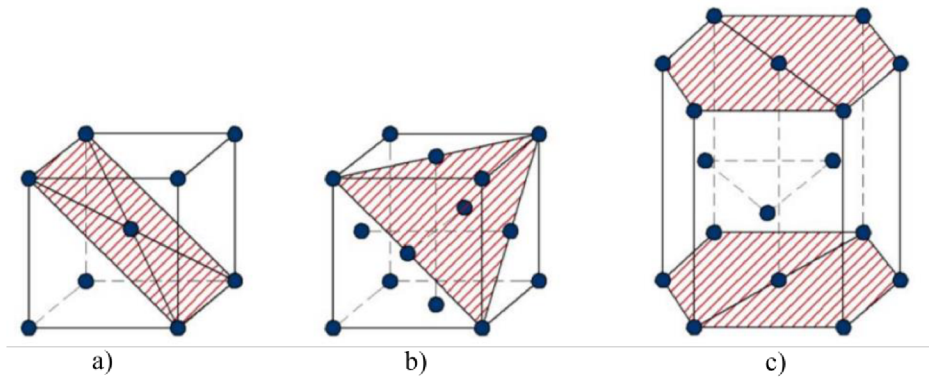


Obr. 13 Príklady tvarov výliskov vyrobených objemovým tvárnením za studena [35].

2.1 Kryštalická stavba kovov

Zmena tvaru pri tvárnení je uskutočnená elementárnymi procesmi, ktoré prebiehajú vo vnútri jednotlivých kryštálov (zrín), z ktorých sa skutočné materiály skladajú. Prirodzeným stavom pre usporiadanie atómov kovov je kryštalová mriežka. Charakterizuje sa pravidelným geometrickým usporiadaním s najnižšou možnou hladinou energie. [5; 33] Hlavnými typmi kryštalickej mriežky v praxi sú [34]:

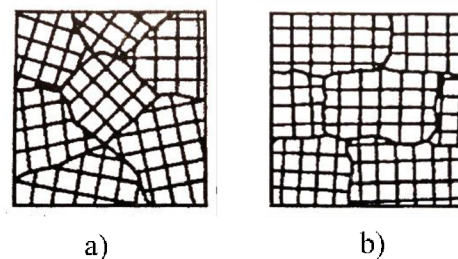
- kubická priestorovo stredená mriežka – BCC,
- kubická plošne stredená mriežka – FCC,
- hexagonálna tesne usporiadaná mriežka – HCP.



Obr. 14 Hlavné typy kryštalických mriežok a ich sklzové roviny [34]: a) BCC, b) FCC, c) HCP.

Vlastnosti kovov závisia na týchto kryštalických stavbách materiálu. Typ kryštalickej mriežky ovplyvňuje tepelné, elektrické, magnetické a mechanické vlastnosti kovu. V BCC mriežke (obr. 14a) kryštalizuje napríklad železo α , železo δ , chróm, volfrám, molybdén a tantal. V FCC mriežke (obr. 14b) kryštalizuje železo γ , meď, hliník, olovo, striebro, nikel, platina. HCP usporiadanie mriežky (obr. 14c) má napríklad horčík, zinok, titán, α kobalt a berýlium. Mnoho kovov (napr. železo) má v tuhom stave za rôznych teplôt rozdielnu kryštalovú mriežku. [5; 34]

Reálne kovy a zliatiny sú tvorené zhlukom rôzne orientovaných zrn. Takéto usporiadanie kryštálov sa nazýva polykryštalické (obr. 15a). Polykryštalické kovy majú izotropné vlastnosti, avšak technológiou tvárnením za studena je možné meniť orientáciu mriežky a vytvoriť tak kvázi jednotnú orientáciu mriežky v jednotlivých zrnách s výraznou anizotropiou, tzv. textúrou (obr. 15b). Polykryštalické kovy s vytvorenou textúrou dosahujú lepších mechanických vlastností, avšak len v určitom, žiadanom smere. [5; 34]



Obr. 15 Schéma usporadania kryštálov [5]: a) polykryštal, b) polykryštal s textúrou.

2.2 Princíp a mechanizmy tvárnej deformácie

Deformácia je pojem, ktorý vyjadruje zmenu tvaru telesa prostredníctvom vonkajších alebo vnútorných síl bez porušenia spojitosti deformovaného telesa. Deformácia sa delí na elastickú (pružnú) a plastickú (trvalú). Plastická deformácia nastáva, ak je materiál zaťažovaný napätím menším ako medza klzu R_e . Tento dej sa riadi Hookovým zákonom, kde medzi elastickou deformáciou a pôsobiacim napätím je lineárna závislosť. [5; 32; 33] Pre modul pružnosti v ťahu E platí nasledujúci vzťah [33]:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_{el}}, \quad (2.1)$$

kde: σ - normálové napätie [MPa],
 ε_{el} - veľkosť pružnej deformácie v ťahu alebo tlaku [-].

Pre modul pružnosti v šmyku G platí vzťah [33]:

$$G = \frac{\tau}{\gamma_{el}}, \quad (2.2)$$

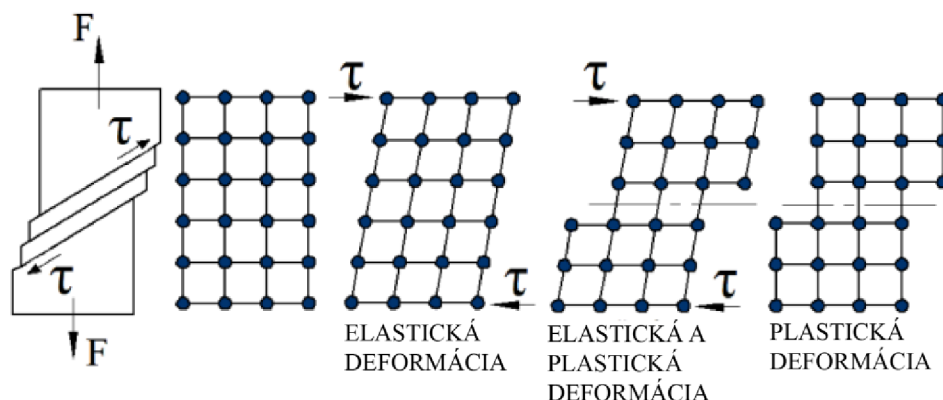
kde: τ - šmykové napätie [MPa],
 γ_{el} - veľkosť pružnej deformácie v šmyku [-].

Po odľahčení materiálu elastická deformácia zanikne a teleso sa navráti do pôvodného stavu. Pred každou plastickou deformáciou sa uskutočňuje vždy elastická deformácia. Po prekročení medze klzu R_e zaťaženie nastáva deformácia plastická. Hlavným znakom trvalej deformácie je nenávratnosť deja, teda materiál natrvalo mení svoj tvar bez porušenia spojitosti a zachováva svoju kryštalickú štruktúru kovu. Plastická deformácia je umožnená len smykovým napätím, pri ktorom dochádza k trvalému posuvu atómov z rovnovážnych polôh v kryštalickej mriežke. Keďže plastická deformácia môže nastať buď na hraniciach zŕn alebo vo vnútri zŕn, objavujú sa len dva mechanizmy plastickej deformácie a to sklzový mechanizmus a dvojčatenie. [5; 36]

Sklzový mechanizmus je prevažujúcim mechanizmom plastickej deformácie. Prebieha postupným pohybom čiarových porúch (dislokácií) v kryštalografických činných rovinách tak, že atómy kovu pri pôsobení nadkritického šmykového napätia sa premiestňujú v smere sklzu po sklzovej rovine, až vyúsťia na povrch kryštalického zrna. Schematické znázornenie tohto mechanizmu deformácie je zobrazené na obr. 16. [5; 32; 33] Pre sklzový mechanizmus platia tieto zákonitosti [5]:

- Rovina sklzu je kryštalografická rovina s najhustejšie obsadenými atómami.
- Smer sklzu je totožný s rovinou sklzu. Smer sklzu nemusí odpovedať smeru najväčšieho vonkajšieho napätia.
- Z možných sklzových rovín a smerov sa uplatnia tie, v ktorých má šmykové napätie najväčšiu hodnotu – τ_{max} .
- Sklz nastáva, ak maximálne šmykové napätie dosiahne kritickej hodnoty – τ_{krit} . Pre teoretickú hodnotu maximálneho šmykového napätia platí vzťah [5]:

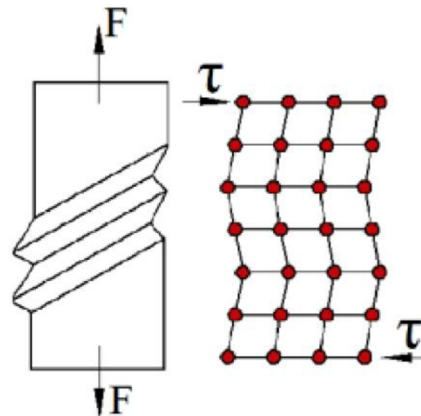
$$\tau_{krit} = \frac{G}{2\pi}. \quad (2.2)$$



Obr. 16 Schematické znázornenie elastickej a plastickej deformácie monokryštálu sklzovým mechanizmom [5].

Dvojčatenie je mechanizmus plastickej deformácie, počas ktorého dochádza k preklopeniu časti kryštálu okolo roviny symetrie a vytvára tak zrkadlový obraz pôvodnej mriežky, ako je možné vidieť na obr. 17. Na rozdiel od sklzu sa týmto mechanizmom mení orientácia nad rovinou symetrie (dvojčatenia). Hlavný význam dvojčatenia spočíva v prevedení

sklzového systému do polôh priaznivejších pre normálny sklzový mechanizmus. Dvojčatením sa deformujú hlavne kovy s hexagonálnou a kubickou priestorovo centrovanou mriežkou. Napätie, potrebné na deformáciu dvojčatením, je v porovnaní so sklzom vysoké, preto k dvojčateniu pri kovoch s BCC mriežkou dochádza najmä, ak je obtiažny sklz. Kovy s BCC mriežkou sa deformujú dvojčatením najmä pri nízkych teplotách, alebo pri vysokých rýchlostiach pretvorenia. Pri kovoch s hexagonálnou mriežkou (HCP mriežkou) dochádza v určitom smere kvôli nízkemu počtu sklzových systémov k vysokým šmykovým napätiam a tým pádom dochádza k mechanizmu dvojčatenia. [5; 32; 33]



Obr. 17 Schematické znázornenie plastickej deformácie dvojčatením [5].

2.3 Deformačné spevnenie

Deformačné spevnenie je jav, ktorý sa prejavuje narastajúcim odporom materiálu proti pretvoreniu pri teplotách $T \leq 0.3 T_{\text{tav}}$. Plastické pretvorenie pri teplotách za studena sa vykonáva translačným sklzom v jednotlivých zrnách, ktorého nositeľmi sú pohyblivé dislokácie. V reálnych materiálových štruktúrach však existujú prekážky, ktoré bránia pohybu dislokácií a tým spôsobujú spevnenie materiálu. Spevnenie materiálu sa prejaví tým, že na prekonanie prekážok a na následné pokračovanie procesu plastickeho pretvorenia je nutné zvyšovanie napätia. [5; 33] Prekážkami pohybu dislokácií počas plastickeho pretvorenia sú [5; 33]:

- hranice zrn alebo subzrn,
- vtrúseniny a nečistoty,
- vzájomná interakcia dislokácií – deformáciou materiálu sa zvyšuje hustota dislokácií s rôznou orientáciou, ktoré si navzájom bránia v pohybe.

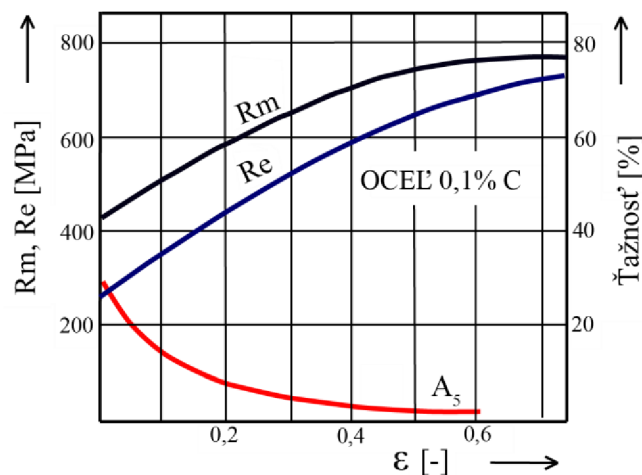
Čisté kovy na rozdiel od ich zliatin sú lepšie tvárniteľné a spevňujú sa menej intenzívne. S rôznou štruktúrou a s rôznym stupňom pretvorenia sa ale tieto vlastnosti menia. [33] Je možné tvrdiť, že [33]:

- Polykryštalické materiály sa spevňujú viac ako monokryštalické.
- Jemnozrnné kovy sa spevňujú intenzívnejšie ako hrubozrnné.
- Zliatiny kovov sa spevňujú intenzívnejšie ako čisté kovy.

Jav deformačného spevnenia, ktorý sa vyskytuje pri tvárnení za studena (tvárnenie pod rekryalizačnou teplotou) spôsobuje zmenu štruktúry materiálu, ktorá sa prejavuje týmito fyzikálnymi a mechanickými zmenami [33]:

- Medza sklzu a pevnosť rastie.
- Ťažnosť a kontrakcia klesá.
- Tepelná a elektrická vodivosť sa znižuje.
- Zväčšuje sa rozpustnosť v kyselinách a náchylnosť ku korózii.
- Celková tvárnosť sa zhoršuje.

V závislosti na stupni pretvorenia, v prípadoch u ocelí s nízkym a stredným množstvom uhlíka je možné zvýšiť medzu pevnosti R_m o 120 %, medzu sklzu R_e až o 100 – 300 % a tvrdosť medzi 60 – 150 %. Vplyv procesu deformačného spevnenia na mechanické vlastnosti materiálu je možné sledovať na obrázku 18. [37]



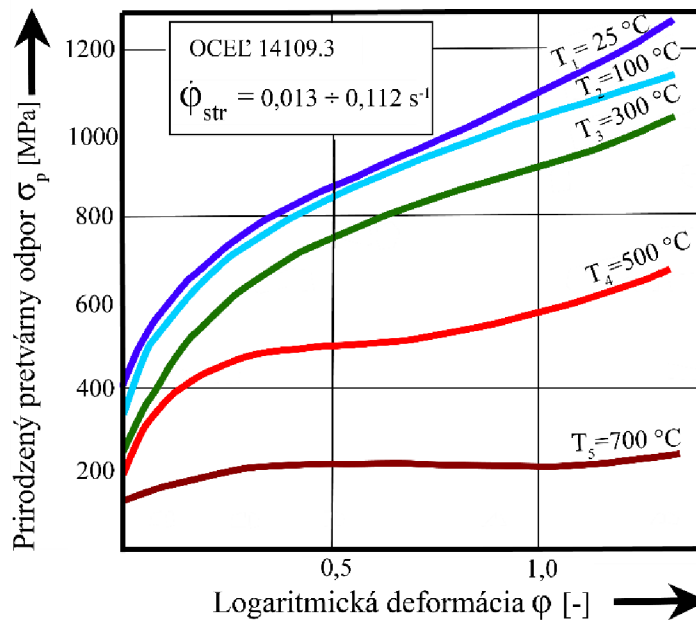
Obr. 18 Vplyv deformácie na mechanické vlastnosti [5].

2.4 Krivky spevnenia

Krivky spevnenia slúžia na určenie veľkosti skutočného napätia požadovaného na realizovanie procesu tvárnenia. Jedná sa o krivky, ktoré určujú závislosť skutočných napätí od pretvorenia (pomerného alebo skutočného) pri určitých termodynamických podmienkach. Tvar krivky a veľkosť spevnenia sa totiž mení so stupňom pretvorenia, rýchlosťou pretvorenia, teplotou, tvarom a rozmermi telesa, akosťou povrchov a teda aj aplikovanou technológiou. [5; 32; 34]

Prirodzený pretvárný odpor je odpor kovov proti vzniku plastických deformácií, ktorý je ich dôležitou mechanickou vlastnosťou. [5; 28] Možno ho vyjadriť ako veľkosť vnútorného napätia materiálu vyvolaného vonkajšími silami, ktoré sú potrebné na to, aby v kove vznikol počiatok nevratnej plastickej deformácie za podmienky jedno-osého stavu napätosti a za určitých termomechanických podmienok [5; 28]:

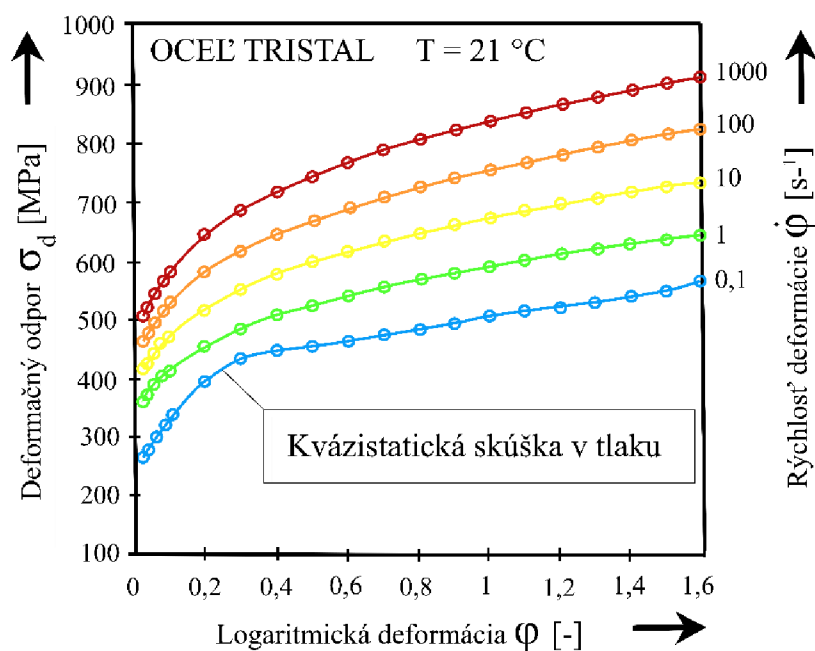
- chemické zloženie a fyzikálny stav kovu,
- počiatkový stav (R_e , R_m),
- stupeň deformácie (ϵ , ϕ),
- teplota deformácie (T),
- rýchlosť pretvorenia ($\dot{\epsilon}$, $\dot{\phi}$).



Obr. 19 Krivky spevnenia – prírodných pretvárných odporov ocele 14 109.3 s vplyvom teploty [5].

Deformačný pretvárný odpor, alebo taktiež technologický pretvárný odpor, je prírodný pretvárný odpor zväčšený o vplyv pasívnych technologických odporov pri deformácii tvárneného telesa. [5] Značný vplyv na veľkosť deformačného odporu má [5]:

- vplyv trenia,
- vplyv geometrie – tvaru tvárneného polotovaru, výrobku a tvaru pracovných plôch nástrojov,
- vplyv zmeny teplotných podmienok,
- vplyv napätosti a zmien nerovnomernej napätosti,
- vplyv lokálnych zmien rýchlosti deformácie pri toku kovu.

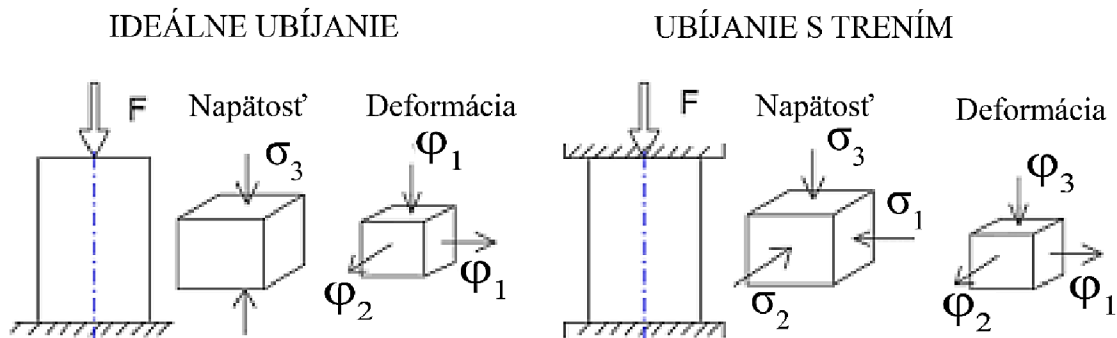


Obr. 20 Krivky spevnenia – deformačných odporov ocele TRISTAL s vplyvom rýchlosti deformácie [5].

Prirodzený pretvárný odpor σ_p , a takisto aj deformačný odpor σ_d sa značne líšia za rozdielnych teplôt a rýchlostí deformácie, ako je možné pozorovať na príkladoch merania zobrazených na obr. 19 a obr. 20. Za vysokých teplôt je pretvárný odpor kovov značne nižší, ako za teplôt pri tvárnení za studena. S výrazne zvýšenou rýchlosťou deformácie, napr. rázovým pôsobením vonkajších síl je veľkosť pretvárneho odporu výrazne väčšia v porovnaní so statickým účinkom vonkajších síl. Vplyv stavu napätosti na deformačný odpor sa prejavuje tým, že s prevládajúcou priestorovou tlakovou napätosťou deformačný odpor rastie. Keďže z deformačného odporu sa stanovuje potrebná tvárniaca sila, číselne údaje o veľkosti deformačného odporu musia byť doložené bližšími údajmi o stave kovu a termomechanických podmienkach, ak sa majú tieto hodnoty použiť správne pri určitých technických výpočtoch. Príklady vplyvu teploty a vplyvu rýchlosti deformácie na prirodzený pretvárný a deformačný odpor sú znázornené na obr. 19 a obr. 20, kde je možné pozorovať značný vplyv týchto veličín. [5; 32]

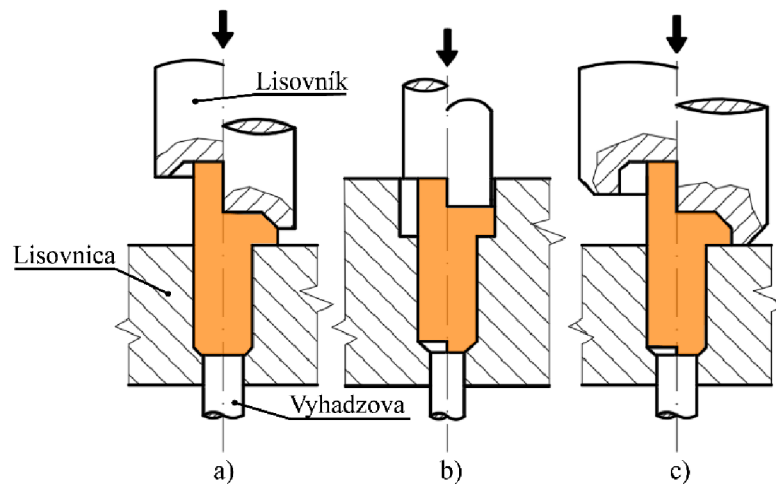
2.5 Ubíjanie

Ubíjanie je základnou technológiou objemového tvárnenia a jeho podstatou je premiestňovanie materiálu stlačením tak, že sa zväčšuje prierez polotovaru na úkor jeho výšky pomocou tvárniaceho stroja. Ubíjanie môže byť voľné, alebo usmernené (v dutine nástroja). Technológia ubíjania je znázornená na obr. 22. Počas ubíjania vzniká trenie na kontaktných plochách, ktoré spôsobuje vznik nerovnomernej deformácie a vznik súdkovitého tvaru výtvarku. Schematické znázornenie napätosti pri ubíjaní je znázornené na obrázku 21. [5; 33]



Obr. 21 Schematické znázornenie napätosti a deformácie pri ubíjaní [5].

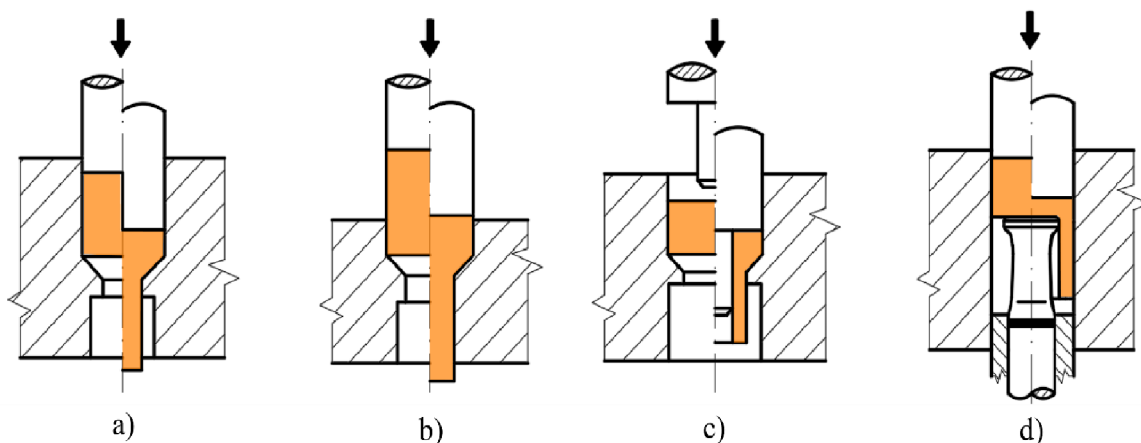
Najväčšie uplatnenie ubíjania je v prípravných operáciách pri iných spôsoboch tvárnenia, ale najmä v hromadnej výrobe normovaných spojovacích súčastí, ako sú matice, šróby, nity, klince a pod. Ubíjanie sa taktiež využíva ako materiálková skúška pri získavaní kriviek spevnenia a materiálových charakteristík dôležitých pre tvárnenie. [32; 38]



Obr. 22 Schéma základných operácií ubíjania [5]: a) otvorené, b, c) uzavreté.

2.6 Dopredné pretlačovanie

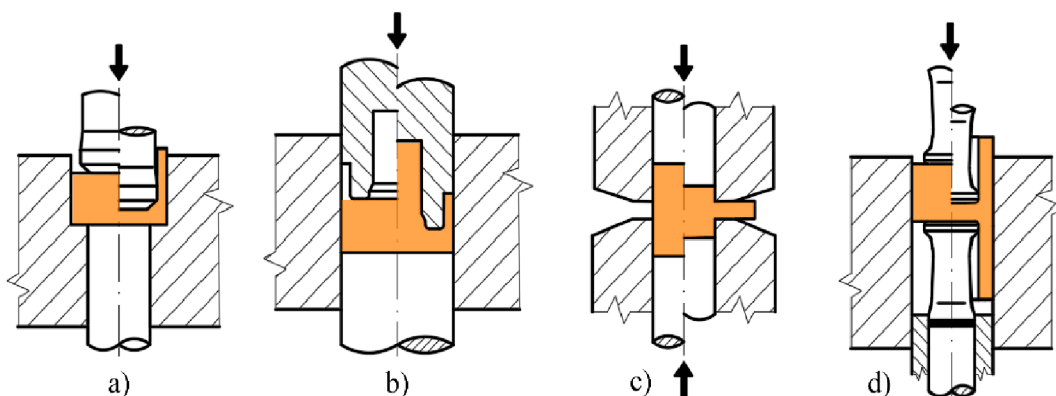
Dopredné pretlačovanie sa používa pri zmešovaní prierezov plných klátikov, alebo dutých polotovarov. Pôsobením sily od prietlačníku kov tvárneného materiálu vyteká z otvoru prietlačnice v tvare tyče s rôznymi prierezmi. Materiál sa pohybuje v dutine prietlačnice v smere pohybu prietlačníka a výlisky ostávajú v dutine prietlačnice, až kým nie sú odstránene vyhadzovačom, alebo vytlačené ďalšou pretlačenou súčiastkou. Hlavné spôsoby dopredného pretlačovania sú znázornené na obrázku 23. Výhodou dopredného pretlačovania na rozdiel od iných typov pretlačovania je, že pomer dĺžky výlisku k priemeru výlisku môže byť až $24 : 1$, a tým pádom je možné dosiahnuť značného zmenšenia prierezu (v praxi sa používa maximálne pričné zúženie pomerné $\epsilon_s = 70\%$, kvôli obmedzeniu pevnosti nástroja). Dĺžka pretlačovanej časti pri tejto technológii nie je závislá na dĺžke prietlačníku. Plné teleso je možné pretlačovať v uzavretej alebo otvorenej prietlačnici. V prípade, že sa volí $\epsilon_s > 30\%$ je potrebné použiť uzavretú prietlačnicu, aby nedošlo len k nabitíu prečnievajúcej časti pred prietlačnicou. [5; 28; 34]



Obr. 23 Schémy hlavných operácií dopredného pretlačovania [5]: a) uzavreté dopredné pretlačovanie, b) otvorené dopredné pretlačovanie, c) dopredné duté pretlačovanie, d) dopredné pretlačovanie kalíškov.

2.7 Spätne pretlačovanie

Pri spätnom pretlačovaní sa materiál pohybuje proti smeru prietlačníka. Pretlačovaný materiál najprv vyplní dno prietlačnice, ktoré je buď uzavreté, alebo sa v ňom nachádza vyhadzovač. Princípy a rozdelenie spôsobov spätneho pretlačovania je možno vidieť na obrázku 24. Nástroj vniká do polotovaru a vytvára v ňom dutinu s požadovanou hrúbkou dna **b**. Zvyšný materiál pritom tečie medzerou medzi prietlačníkom a prietlačnicou. Nevýhodou tohoto spôsobu je veľký deformačný odpor, ktorý obmedzuje funkčnú dĺžku prietlačníku. Z praxe je známe, že v prípade spätneho pretlačovania sú dosahované vyššie deformačné odpory ako pri pretlačovaní doprednom. Maximálny pomer dĺžky k priemeru na rozdiel od dopredného pretlačovania je len 3 : 1. Odporúča sa vyrábať súčiastky s maximálnym pomerným priečnym zúžením $\varepsilon_s = 65\%$. Väčšia miera zúženia podstatne znižuje hospodársku životnosť nástroja. Súčiastky vyrobené týmto spôsobom sú najčastejšie prietlačky v tvare kalíšku s dnom, alebo s priechodným otvorom, podľa toho, či bol za polotovar použitý klátik alebo prstenec. [28]



Obr. 24 Schémy hlavných spôsobov spätneho pretlačovania [5]: a) spätne pretlačovanie, b) uzavreté spätne pretlačovanie, c) stranové pretlačovanie, d) združené pretlačovanie.

Súčiastky jednoduchého tvaru (napr. kalíškové) je možné vyrobiť v jednej tvárniacej operácii. Tvarovo jednoduché, ale technologicky náročnejšie a súčiastky zložitejšieho tvaru je nutné zhotoviť vo viacerých tvárniacich operáciách, pri ktorých sa často nevystačí s jedným základným spôsobom objemového tvárnenia. Tabuľka 3 podľa Feldmanna udáva, s akou veľkou deformáciou možno počítať v jednej tvárniacej operácii pre rôzne tvárniace spôsoby. Dolná medza platí pre ocele s veľkým obsahom uhlíka alebo zliatinové ocele, pričom horná medza je určená pre ocele s malým obsahom uhlíka. [28]

Tab. 3 Dosiahnuteľné pomerné deformácie pre určité spôsoby tvárnenia [28].

Spôsob tvárnenia		Zmena prierezu		Zmena výšky	
		ε_s [%]	φ_s [-]	ε_H [%]	φ_H [-]
Spätne pretlačovanie		40 ÷ 75	0,51 ÷ 1,4	—	—
Dopredné pretlačovanie	uzavreté	30 ÷ 95	0,37 ÷ 3,0	—	—
	voľné	5 ÷ 30	0,05 ÷ 0,37	—	—
Ubíjanie		—	—	40 ÷ 80	0,51 ÷ 1,61

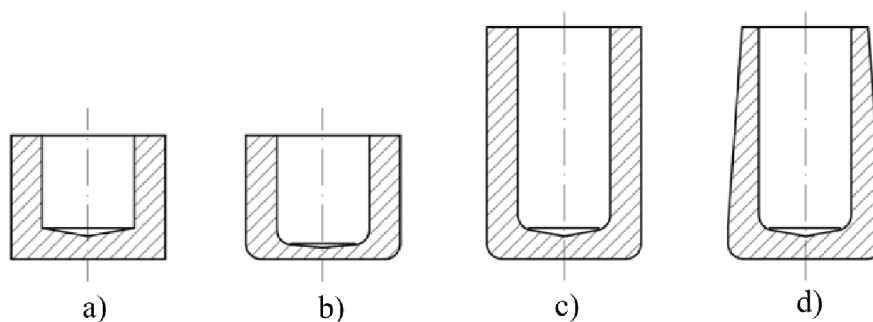
2.7.1 Technologickosť a vlastnosti súčiastok spätného pretlačovania

Technologickosťou súčiastky sa rozumie vhodnosť a schopnosť výroby súčiastky, pri najnižších výrobných nákladoch a pri najkratšej výrobnej dobe. [33] Pri navrhovaní prietlačkov platia všeobecné zásady [33; 39]:

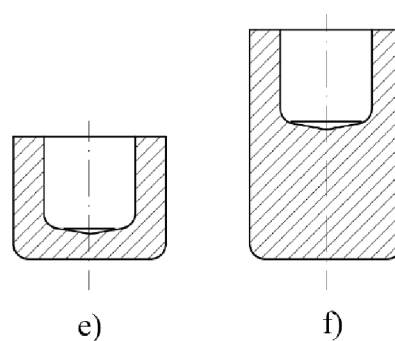
- Vyvarovať sa náhlym prechodom, alebo náhlym zmenám prierezov.
- Vyvarovať sa ostrým hranám a rohom.
- V prípade, že je to možné, treba zmierniť prechody nábehovým kužeľom, alebo zaoblením.
- Prietlačky s vnútorným alebo vonkajším kužeľom sa vyrábajú obťažne.

Náhle zmeny pričného prierezu, ostré hrany a rohy prekážajú toku materiálu a zbytočne tak zväčšujú tvárniacu silu. Ostré hrany u kališkovitých súčiastok spätného pretlačovania, kde hrúbka dna je väčšia ako hrúbka steny (obr. 25e) nie je vadou, avšak kde je hrúbka dna rovnaká, alebo menšia (obr. 25a), porušuje sa často materiál v rohoch. Hĺbka vtlačovaného otvoru môže byť maximálne dvojnásobok z priemeru otvoru, pretože inak dochádza k opotrebovaniu nástroja. Pomer výšky prietlačku k priemeru má byť menší ako 2,5 ($H/D < 2,5$). Redukcia pričného prierezu ϵ_s má byť nie väčšia ako 0,7. Výroba prietlačkou s vonkajším, alebo vnútorným kužeľovým priemerom je veľmi obťažná a vykonáva sa len vo výnimočných prípadoch, ak ide o veľmi krátke kužele. Každopádne trenie o stenu nástroja pri tvárnení kužeľových plôch je príliš veľké. Ekonomickjšou variantou, ako vyrobiť kužeľovú plochu je súčasť dokončiť obrábaním. Typy vhodných a nevhodných tvarov súčiastok pre spätné pretlačovanie sú vyobrazené na obrázku 25. [28; 33]

NEVHODNÉ



VHODNÉ



Obr. 25 Príklady vhodných a nevhodných tvarov prietlačkov spätného pretlačovania [18]: a) prietlačok bez zaoblenia hrán, b) prietlačok s príliš tenkým dnom, c) prietlačok s hĺbkou otvoru väčšou ako dvojnásobok priemeru otvoru, d) prietlačok s kužeľovou plochou, e ,f) vhodné tvary.

Dosiahnutá hospodárna presnosť rozmerov výrobkov pretlačovaných za studena sa pohybuje v rozmedzí IT 8 – IT 10, v istých prípadoch aj IT 6. Cena prietlačku viditeľne stúpa pri zmenšovaní tolerancií. Preto je vhodné zvážiť, či použitie technológie pretlačovania je v danom prípade ekonomicky výhodné, alebo by v danej situácii nepomohla konštrukčná zmena vyrábanej súčiastky. Úchylky rozmerov pretlačovaných nádob za studena s pomerom výšky prietlačku a vonkajším priemerom menším alebo rovným 1,2 ($H/D \leq 1,2$) a s hrúbkou steny $s = 2-15$ mm sú k dispozícii v prílohe 2. [4; 39; 40]

Pretlačované výrobky za studena majú dobrú akosť povrchu a taktiež odolnosť proti oteru. Drsnosť povrchu výrobkov pretlačovaných za studena je priamo závislá na kvalite opracovaných funkčných častí prietlačníka a prietlačnice, na kvalite povrchu polotovaru a pohybuje sa v rozmedzí $R_a = 0,4 - 12,5$ μm , a teda je možné dosiahnuť akosť povrchu ako pri jemnom brúsení a leštení. [37; 39; 40]

2.7.2 Príprava polotovaru

Ako polotovar sa používajú tyče požadovaného prierezu (najčastejšie kruhové), podľa tvaru prietlačku. Tieto polotovary majú byť bez viditeľných väd, bez okuj a strihané polotovary musia byť bez ostrých hrán a s odstránenou nerovnobežnosťou čiel. [33] Medzi prípravy a úpravy polotovaru pred pretlačovaním ocele spadajú tieto úkony [33]:

- rovanie tyčí,
- lúpanie tyčí,
- delenie tyčí na klátiky,
- odmastenie pred žíhaním,
- tepelné spracovanie materiálu,
- čistenie povrchu,
- fosfátovanie povrchu,
- mazanie.

Rovnajú sa hlavne valcované tyče, najmä ak je potrebné lúpanie tyčí, ktorým sa odstraňujú okuje, povrchové vady, oduhličené povrchy. Delenie tyčí sa najčastejšie vykonáva strihaním na lisochoch v závislosti pomeru dĺžky tyče k jej priemeru. [33; 44]

Strihanie je najlacnejším, najvýkonnejším spôsobom delenia tyčových polotovarov, pri ktorom vzniká skoro žiaden, alebo minimálny odpad. Nevýhodou strihania je znížená kvalita strižnej plochy a limitujúca minimálna dĺžka strihaného klátika. Ak je východiskový polotovar s pomerom dĺžky k priemeru $H_0/D_0 \geq 0,6$, tak sa môže polotovar strihať. V situáciách, kde sa nedá použiť strihanie sa používa upichovanie na sústruhochoch, alebo rezanie na pilách. [33; 41]

Rezaním sa delia polotovary na rôznych typoch píl. Rezanie sa používa predovšetkým u neželezných kovoch a zliatin, ktoré nemožno strihať (kvôli nízkej pevnosti a vzniku otlakov na koncových častiach). Uplatňuje sa taktiež pri delení bežných konštrukčných, vysokouhlíkových a legovaných ocelí s veľkým prierezom. Výhodou rezania je, že zabezpečuje vysokú akosť reznej plochy, vhodnú pre zápusťkové a ubíjané výkovky. Rezanie sa odporúča pre delenie polotovarov v podmienkach malosériovej výroby, pretože počas rezania vždy v mieste rezu vzniká materiálový odpad s hrúbkou použitého rezného nástroja (1 – 8 mm). V porovnaní so strihaním sa rezanie vyznačuje nižšou výkonnosťou, vysokou spotrebou rezných nástrojov a vysokou spotrebou materiálu. [41]

Pred tepelným spracovaním materiálu sa polotovary odmasťujú najčastejšie morením a následne sa používa žíhanie na mätko, alebo v niektorých prípadoch taktiež aj normalizačné žíhanie. Po žíhaní je potrebné odstrániť okuje, ak sa žihalo bez ochrannej atmosféry najčastejšie omieľaním v bubnoch s oceľovou drťou. [33]

Fosfátovaním povrchu sa vytvára súvislá a dobre priľnavá vrstva fosforečnanov, čím sa vytvorí porézná vrstva, schopná dobre absorbovať mazivo. Pri oceliach, ktoré sa nedajú fosfátovať sa používa galvanické pokovovanie (pozinkovanie, pomedenie). Samotná fosfátová vrstva má taktiež mazacie vlastnosti, no pre efektívnejšie zníženie trenia nasleduje mastenie. Mastenie polotovarov sa používa na zníženie trenia, tlakov, tvárniacich síl, zlepšenie kvality povrchu prietlačku a taktiež aj zvýšenie životnosti nástroja. Na mastenie sa zvyknú používať vo vode rozpustné mydlá, minerálne oleje, rastlinné a živočíšne tuky a pod. Pri vysokých tvárniacich tlakoch sa ako mazadlo používa sírnik molybdeničitý MoS₂ a pri použití tvárniacich automatov sa využíva sulfónový rezný olej MS, ktorý spolu s vápnom a mydlom vytvorí na sfosfátovanej vrstve mazací film. [33]

2.7.3 Určenie objemu výlisku a polotovaru

Objem polotovaru pri objemovom tvárnení sa nemení podľa zákona o zachovaní objemu, kde objem polotovaru je rovný objemu výlisku. [59] Pre zákon zachovania objemu platí vzťah [5]:

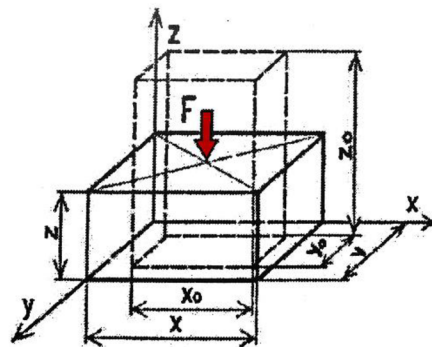
$$V_0 = V = \text{konšt.} , \quad (2.3)$$

kde: V_0 - objem polotovaru [mm³],
 V - objem výlisku [mm].

Z predpokladu, že platí zákon zachovania objemu a z geometrie podľa obrázka 26 je možné tvrdiť, že platí aj vzťah [5]:

$$\frac{x}{x_0} \cdot \frac{y}{y_0} \cdot \frac{z}{z_0} = 1 , \quad (2.4)$$

kde: x, y, z - rozmery telesa [mm],
 x_0, y_0, z_0 - pôvodné rozmery telesa [mm].



Obr. 26 Deformácia tvaru plastického telesa [5].

Po zlogaritmovaní vzťahu (2.4) sa získava vzťah [5]:

$$\ln \frac{x}{x_0} \cdot \ln \frac{y}{y_0} \cdot \ln \frac{z}{z_0} = 0 . \quad (2.5)$$

Tento vzťah vyjadruje, že súčet troch normálových, alebo hlavných zložiek pretvorení je rovný nule. Preto rovnicu (2.5) je možné zapísať aj ako [5]:

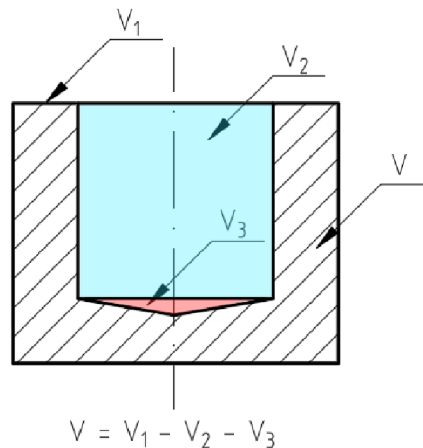
$$\varphi_x + \varphi_y + \varphi_z = 0 , \quad (2.6)$$

kde: $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ - normálové zložky logaritmickej deformácie [-].

Počiatočný objem polotovaru je možné určiť z konečného tvaru výlisku, u ktorého sa berú do úvahy taktiež prípadné prídavky pre dokončovanie obrábaním. Celé teleso sa rozdelí na jednoduchšie časti telesa, pre ktoré je známy matematický vzorec výpočtu objemu. Súčtom alebo rozdielom týchto častí telesa sa získa celkový objem hotového výlisku (obr. 27). [4; 28] Objem výlisku je daný vzťahom [28]:

$$V = \sum V_i, \quad (2.7)$$

kde: V_i - objem časti telesa [mm^3].



Obr. 27 Príklad rozdelenia telesa na jednoduchšie časti.

Pre získanie hodnôt hmoty a objemu polotovaru je potrebné k vypočítanému objemu výlisku pripočítať experimentálne stanovenú hodnotu odpadu pripadajúceho na zhotovenie počiatočného polotovaru (napr. upichovaním, strihaním a pod.). [4; 28] Pre objem polotovaru so zreteľom na odpad deleného strihaním je určený empirický vzťah [4]:

$$V_{pol(strihanie)} = 1,05 \cdot V, \quad (2.8)$$

kde: $V_{pol(strihanie)}$ - objem polotovaru deleného strihaním so zreteľom na odpad [mm^3].

Pre objem polotovaru so zreteľom na odpad deleného rezaním pílou je určený empirický vzťah [4]:

$$V_{pol(rezanie)} = 1,2 \cdot V, \quad (2.9)$$

kde: $V_{pol(rezanie)}$ - objem polotovaru deleného rezaním so zreteľom na odpad [mm^3].

2.7.4 Určenie veľkosti deformácie

Počas spätného a dopredného pretlačovania sa vždy uskutočňuje redukcia prierezu počiatočného polotovaru. [42] Deformáciu prierezu podľa geometrie na obrázku 28 možno vyjadriť [42]:

- Pomernou deformáciou:

- prierezu:

$$\varepsilon_S = \frac{S_0 - S}{S_0} \cdot 100, \quad (2.10)$$

kde: ε_S - pomerná deformácia prierezu [%],
 S_0 - počiatočná plocha prierezu [mm²],
 S - konečná plocha prierezu [mm²].

- rozmeru:

$$\varepsilon_H = \frac{H_0 - H}{H_0} \cdot 100, \quad (2.11)$$

kde: ε_H - pomerná deformácia rozmeru [%],
 H_0 - počiatočný rozmer výšky [mm],
 H - konečný rozmer výšky [mm].

- Skutočnou logaritmicou deformáciou:

- prierezu:

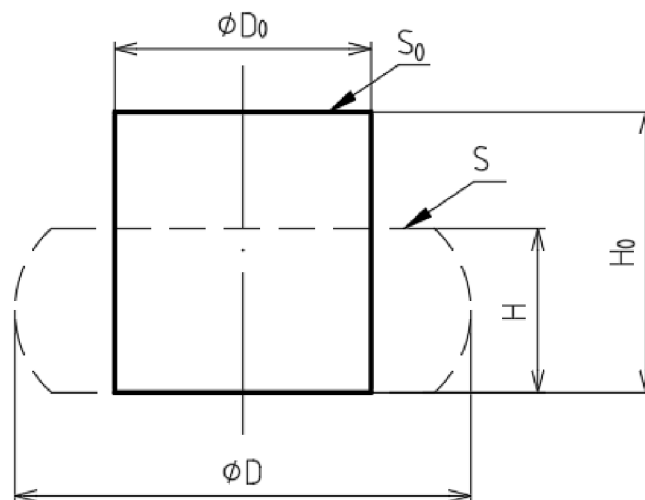
$$\varphi_S = \ln \frac{S_0}{S}, \quad (2.12)$$

kde: φ_S - logaritmicá deformácia prierezu [-].

- rozmeru:

$$\varphi_H = \ln \frac{H_0}{H}, \quad (2.13)$$

kde: φ_H - logaritmicá deformácia rozmeru [-].



Obr. 28 Geometrický model pretvorenia [43].

Skutočná deformácia φ je síce menej názorná, ale v porovnaní s pomernou deformáciou ε má isté výhody. V prípade, že sa prietlačok tvaruje viacoperačne a bez použitia medzioperačného žihania, je možné čiastkové hodnoty skutočných deformácií φ sčítať. Pre pomerné deformácie ε však táto možnosť neplatí. [42] Pre viac operačné tvárnenie s podmienkou nepoužitia žihania platí vzťah [42]:

$$\varphi_c = \sum |\varphi_i|, \quad (2.14)$$

kde: φ_i - čiastková hodnota logaritmickej deformácie [-].

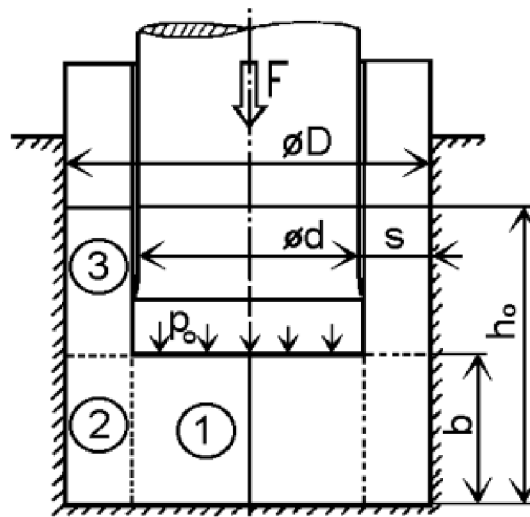
2.7.5 Možnosti riešenia spätného pretlačovania

Počas spätného pretlačovania je stav pretvorenia nerovnomerný a smery hlavných deformácií nie sú totožné so smermi súradnicových os. Existuje viac riešení tejto nehomogénnej plastickej deformácie, avšak počas procesov pretlačovania vznikajú v tvárnenom objeme výhodné stavy napätostí, a preto je možné dosiahnuť veľké stupne pretvorenia bez porušenia materiálu. [5; 33] Medzi možné riešenia výpočtu deformačného odporu pri spätnom pretlačovaní patria metódy [5]:

- podľa Dippera,
- podľa Sachsa,
- podľa Siebela.

V priebehu pretlačovania kovu, kov vyteká prstencom medzi prietlačníkom a prietlačnicou a v oblasti 3 podľa geometrického modelu na obr. 29 sa ďalej nepretvára, ale iba vysúva. V prípade kužeľového tvaru čela prietlačníku sa plastická oblasť rozširuje až za hranicu čela prietlačníku do oblasti 3. [5] Pri procese pretlačovania rozoznávame tieto tri oblasti [5]:

- Oblasť 1 – oblasť ubíjania.
- Oblasť 2 – oblasť ubíjania.
- Oblasť 3 – oblasť pretvorená, v ktorej už neprebíha pretvorenie.



Obr. 29 Geometrický model spätného pretlačovania s rozdelenými oblasťami pri procese tvárnenia [44].

Na obrázku 30 je znázornený uvažovaný matematický model pôsobiacich napätí v jednotlivých oblastiach. V oblasti 2 z podmienky rovnováhy síl v osovom smere na elemente medzikružia plynie vzťah [5]:

$$\sum F_z = d\sigma_{z2} \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) - 2f_{2str} \cdot \sigma_p \cdot \frac{2\pi}{4}(D - d)dz = 0, \quad (2.19)$$

kde: F_z - sila v smere osy z [N],
 σ_{z2} - osové napätie v oblasti 2 [MPa].

Po úprave podmienky rovnováhy síl sa získa homogénna diferenciálna rovnica [5]:

$$\frac{d\sigma_{z2}}{dz} - \frac{4f_{2str}}{D - d} \cdot \sigma_p = 0. \quad (2.20)$$

Riešením tejto rovnice pre okrajové podmienky $z = b$, $\sigma_{z2} = 0$ sa získa vzťah pre osové napätie v oblasti 2 [5]:

$$\sigma_{z2} = -\frac{4f_{2str}}{D - d}(b - z) \cdot \sigma_p. \quad (2.21)$$

Riešením rovnice (3.15) pre podmienku plasticity $\sigma_{z2} - \sigma_{r2} = \sigma_p$ sa získa vzťah pre radiálne napätie v oblasti 2 [5]:

$$\sigma_{r2} = -\left[\frac{4f_{2str}}{D - d}(b - z) + 1\right] \cdot \sigma_p, \quad (2.22)$$

Rovnakým postupom z matematického modelu na obr. 30 ako pre oblasť 2, tak aj pre oblasť 1, z podmienky rovnováhy síl pôsobiacich na tenký rotačne symetrický element v radiálnom smere a jej úpravou obdržíme homogénnu diferenciálnu rovnicu [5]:

$$\frac{d\sigma_{r1}}{dr} - \frac{2f_1}{b} \cdot \sigma_{p1} = 0, \quad (2.23)$$

kde: σ_{r1} - radiálne napätie v oblasti 1 [MPa].

Riešením rovnice (2.23) pre integračnú konštantu s okrajovými podmienkami na rozhraní oblasti 1 a 2, $r = d/2 \rightarrow \sigma_{r1} = \sigma_{r2str}$ sa získa vzťah pre radiálne napätie v oblasti 1 [5]:

$$\sigma_{r1} = -\frac{2f_1}{b}\left(\frac{d}{2} - r\right) \cdot \sigma_{p1} + \sigma_{r2str}, \quad (2.24)$$

kde: σ_{p1} - prirodzený pretvárný odpor v oblasti 1 [MPa],
 σ_{r2str} - stredná hodnota radiálneho napätia v oblasti 2 [MPa].

Riešením rovnice (2.23) pre podmienku plasticity $\sigma_{r1} - \sigma_{z2} = \sigma_{p1}$ sa získa rovnica pre osové napätie v oblasti 1 [5]:

$$\sigma_{z1} = -\left[\frac{2f_1}{b}\left(\frac{d}{2} - r\right) + 1\right] \cdot \sigma_{p1} + \sigma_{r2str}, \quad (2.25)$$

kde: σ_{z1} - osové napätie v oblasti 1 [MPa].

Dosadením $\sigma_p = \sigma_{p2str}$ a $z = b/2$ do vzťahu (2.22) sa získava rovnica pre matematický popis rozloženia osového napätia na čele prietlačníka. Následnou jej integráciou po ploche čela prietlačníku a ďalších úpravách sa obdrží konečná rovnica pre výpočet deformačného odporu [5]:

$$\begin{aligned} \sigma_d &= -\sigma_{z1str} = -\frac{1}{S} \int_{(S)} \sigma_{z1} \cdot ds = \\ &= \sigma_{p1} \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f_1 \cdot d}{b} \right) + \sigma_{p2str} \left(1 + \frac{2f_{2str}}{D-d} \cdot b \right), \end{aligned} \quad (2.26)$$

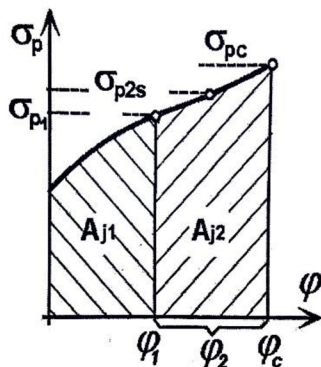
kde: σ_{z1str} - stredná hodnota osového napätia v oblasti 1 [MPa],
 σ_{p2str} - stredná hodnota prirodzeného pretvárného odporu v oblasti 2 [MPa].

Stredná hodnota prirodzeného pretvárného odporu v oblasti 2 σ_{p2str} sa určuje z krivky pretvárného odporu (obr. 31) z merných pretvárných prác podľa vzťahu [5]:

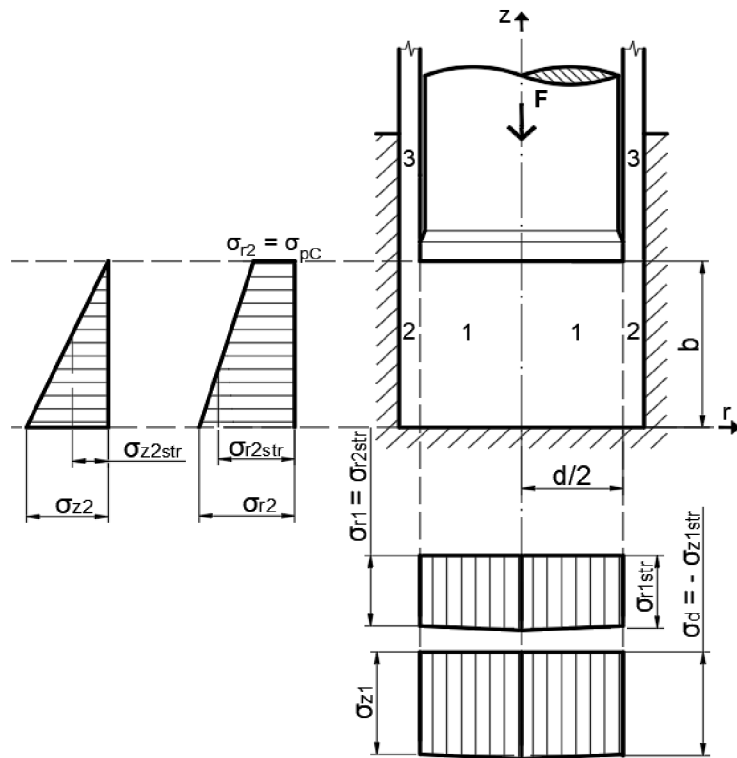
$$\sigma_{p2str} = \frac{1}{\varphi_3 - \varphi_1} \int_{\varphi_1}^{\varphi_3} \sigma_p \cdot d\varphi = \frac{A_{j3} - A_{j1}}{\varphi_2} \cdot 1000, \quad (2.27)$$

kde: A_{j3} - celková merná pretvárná práca v oblasti 3 [$J \cdot mm^{-3}$],
 A_{j1} - merná pretvárná práca dosiahnutá v oblasti 1 [$J \cdot mm^{-3}$],

Pre výpočet rovníc tvárniacich tlakov je potrebné použiť a dosadiť hodnoty pretvárných odporov, ktoré sa získajú z materiálového modelu vyjadreného krivkou spevnenia (obr. 31). Na obr. 32 je možné pozorovať vyznačené priebehy napätia na stene prietlačnice. [5; 33]



Obr. 31 Materiálový model materiálu (krivka spevnenia) [44].



Obr. 32 Priebeh napätia na stene prietlačnice [44].

Sachs rieši problematiku výpočtu deformačného odporu pri spätnom pretlačovaní so zanedbaním trenia na stene prietlačnice [5]. Deformačný odpor podľa Sachsa sa vypočíta podľa vzťahu [5]:

$$\sigma_d = -\sigma_{zmax} = 1,58 \cdot \sigma_{pc} \cdot \ln \frac{D^2}{D^2 - d^2}, \quad (2.28)$$

kde: σ_{zmax} - maximálna dosiahnutá hodnota osového napätia [MPa],
 σ_{pc} - celkový prirodzený odpor v oblasti 3 [MPa].

Riešenie Siebela je v praxi často používaný matematický model, ktorým sa rieši problematika spätného pretlačovania oceľových, alebo mosadzných kalíškov s hrúbkou steny $s > 0,1 \cdot d$ [5]. Deformačný odpor stanovený podľa Siebela sa vypočíta podľa vzťahu [5]:

$$\sigma_d = 1,152 \cdot \sigma_{pc} \frac{D^2}{d^2} \left(\log \frac{D^2}{D^2 - d^2} + \frac{D^2}{D^2 - d^2} \cdot \log \frac{D^2}{d^2} + \log \frac{d^2}{D^2 - d^2} \right). \quad (2.29)$$

2.7.6 Tvárniaca sila a práca při pretlačovaní

Tvárniaca sila potrebná pri pôsobení prietlačníka na tvárniaci materiál je určená deformačným pretvárnym odporom pôsobiacim na plochu čela nástroja. [5] Vypočíta sa zo vzťahu [5]:

$$F_{tvárniaca} = \sigma_d \cdot S_z, \quad (2.30)$$

kde: $F_{tvárniaca}$ - tvárniaca sila [N],
 S_z - plocha čela nástroja [mm²].

Tvárniaca práca je pôsobenie deformačnej sily na celkovej dráhe prietlačníka. Tvárniaca práca **A** je definovaná vzťahom [5]:

- Pomocou sily a dráhy:

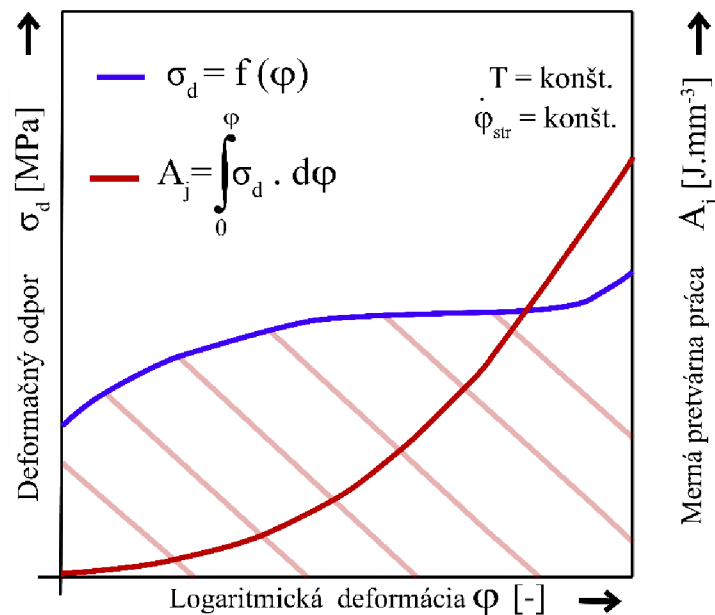
$$A = F_{tvárniaca} \cdot z_n = \int_0^z \sigma_d \cdot S \cdot dz = \int_0^z \sigma_d \cdot \frac{V}{h} \cdot dz, \quad (2.31)$$

kde: z_n - dráha nástroja [m],
 h - výška pretvoreného telesa [mm].

- Pomocou mernej pretvárnej práce **A_j** a objemu tvárneného telesa [5]:

$$A = A_j \cdot V = V \int_0^z \sigma_d \cdot d\varphi, \quad (2.32)$$

Z diagramu na obrázku 33 možno pozorovať, že tvárniaca práca pri spätnom pretlačovaní bude mať najvyššiu hodnotu pri najväčšom spôsobenom pretvorení prietlačku, to znamená na konci dráhy prietlačníka. Preto nie je vhodné pretlačovať prietlačky s veľmi tenkým dnom, pretože sila bude prudko stúpať a bude hroziť porušením materiálu. [33]

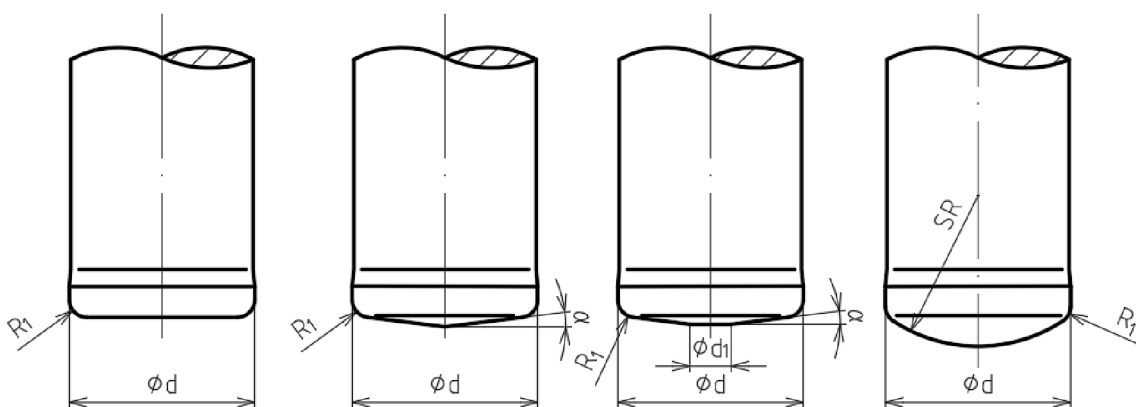


Obr. 33 Merná pretvárná práca v závislosti na skutočnom logaritmickej pretvoreni [5].

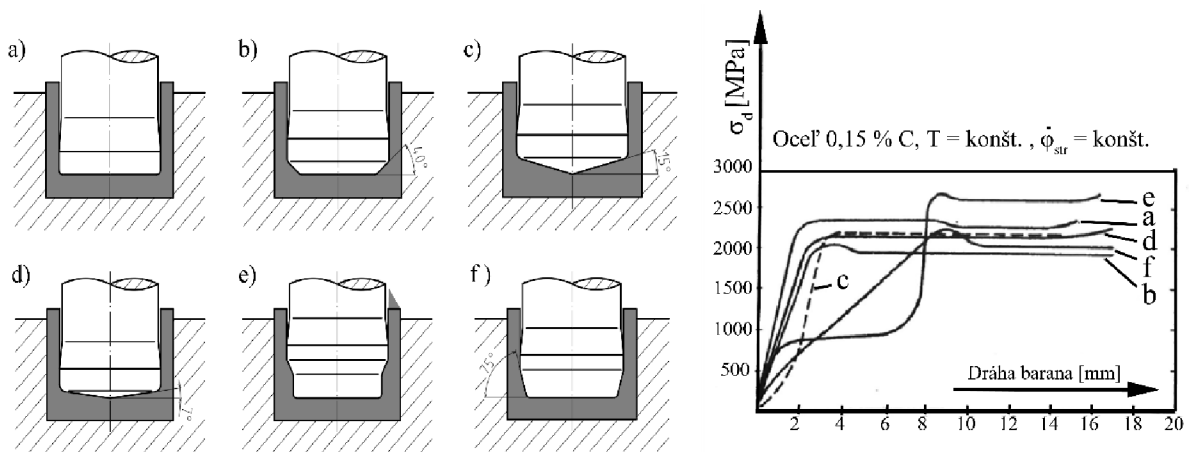
2.7.7 Nástroje spätného pretlačovania

K zabezpečeniu hospodárnosti výroby je dôležitá dobrá životnosť nástroja, ktorá závisí od správnej konštrukcie, výberu vhodného materiálu nástroja a jeho tepelného spracovania. Nástroje pre pretlačovanie sú konštruované tak, aby bolo zamedzené trenie medzi výrobkom a nástrojom, a aby boli jednoducho vymeniteľné. [4; 28]

Jednou z najdôležitejších pracovných častí nástroja je prietlačník. Tvar čela prietlačníka má vplyv na veľkosť a priebeh deformačného odporu a teda aj pretlačovacej sily (obr. 35). Pokiaľ prietlačok nevyžaduje špeciálny tvar dna, tak sa najčastejšie používa prietlačník s kužeľovitým čelom. Typy najbežnejších tvarov prietlačníkov sú znázornené na obr. 34. Geometrické parametre prietlačníka sa volia nie len podľa tvaru prietlačku, ale aj s ohľadom na tvárniacu teplotu. Uhol α sa volí v rozsahu $5 - 8^\circ$ pri izbovej teplote. Tento uhol je potrebný, pretože umožňuje sústavné rozťahovanie mazacej vrstvy po stene otvoru a tým znižuje trenie. Odľahčenie drieku prietlačníka za čelnou fazetou taktiež má značný vplyv na zníženie trenia a tým aj deformačného odporu. Zaoblenie R_1 čelnej hrany prietlačníka býva v praxi 0,5 až 3 mm pre priemery otvorov prietlačkov od 10 do 80 mm. [28]

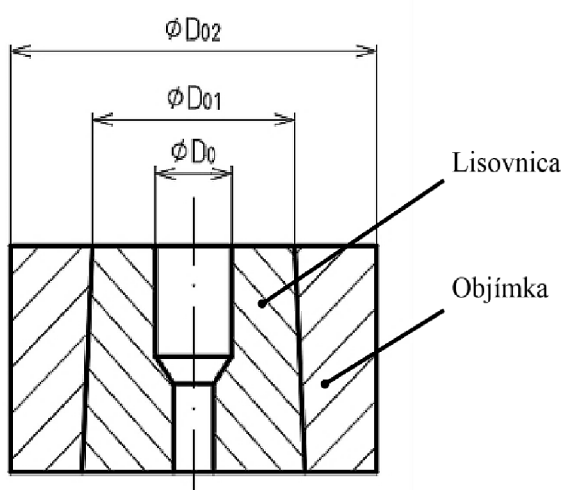


Obr. 34 Typy tvarov prietlačníkov používaných pri spätnom pretlačení [33].

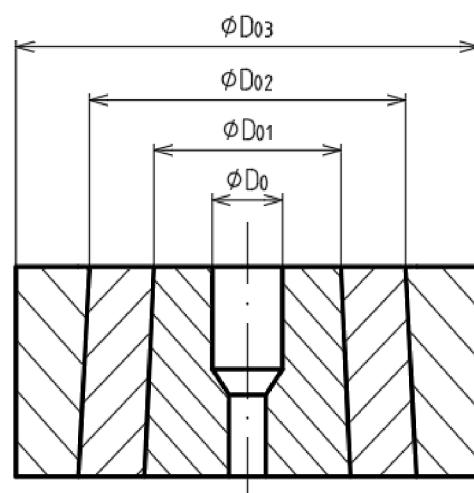


Obr. 35 Vplyv tvaru čela prietlačníka na priebeh a veľkosť deformačného odporu v závislosti na dráhe pri tvárnení ocele s obsahom uhlíka 0,15 % C [28].

Ďalšou z najdôležitejších a najviac namáhaných funkčných častí nástroja je prietlačnica. Tvar dutiny prietlačnice je predovšetkým určený tvarom tvárnenej súčiastky. Pri konštrukcii prietlačnice je ale potrebné venovať pozornosť nie len tvaru funkčnej dutiny, ale predovšetkým jej prevedeniu a uloženiu prietlačnice. Materiál prietlačnic je namáhaný počas pretlačovania len na tlak. Tlak v prietlačnici vyvolaný prietlačníkom je možno uvažovať ako hydrostatický tlak, ktorého radiálna tlačná sila pôsobí na obvod prietlačnice a rozťahuje ju, čím vzniká obvodové namáhanie ťahom. Namáhanie je značne veľké, preto sa únosnosť prietlačnic zvyšuje radiálnym predpätím pomocou jednej alebo viacerých objímok. Jednoduchú prietlačnicu bez použitia objímky možno použiť ak vyvolaný radiálny tlak je do 1000 MPa. Prietlačnice s jednou objímkou (obr. 36) možno použiť pre radiálne tlaky do 1600 MPa a pre vyššie tlaky je potrebné použiť púzdrovanie prietlačnice dvoma objímkami (obr. 37). Jednotlivé objímky sa lisujú s predpätím do seba za tepla, alebo za studena v prípade, že sú objímky kužeľovité. Lisovanie za studena je spôsob, ktorý je výhodnejší a v praxi prevláda. [5; 28; 40]



Obr. 36 Púzdrovanie prietlačnice jednou objímkou [40].



Obr. 37 Púzdrovanie prietlačnice dvoma objímkami [40].

Vyhadzovač je taktiež veľmi namáhanou súčasťou tvárniaceho nástroja na ktorú je treba brať ohľad. Vyhadzovače sú rôznych tvarov a ich funkciou je odstraňovať výlisky z prietlačnice. Vyhadzovače určené pre spätné pretlačovanie majú spodnú opernú plochu rozšírenú a opierajúcu sa o kalenú podložku. Tvar čela vyhadzovačov závisí od tvaru prietlačku a môže byť rovný, kužeľový, guľový, podobne ako tvar čela prietlačníka. [28]

K zabezpečeniu najoptimálnejšej hospodárnosti technológie patrí zvolenie správneho materiálu nástrojov. Možnosti a typy materiálov vhodných na zhotovenie nástrojov na pretlačovanie sú podľa normy ČSN 22 7005 zhrnuté v prílohe 3. Nástroje sú zaťažované kombinovaným striedavým namáhaním v tlaku, v ťahu a mnohokrát aj namáhaním v ohybe, k čomu všetkému sa pridáva striedavé tepelné namáhanie spôsobené zahrievaním a ochladzovaním nástrojov. V prípade, že sa dodržia všetky základné podmienky pri výrobe nástrojov a pri ich používaní, je možno predpokladať ich životnosť podľa priemernej životnosti nástrojov overenej v praxi v tabuľke 4. [28; 40]

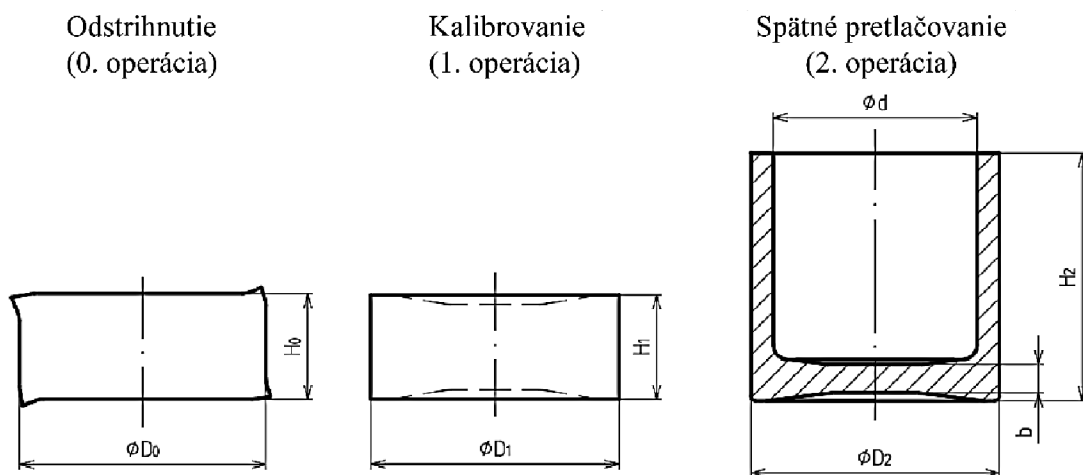
Tab. 4 Priemerná životnosť nástrojov v praxi [28].

Časť nástroja	Materiál ČSN	Tvrdosť HRC	Priemerná životnosť
Prietlačnica	19 191	60 – 62	8 000 – 12 000
	19 614	56 – 58	10 000 – 35 000
	G5	–	500 000 – 1 000 000
Prietlačník	19 423	56 – 58	10 000 – 40 000
	19 436	58 – 60	
Vyhadzovač	19 436	58 – 60	20 000 – 200 000
	19 452	56 – 58	

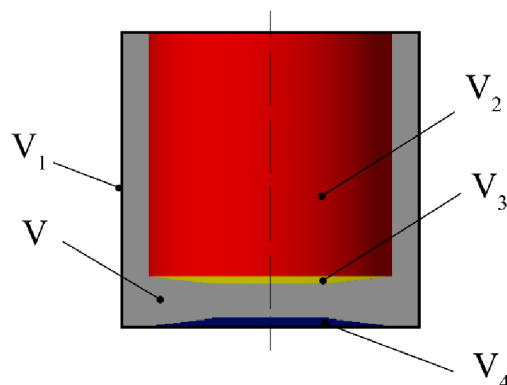
3 NÁVRH RIEŠENIA

Pri navrhovaní technologického postupu sa bude vždy vychádzať z objemu vylisku. Pomocou neho sa vypočítajú rozmery predlisku a počiatočného polotovaru. Vypočítajú sa taktiež dielčie a celové deformácie a zhodnotí sa, či nedôjde k prekročeniu kritickej hodnoty. Navrhnuté technologické postupy sú:

- Technologický postup č.1 (obr. 38):
 - Východzí polotovar: valcovaná tyč kruhového prierezu 12 010.
 - Východzí polotovar odstrihnúť s rozmermi $\varnothing D_0$ a H_0 .
 - Žihanie na mätko.
 - Povrchová úprava (morenie, fosfatizácia, oplach).
 - Kalibrovanie na rozmery klátika – $\varnothing D_1$, H_1 a predlisovanie zahĺbenia z oboch strán.
 - Spätne pretlačovanie na rozmery kalíška:
 - $\varnothing D_2 = 52,4$ mm,
 - $\varnothing d = 43$ mm,
 - $H_2 = 55,3$ mm,
 - $b = 6$ mm.
 - Zarovnanie čela trieskovým obrábaním.



Obr. 38 Technologický postup č.1



Obr. 39 Rozdelenie tvaru prietlačku na jednoduchšie časti

Prvým krokom technologického výpočtu je výpočet objemu výlisku. Pre objem zadaného výlisku je použitý výpočet (2.7). Zadané teleso bolo rozdelené na štyri jednoduchšie časti bez vplyvu vnútorného a vonkajšieho zaoblenia hrany (obr. 39). Zrezaný kužeľ so základňou $\varnothing 43$ mm má výšku 1,41 mm. Výšky valcov s objemom V_1 a V_2 sú so zreteľom prídavku 3 mm potrebného na zarovnanie čela. Objem vypočítaného telesa je vypočítaný podľa vzťahu (2.7):

$$\begin{aligned} V &= V_1 - (V_2 + V_3 + V_4) = \\ &= \frac{\pi}{4} \cdot 52,4^2 \cdot 55,5 \\ &\quad - \left[\frac{\pi}{4} \cdot 43^2 \cdot 47,6 + \frac{1,41\pi}{3} \cdot \left(\left(\frac{43}{2} \right)^2 + \frac{43}{2} \cdot \frac{20}{2} + \left(\frac{20}{2} \right)^2 \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1,7\pi}{3} \cdot \left(\left(\frac{46}{2} \right)^2 + \frac{46}{2} \cdot \frac{20}{2} + \left(\frac{20}{2} \right)^2 \right) \right] = 47\,453,52, \end{aligned}$$

kde: V_1 - objem plného valca [mm^3],
 V_2 - objem vnútorného valca [mm^3],
 V_3 - objem zrezaného vnútorného kužeľa [mm^3],
 V_4 - objem zrezaného vonkajšieho kužeľa [mm^3].

Presnejší výpočet bol taktiež prevedený aj pomocou programu Autodesk Inventor, v ktorom bol zahrnutý prídavok potrebný na zarovnanie vytečeného čela, ale aj vplyv tvaru vonkajšieho a vnútorného zaoblenia hrán kalíšku. Objem konečného výlisku podľa použitého programu je [45]:

$$V = 50\,724,135 \text{ mm}^3.$$

Za predpokladu, že priemer predlisku a priemer výlisku sa nelíšia $\rightarrow D_1 = D_2$ a platí zákon o zachovaní objemu je možné vypočítať výšku predlisku po kalibrovaní [4]:

$$H_1 = \frac{V}{S_1} = \frac{50\,724,135}{\frac{\pi \cdot 52,4^2}{4}} = 23,52. \quad (3.1)$$

Priemer strihaného polotovaru $\varnothing D_0$ je vopred zvolený $\rightarrow \varnothing D_0 = 52$ mm. Dĺžku odstrihutej tyče H_0 možno vypočítať z objemu podľa vzťahu (3.1):

$$H_0 = \frac{V}{S_0} = \frac{50\,724,135}{\frac{\pi \cdot 52^2}{4}} = 23,88 \approx 23,9.$$

Vypočítané rozmery pre jednotlivé operácie sú znázornené na obr. 40. Vypočítané rozmery polotovaru nevyhovujú podmienke strihania $H_0/D_0 \geq 0,6$. Objem polotovaru deleného strihaním so zreteľom na odpad je vypočítaný podľa vzťahu (2.8):

$$\begin{aligned} V_{pol(strihanie)} &= 1,05 \cdot \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \cdot H_0 = 1,05 \cdot \frac{\pi \cdot 52^2}{4} \cdot 23,9 = \\ &= 53\,294,67. \end{aligned}$$

Výpočet logaritmického pretvorenia v oblasti 1 podľa vzťahu (2.16):

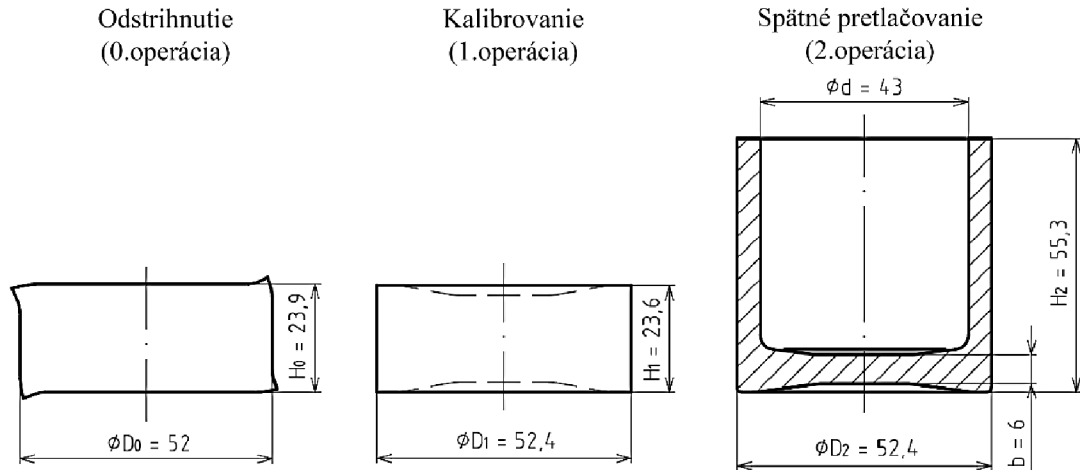
$$\varphi_1 = \ln \frac{H_0}{b} = \ln \frac{23,9}{6} = 3,9833.$$

Výpočet celkového logaritmického pretvorenia v oblasti 3 podľa vzťahu (2.15):

$$\varphi_3 = \varphi_1 \cdot \left(1 + \frac{d}{8 \cdot s}\right) = 1,3695 \cdot \left(1 + \frac{43}{4 \cdot (52,4 - 43)}\right) = 8,5389.$$

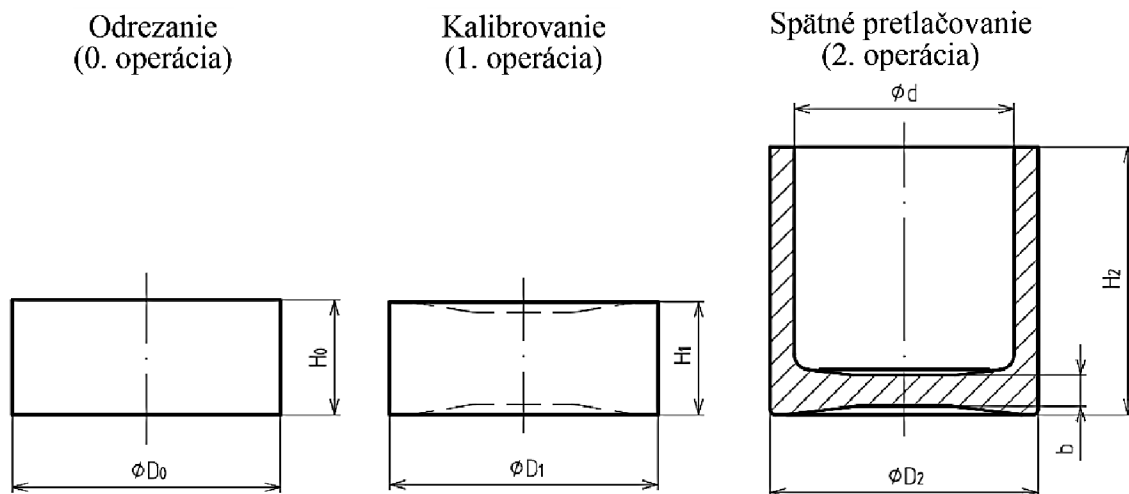
Výpočet logaritmického pretvorenia v oblasti 2 podľa vzťahu (2.17):

$$\varphi_2 = \varphi_3 - \varphi_1 = 8,5389 - 3,9833 = 4,5554.$$



Obr. 40 Technologického postupu č.1 s vypočítanými rozmermi po jednotlivých operáciách

- Technologický postup č.2 (obr. 41):
 - Východzí polotovár: valcovaná tyč kruhového prierezu 12 010.
 - Východzí polotovár odrezat' pílou s rozmermi klátika $\varnothing D_0$ a H_0 .
 - Žihanie na mätko.
 - Povrchová úprava (morenie, fosfatizácia, oplach).
 - Kalibrovanie na rozmery klátika – $\varnothing D_1$, H_1 a predlisovanie zahĺbenia z oboch strán
 - Spätne pretlačovanie na rozmery kalíška:
 - $\varnothing D_2 = 52,4$ mm,
 - $\varnothing d = 43$ mm,
 - $H_2 = 55,3$ mm,
 - $b = 6$ mm.
 - Zarovnanie čela trieskovým obrábaním.



Obr. 41 Technologický postup č.2

Objem výlisku je rovnaký ako v navrhnutom technologickom postupe č.1 [45]:

$$V = 50\,724,135 \text{ mm}^3.$$

Za predpokladu, že priemer predlisku a priemer výlisku sa nelíšia $\rightarrow D_1 = D_2$ a platí zákon o zachovaní objemu je možné vypočítať výšku predlisku po kalibrovaní podľa vzťahu (3.1):

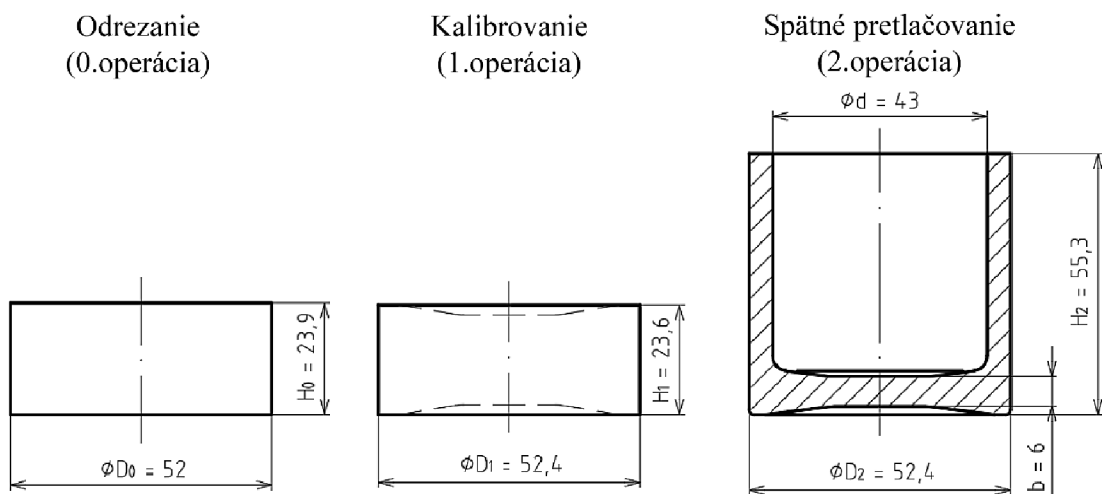
$$H_1 = \frac{V}{S_1} = \frac{50\,724,135}{\frac{\pi \cdot 52,4^2}{4}} = 23,52.$$

Priemer rezaného polotovaru $\varnothing D_0$ je vopred zvolený $\rightarrow \varnothing D_0 = 52 \text{ mm}$. Dĺžka rezaného polotovaru H_0 je vypočítaná z objemu podľa vzťahu (3.1):

$$H_0 = \frac{V}{S_0} = \frac{50\,724,135}{\frac{\pi \cdot 52^2}{4}} = 23,88 \approx 23,9.$$

Vypočítané rozmery v jednotlivých operáciách sú znázornené na obr. 42. Objem polotovaru deleného rezaním so zreteľom na odpad je vypočítaný podľa vzťahu (2.9):

$$V_{pol(rezanie)} = 1,2 \cdot \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \cdot H_0 = 1,2 \cdot \frac{\pi \cdot 52^2}{4} \cdot 23,9 = 60\,908,19.$$



Obr. 42 Technologický postup č.2 s vypočítanými rozmermi po jednotlivých operáciách.

Logaritmické pretvorenie v oblasti 1 je vypočítané podľa vzťahu (2.16):

$$\varphi_1 = \ln \frac{H_0}{b} = \ln \frac{23,9}{6} = 3,9833.$$

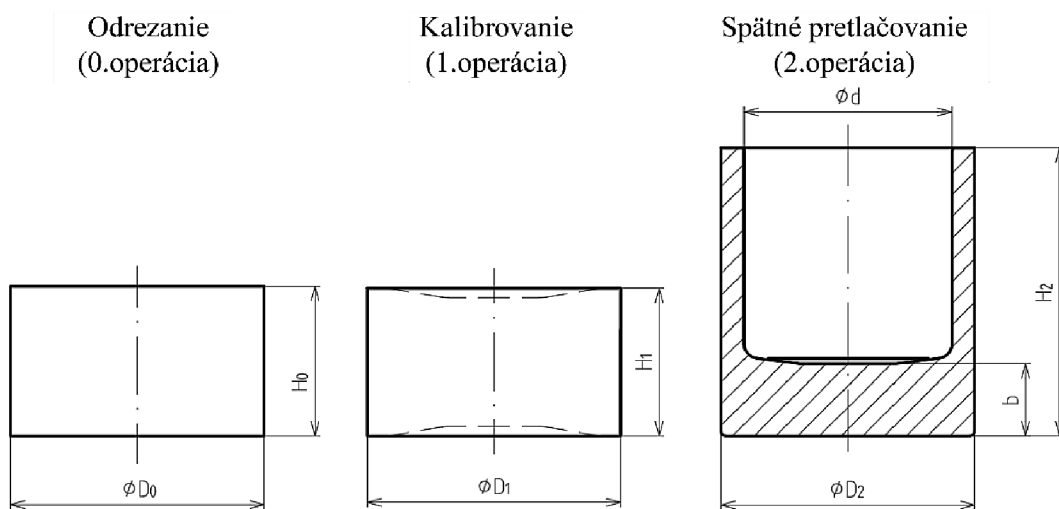
Logaritmické pretvorenie v oblasti 3 je vypočítané podľa vzťahu (2.15):

$$\varphi_3 = \varphi_1 \cdot \left(1 + \frac{d}{8 \cdot s}\right) = 3,9833 \cdot \left(1 + \frac{43}{4 \cdot (52,4 - 43)}\right) = 8,5389.$$

Výpočet logaritmického pretvorenia v oblasti 2 podľa vzťahu (2.17):

$$\varphi_2 = \varphi_3 - \varphi_1 = 8,5389 - 3,9833 = 4,5554.$$

- Technologický postup č.3 (obr. 43):
 - Východzí polotovár: valcovaná tyč kruhového prierezu 12 010.
 - Východzí polotovár odrezat' pílou s rozmermi klátika $\varnothing D_0$ a H_0 .
 - Žíhanie na mäkko.
 - Povrchová úprava (morenie, fosfatizácia, oplach).
 - Kalibrovanie na rozmery klátika – $\varnothing D_1$, H_1 a predlisovanie zahĺbenia z oboch strán.
 - Spätne pretlačovanie na rozmery kalíška:
 - $\varnothing D_2 = 52,4$ mm,
 - $\varnothing d = 43$ mm,
 - $H_2 = 61$ mm,
 - $b = 15$ mm.
 - Zarovnanie čela a obrobenie dna kalíšku na žiadané rozmery trieskovým obrábaním.



Obr. 43 Technologický postup č.3.

Objem výlisku určený pomocou programu Inventor [45]:

$$V = 65\,802,155.$$

Priemer predlisku $\varnothing D_1$ je vopred zvolený $\rightarrow \varnothing D_1 = \varnothing D_2 = 52,4$ mm. Výška predlisku po kalibrovaní je vypočítaná podľa vzťahu (3.1):

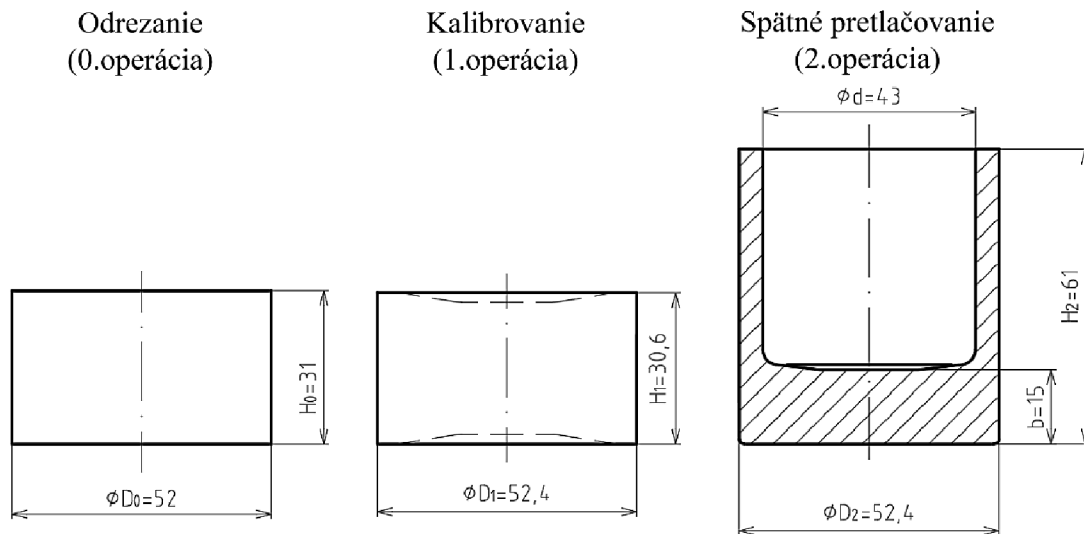
$$H_1 = \frac{V}{S_1} = \frac{65\,802,155}{\frac{\pi \cdot 52,4^2}{4}} = 30,51.$$

Počiatočný priemer rezaného polotovaru $\varnothing D_0$ je vopred zvolený $\rightarrow \varnothing D_0 = 52$ mm. Dĺžka rezaného polotovaru H_0 je vypočítaná zo zákona zachovania objemu podľa vzťahu (3.1):

$$H_0 = \frac{V}{S_0} = \frac{65\,802,155}{\frac{\pi \cdot 52^2}{4}} = 30,98.$$

Vypočítané rozmery po jednotlivých operáciách sú znázornené na obr. 44. Objem polotovaru deleného rezaním so zreteľom na odpad je podľa vzťahu (2.9):

$$V_{pol(rezanie)} = 1,2 \cdot \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \cdot H_0 = 1,2 \cdot \frac{\pi \cdot 52^2}{4} \cdot 31 = 79\,002,26.$$



Obr. 44 Technologický postup č.3 s vypočítanými rozmermi po jednotlivých operáciách

Výpočet logaritmického pretvorenia v oblasti 1 podľa vzťahu (2.16):

$$\varphi_1 = \ln \frac{H_0}{b} = \ln \frac{31}{15} = 0,7259.$$

Výpočet logaritmického pretvorenia v oblasti 3 podľa vzťahu (2.15):

$$\varphi_3 = \varphi_1 \cdot \left(1 + \frac{d}{8 \cdot s}\right) = 0,7259 \cdot \left(1 + \frac{43}{4 \cdot (52,4 - 43)}\right) = 1,5561.$$

Výpočet logaritmického pretvorenia v oblasti 2 podľa vzťahu (2.17):

$$\varphi_2 = \varphi_3 - \varphi_1 = 1,5561 - 0,7259 = 0,8302.$$

3.1 Zhodnotenie návrhov a výber najvhodnejšej varianty

Porovnanie a zhodnotenie technologických postupov (tab. 5) pomôže k výberu najvhodnejšej varianty. Boli navrhnuté tri varianty na výrobu piestu, u ktorých ide o aplikáciu predlisovania, spätného pretlačovania a následného dokončovacieho trieskového obrábania. Predlisovanie zabezpečí vhodné vstupné rozmery klátika pre spätné pretlačovanie a vytvorí zahĺbenie na čelách, čo zlepší podmienky pre mazanie a vytvorí stredenie pre prietlačník.

U každého technologického postupu boli vypočítané geometrické rozmery polotovaru či predlisku na základe predom zvoleného lisovaného priemeru, a na základe zákona zachovania objemu. Taktiež boli vypočítané dosiahnuté logaritmické pretvorenia v jednotlivých oblastiach prietlačku. Technologický postup č. 2 bol navrhnutý za účelom optimalizovať postup č. 1 a zvoliť tak vhodnejší typ delenia polotovaru, čo viedlo k voľbe delenia polotovaru rezaním pílou miesto strihania. Rovnako aj navrhnutý technologický postup č. 3 vychádza z postupu č. 2 a jeho účelom je predošlý postup optimalizovať tak, aby nedošlo k prekročeniu kritickej logaritmickkej deformácie φ_{krit} .

Tab. 5 Porovnanie navrhnutých technologických postupov.

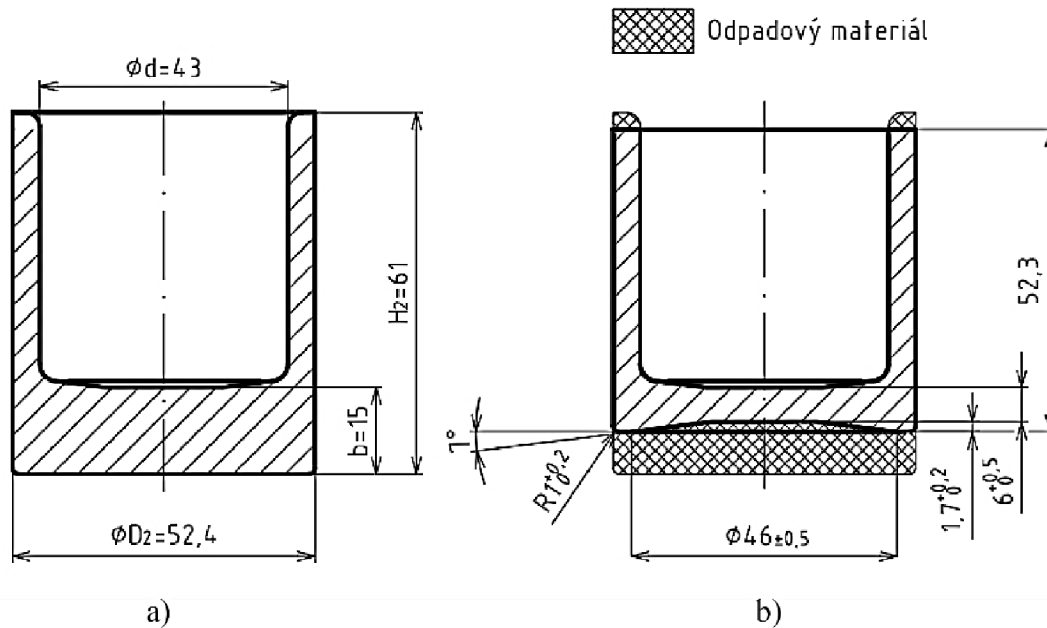
Navrhnutý technologický postup	Počet operácií	Spôsob delenia polotovaru	Objem polotovaru so zreteľom na odpad V_{pol} [mm ³]	Celkové dosiahnuté pretvorenie φ_3 [-]	Kritické pretvorenie φ_{krit} [-]
Technologický postupu č. 1	3	Strihanie	53 295	8,5389	1,63
Technologický postupu č. 2	3	Rezanie	60 908	8,5389	1,63
Technologický postupu č. 3	3	Rezanie	79 002	1,5561	1,63

Technologické postupy č.1 a č.2 sa líšia v spôsobe delenia polotovaru a objemom vzniknutého odpadu, pričom dosiahnuté celkové pretvorenie a spevnenie materiálu je v oboch prípadoch rovnaké, a teda aj dosiahnuté mechanické vlastnosti výliskov by boli rovnaké. V prípade navrhnutého postupu č.1 je objem polotovaru so zreteľom na vzniknutý odpad $V_{pol}(\text{strihanie})$ najmenší a preto je najvhodnejšou možnosťou z hľadiska spotreby materiálu. Avšak u technologického postupu č.1 nevyhovuje vypočítaná dĺžka strihaného klátika H_0 . Dĺžka klátika je pri strihaní obmedzená vzťahom $H_0 \geq 0,6D_0$, ktorý však v navrhnutom postupe č.1 neplatí. Preto je nutné zmeniť zvolený priemer strihaného klátika D_0 a tak doceliť aj vhodnú dĺžku klátika pre strihanie, čo by však viedlo k navýšeniu počtu potrebných operácií na 4, pretože by bola potrebná ďalšia tvárniaca operácia po kalibrovaní – ubíjanie, čo by viedlo taktiež k zvýšeniu stupňa pretvorenia a tým by bolo nutné zaradiť medzioperačné žihanie.

Pri navrhnutých technologických postupoch č. 1 a č. 2 hodnota celkového dosiahnutého pretvorenia φ_3 prekročila hodnotu kritického pretvorenia φ_{krit} . To by v praxi znamenalo výrobu nevhodných súčastí, alebo ďalšie zaradenie operácie žihania a povrchovej úpravy pred operáciou spätného pretlačovania, čím by sa zvýšili náklady na výrobu. Preto je navrhnutý technologický postup č. 1 a č. 2 nevhodný a neprípustný.

Technologický postup č. 3 je upravený tak, aby nedošlo k prekročeniu kritickej hodnoty pretvorenia. Toto zamedzenie bolo dosiahnuté zmenou tvaru a rozmerov konečného prietlačku a to tak, že sa zväčšila hrúbka dna kalíšku b , a tým nedôjde k vzniku neprípustných logaritmických deformácií.

Navrhnutý technologický postup č. 3 je z navrhnutých postupov jediný vhodný a iba v tomto zo všetkých navrhnutých postupov nedôjde k vyčerpaniu plasticity počas spätného pretlačovania. Nevýhodou tohoto postupu je však väčšia spotreba materiálu a potreba zaradiť trieskové obrábanie na zarovnanie čela a na obrobenie dna kalíšku na žiadané rozmery. Na obrázku 45 je znázornený tvar a rozmery súčiastky po tvárnení a po dokončovacom obrábaní. Aj napriek týmto nevýhodám je tento navrhnutý technologický postup zvolený, pretože je neprípustné vyrábať nevhodné súčiastky, ktoré by boli vyrábané v postupoch č. 1 a č. 2 s prekročením kritického pretvorenia φ_{krit} . Pre technologický postup č. 3 budú ďalej navrhnuté nástroje a bude zvolený stroj.



Obr. 45 Finálne obrobenie súčiastky: a) súčiastka pred obrobením, b) súčiastka po obrobení.

3.2 Výpočet priebehu napätia, pretvárnej sily a práce

Pre stanovenie potrebnej pretvárnej sily a práce je potrebné zistiť priebeh napätia. Zo zisteného priebehu napätia taktiež bude rozhodnuté, či je potrebné zapúzdrenie jednou, alebo dvoma objímkami, alebo nie je potreba žiadnej objímky. Pre výpočet pôsobiacich napätí budú použité modely:

- Materiálový model:

- Oceľ 12 010.3,
- $f_1 = 0,05$ (volené hodnota pre kvalitné mazanie),
- $f_2 = 0,5$,
- $T = 21 \text{ }^\circ\text{C}$,
- Aproximačná krivka spevnenia vyjadrená polynómom 5. stupňa [20]:

$$\sigma_p = 362,87\varphi^5 - 1846,26\varphi^4 + 3650,17\varphi^3 - 3451,24\varphi^2 + 1792,11\varphi + 236,75. \quad (3.2)$$

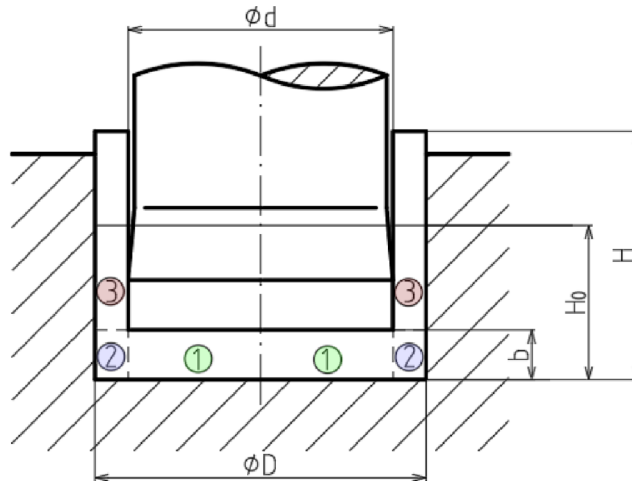
- Aproximačná krivka mernej pretvárnej práce vyjadrená polytrópou [20]:

$$A_j = 0,37\varphi^{1,4662} + 0,22\varphi. \quad (3.3)$$

- Geometrický model (obr. 46):

- $H_0 = 31 \text{ mm}$,
- $\phi D_0 = 52 \text{ mm}$,
- $H = 61 \text{ mm}$,
- $\phi D = 52,4 \text{ mm}$,
- $\phi d = 43 \text{ mm}$,
- $b = 15 \text{ mm}$.

- Matematický model – znázornený na obrázku 47 a obrázku 48



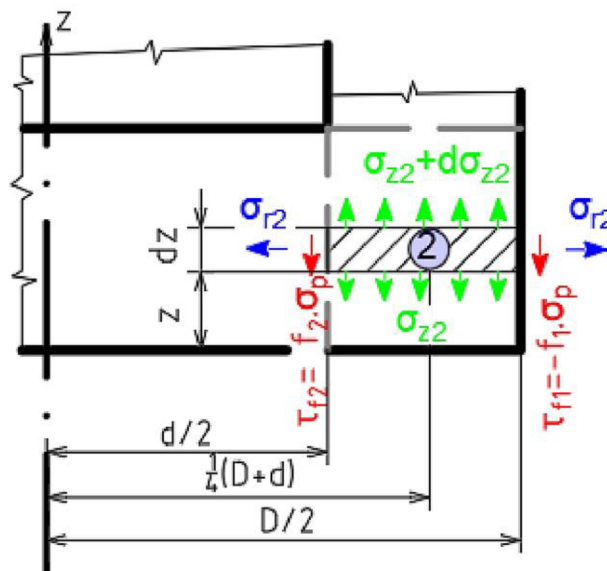
Obr. 46 Geometrický model spätného pretlačovania rozdelený na oblasti 1,2 a 3 [5].

Výpočet celkového prirodzeného pretvárneho odporu v oblasti 3 podľa materiálového modelu zo vzťahu (3.2):

$$\begin{aligned}\sigma_{pc} &= 362,87\varphi^5 - 1846,26\varphi^4 + 3650,17\varphi^3 - 3451,24\varphi^2 + 1792,11\varphi + 236,75 = \\ &= 362,87 \cdot 1,5561^5 - 1846,26 \cdot 1,5561^4 + 3650,17 \cdot 1,5561^3 \\ &\quad - 3451,24 \cdot 1,5561^2 + 1792,11 \cdot 1,5561 + 236,75 = 907,83.\end{aligned}$$

Výpočet prirodzeného pretvárneho odporu v oblasti 1 podľa materiálového modelu zo vzťahu (3.2) pre vypočítanú hodnotu $\varphi_1 = 0,7259$:

$$\begin{aligned}\sigma_{p1} &= 362,87\varphi^5 - 1846,26\varphi^4 + 3650,17\varphi^3 - 3451,24\varphi^2 + 1792,11\varphi + 236,75 = \\ &= 362,87 \cdot 0,7259^5 - 1846,26 \cdot 0,7259^4 + 3650,17 \cdot 0,7259^3 \\ &\quad - 3451,24 \cdot 0,7259^2 + 1792,11 \cdot 0,7259 + 236,75 = 675,7845.\end{aligned}$$



Obr. 47 Matematický model oblasti 2 [5].

Výpočet osového napätia v oblasti 2 pre $z = b$ podľa vzťahu (2.21):

$$\sigma_{z2} = -\frac{4f_{2str}}{D-d}(b-z) \cdot \sigma_p = -\frac{4 \cdot 0,275}{52,4-43}(15-15) \cdot 907,83 = 0.$$

Výpočet osového napätia v oblasti 2 pre $z = 0$ podľa vzťahu (2.21):

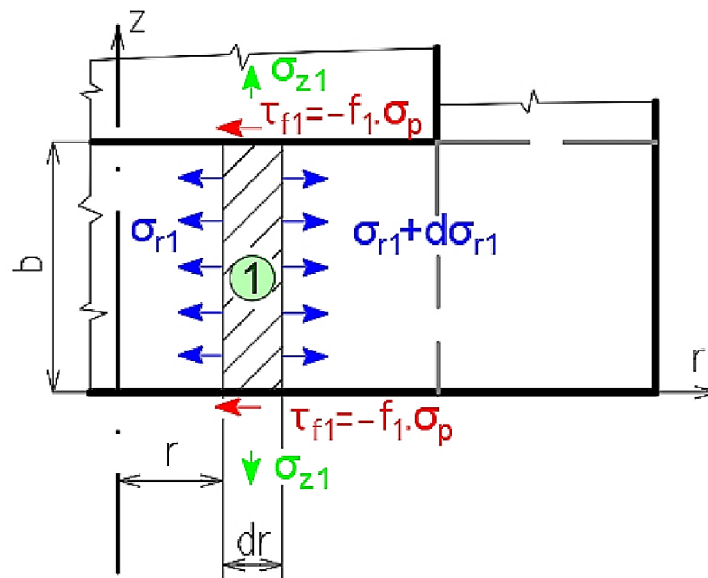
$$\sigma_{z2} = -\frac{4f_{2str}}{D-d}(b-z) \cdot \sigma_p = -\frac{4 \cdot 0,275}{52,4-43}(15-0) \cdot 907,83 = -1593,53.$$

Výpočet radiálneho napätia v oblasti 2 pre $z = b$ podľa vzťahu (2.22):

$$\begin{aligned} \sigma_{r2} &= -\left[\frac{4f_{2str}}{D-d}(b-z)+1\right] \cdot \sigma_p = \\ &= -\left[\frac{4 \cdot 0,275}{52,4-43}(15-15)+1\right] \cdot 675,7845 = -907,8302. \end{aligned}$$

Výpočet radiálneho napätia v oblasti 2 pre $z = 0$ podľa vzťahu (2.22):

$$\begin{aligned} \sigma_{r2} &= -\left[\frac{4f_{2str}}{D-d}(b-z)+1\right] \cdot \sigma_p = -\left[\frac{4 \cdot 0,275}{52,4-43}(15-0)+1\right] \cdot 675,7845 = \\ &= -1862,0019. \end{aligned}$$



Obr. 48 Matematický model oblasti 1 [5].

Stredná hodnota radiálneho napätia v oblasti 2 potrebná pre výpočet radiálneho napätia v oblasti 1 sa vypočíta zo vzťahu:

$$\begin{aligned} \sigma_{r2str} &= -\left(\frac{2f_{2str} \cdot b}{D-d}+1\right) \cdot \sigma_{z2str} = \\ &= -\left(\frac{2 \cdot 0,275 \cdot 15}{52,4-43}+1\right) \cdot 696,5604 = 1490,2172. \end{aligned} \tag{3.4}$$

Výpočet radiálního napětia v oblasti 1 pre $r = d/2$ podľa vzťahu (2.24):

$$\begin{aligned}\sigma_{r1} &= -\frac{2f_1}{b} \left(\frac{d}{2} - r \right) \cdot \sigma_{p1} + \sigma_{r2str} = \\ &= -\frac{2 \cdot 0,05}{15} \left(\frac{43}{2} - \frac{43}{2} \right) \cdot 675,7845 - 1490,2172 = -1490,2172.\end{aligned}$$

Výpočet radiálního napětia v oblasti 1 pre $r = 0$ podľa vzťahu (2.24):

$$\begin{aligned}\sigma_{r1} &= -\frac{2f_1}{b} \left(\frac{d}{2} - r \right) \cdot \sigma_{p1} + \sigma_{r2str} = \\ &= -\frac{2 \cdot 0,05}{15} \left(\frac{43}{2} - 0 \right) \cdot 675,7845 - 1490,2172 = -1587,0796.\end{aligned}$$

Výpočet osového napětia v oblasti 1 pre $r = d/2$ podľa vzťahu (2.25):

$$\begin{aligned}\sigma_{z1} &= -\left[\frac{2f_1}{b} \left(\frac{d}{2} - r \right) + 1 \right] \cdot \sigma_{p1} + \sigma_{r2str} = \\ &= -\left[\frac{2 \cdot 0,05}{15} \left(\frac{43}{2} - \frac{43}{2} \right) + 1 \right] \cdot 675,7845 - 1490,2172 = -2166,001.\end{aligned}$$

Výpočet osového napětia v oblasti 1 pre $r = 0$ podľa vzťahu (2.25):

$$\begin{aligned}\sigma_{z1} &= -\left[\frac{2f_1}{b} \left(\frac{d}{2} - r \right) + 1 \right] \cdot \sigma_{p1} + \sigma_{r2str} = \\ &= -\left[\frac{2 \cdot 0,05}{15} \left(\frac{43}{2} - 0 \right) + 1 \right] \cdot 675,7845 - 1490,2172 = \\ &= -2262,8641.\end{aligned}$$

Kontrola predpokladu pre použitie metódy podľa Dippera podľa vzťahu (2.10):

$$\varepsilon_S = \frac{S}{S_0} \cdot 100 = \frac{d^2}{D_0^2} \cdot 100 = \frac{43^2}{52,4^2} \cdot 100 = 67,34 \rightarrow 67,34 \geq 50.$$

Výpočet hodnoty mernej pretvárnej práce v oblasti 3 pomocou materiálového modelu charakterizovaného vzťahom (3.3):

$$\begin{aligned}A_{j3} &= 0,37\varphi^{1,4662} + 0,22\varphi = 0,37\varphi_3^{1,4662} + 0,22\varphi_3 = \\ &= 0,37 \cdot 1,55613^{1,4662} + 0,22 \cdot 1,55613 = 1,0499.\end{aligned}$$

Výpočet hodnoty mernej pretvárnej práce v oblasti 3 pomocou materiálového modelu charakterizovaného vzťahom (3.3):

$$\begin{aligned}A_{j1} &= 0,37\varphi^{1,4662} + 0,22\varphi = 0,37\varphi_1^{1,4662} + 0,22\varphi_1 = \\ &= 0,37 \cdot 0,72594^{1,4662} + 0,22 \cdot 0,72594 = 0,3910.\end{aligned}$$

Výpočet strednej hodnoty prirodzeného pretvárneho odporu v oblasti 2 podľa vzťahu (2.27):

$$\sigma_{p2str} = \frac{A_{j3} - A_{j1}}{\varphi_2} \cdot 1000 = \frac{1,0499 - 0,3910}{0,8302} \cdot 1000 = 793,6567.$$

Výpočet deformačného odporu podľa vzťahu Dippera (2.27):

$$\begin{aligned} \sigma_d = -\sigma_{z1str} &= \sigma_{p1} \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f_1 \cdot d}{b} \right) + \sigma_{p2str} \left(1 + \frac{2f_{2str}}{D-d} \cdot b \right) = \\ &= 675,7845 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,05 \cdot 43}{15} \right) + 793,6567 \left(1 + \frac{2 \cdot 0,275}{52,4 - 43} \cdot 15 \right) = \\ &= 2198,2891. \end{aligned}$$

kde: f_{2str} - Vypočítané podľa vzťahu (2.18):

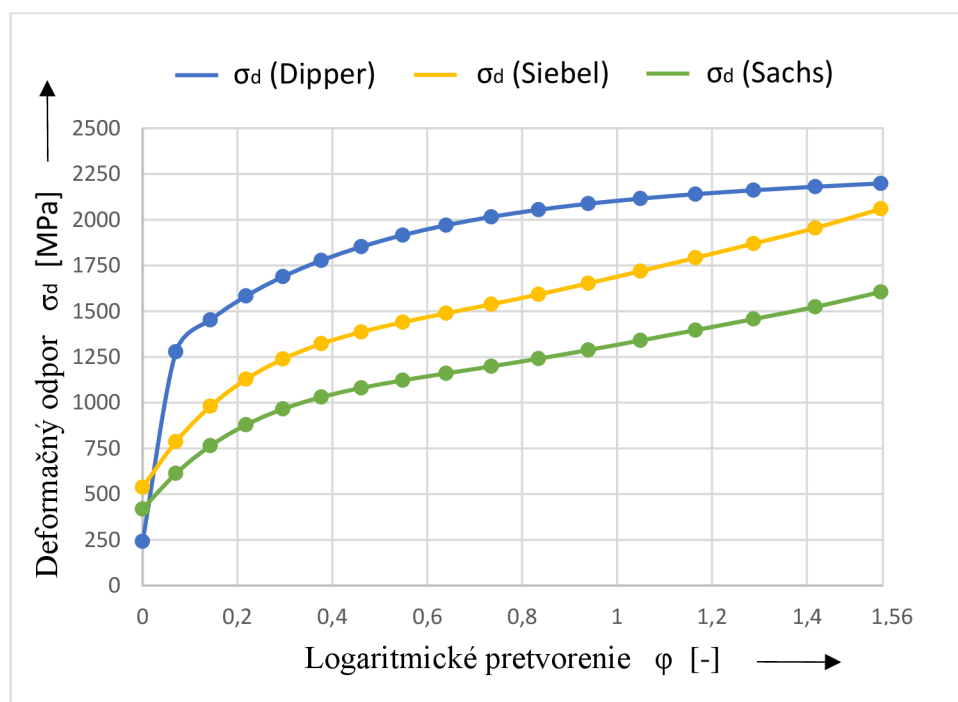
$$f_{2str} = \frac{f_1 + f_2}{2} = \frac{0,05 + 0,5}{2} = 0,275.$$

Výpočet deformačného odporu podľa vzťahu Sachsa (2.28):

$$\begin{aligned} \sigma_{d(Sachs)} = -\sigma_{zmax} &= 1,58 \cdot \sigma_{pc} \cdot \ln \frac{D^2}{D^2 - d^2} = 1,58 \cdot 907,83 \cdot \ln \frac{52,4^2}{52,4^2 - 43^2} = \\ &= 1605,0976. \end{aligned}$$

Výpočet deformačného odporu podľa vzťahu Siebela (2.29):

$$\begin{aligned} \sigma_{d(Siebel)} &= 1,152 \cdot \sigma_{pc} \frac{D^2}{d^2} \cdot \left(\log \frac{D^2}{D^2 - d^2} + \frac{D^2}{D^2 - d^2} \cdot \log \frac{D^2}{d^2} + \log \frac{d^2}{D^2 - d^2} \right) = \\ &= 1,152 \cdot 907,83 \frac{52,4^2}{43^2} \left(\log \frac{52,4^2}{52,4^2 - 43^2} + \frac{52,4^2}{52,4^2 - 43^2} \cdot \log \frac{52,4^2}{43^2} + \log \frac{43^2}{52,4^2 - 43^2} \right) \\ &= 2059,4064. \end{aligned}$$



Obr. 49 Porovnanie priebehu deformačných odporov získaných rôznymi metódami v závislosti na logaritmickej pretvoreni.

Na obrázku 49 je vyobrazené porovnanie vypočítaných deformačných odporov rôznymi metódami. Pre výpočet pretvárnej sily je použitý deformačný odpor vypočítaný podľa vzťahu (2.27), pretože dosahuje najväčšiu hodnotu. Potrebná pretvárná sila vypočítaná podľa vzťahu (2.30) teda je:

$$F_{tvárniaca} = \sigma_d \cdot S = 2198,2891 \cdot \frac{\pi \cdot 43^2}{4} = 3\,192\,358,078 \text{ N}.$$

Výpočet potrebnej pretvárnej práce:

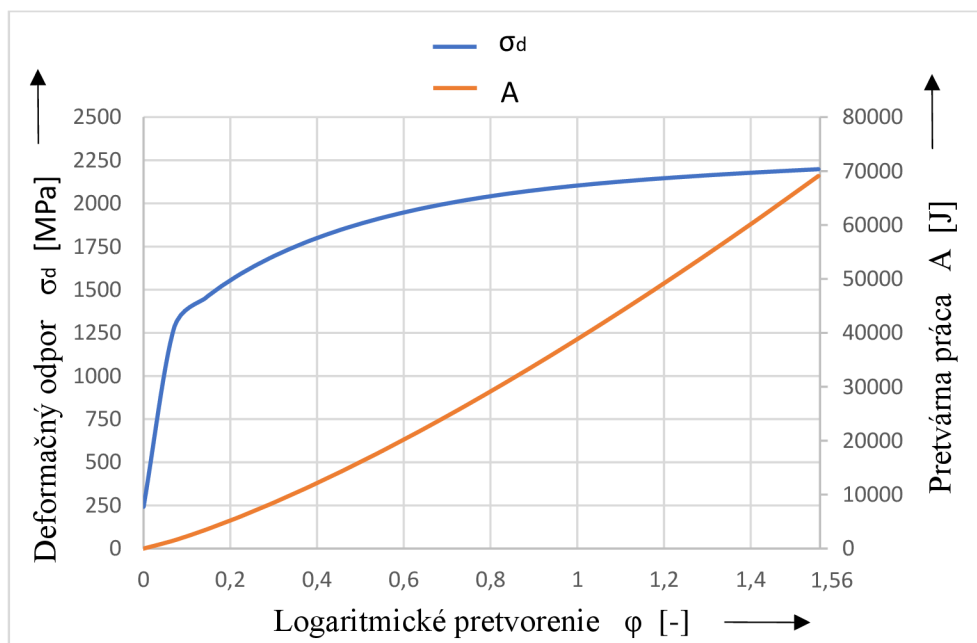
- pomocou tvárniacej sily podľa vzťahu (2.31):

$$\begin{aligned} A &= F_{tvárniaca} \cdot z_n = F_{tvárniaca} \cdot (H_0 - b) = \\ &= 3\,192\,358,078 \cdot (0,031 - 0,015) = 51077,72925. \end{aligned}$$

- pomocou mernej pretvárnej práce materiálového modelu zo vzťahu (2.32):

$$A = A_j \cdot V = 1,0499 \cdot 65\,802,155 = 69\,085,6825.$$

Proces vývoja osového a radiálneho napätia je znázornený v prílohe 4. Priebeh použitého deformačného odporu σ_d a potrebnej pretvárnej práce A v závislosti na logaritmickej deformácii je vyobrazený na obr. 50. Počas tvárnenia dôjde k takmer maximálnemu využitiu plasticity a spevneniu materiálu. Pre výpočet potrebnej pretvárnej práce bol použitý výpočet pomocou vzťahu (2.31) a (2.32), kde je možné vidieť, že skutočná práca získaná pomocou tvárniacej sily dosahuje nižšie hodnoty ako práca získaná pomocou aproximovanej krivky mernej pretvárnej práce a objemu výlisku. Preto naďalej pri návrhu stroja sa bude uvažovať s vyššou hodnotou pretvárnej práce $A = 69\,085 \text{ J}$.



Obr. 50 Priebeh deformačného odporu a pretvárnej práce na logaritmickom pretvorení.

3.3 Vol'ba stroja a návrh nástroja

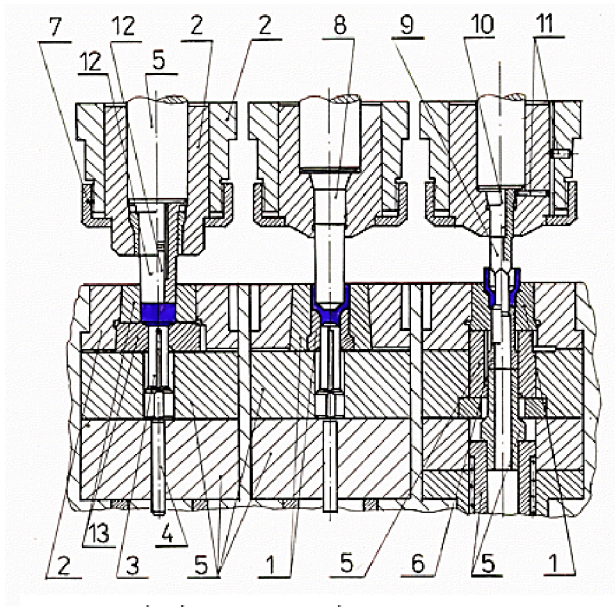
Pre zhotovenie súčiastky je potrebné zvoliť stroj, ktorého menovitá sila musí byť väčšia ako sila vypočítaná $F_{tvárniaca}$. To znamená že je potrebné zvoliť stroj s menovitou silou väčšou ako 3192 kN. Pre výrobu je preto uvažovaný postupový automat TPD 630 zhotovený firmou

Šmeral Brno a.s., ktorého technické údaje sú v tabuľke 6 a hydraulický lis INWORK 700, ktorého technické údaje sú v tabuľke 7. [46; 47]

Uvažovaný trojpostupový automat TPD 630 je vhodný pre objemové tvárnenie väčších strojných súčastí, u ktorých je možné pracovný postup zložiť z ubíjania, pretlačovania a prestrihovania. Postupový nástroj pre daný tvárniaci automat je znázornený na obr. 51. Pre zhotovenie danej súčiastky sú postačujúce len dve tvárniace operácie (ubíjanie a pretlačovanie), preto nástroje prestrihovania nebudú použité. Nevýhodou stroja je maximálny možný priemer a rozstup lisovnic. V prípade, že výpočty pri navrhovaní nástroja dokážu, že rozmery objímky a lisovnice nebudú spĺňať toto zástavbové kritérium stroja, nebude môcť byť stroj použitý. [46]

Tab. 6 Technické údaje postupového automatu TPD 630 [46].

Technické údaje	TPD 630
Menovitá sila	6178 kN
Zdvih barana lisu	150 mm
Najväčší priemer polotovaru	50 mm
Najväčšia dĺžka polotovaru	60 mm
Počet výliskov	40 ks · min ⁻¹
Počet lisovnic	3 ks
Priemer lisovnic	170 mm
Rozstup lisovnic	180 mm
Rozmery stroja	
Dĺžka	2500 mm
Šírka	2500 mm
Výška nad podlahou	4100 mm
Hmotnosť	35000 kg



- 1- PRIETAČNICA, 2- OBJÍMKA, 3- VYHADZOVAČ,
 4- VYHADZOVAČÍ KOLÍK, 5- PODLOŽKA, 6- STRIŽNICA,
 7- UPEVNŔOVACIA MATICA, 8- PRIETLAČNÍK, 9- STRIŽNÍK,
 10- VYHADZOVAČÍ KOLÍK, 11- ŠRÚB PRE FIXÁCIU POLOHY,
 12- LISOVNÍK, 13- LISOVNICA

Obr. 51 Postupový nástroj pre tvárniaci automat TPD 630 [46].

Ďalším uvažovaným strojom je hydraulický lis INWORK 700 od českej firmy Invera s.r.o. (obr. 52). INWORK 700 je štvorstĺpový vertikálny univerzálny lis vhodný pre výlisky lisované za studena. Jeho pracovný stôl je vyrobený z masívnej oceľoliatiny a je opatrený T-drážkami pre upnutie foriem. Vyrážanie výliskov zabezpečuje centrálny hydraulický vyrážač. Lis je možné vybaviť manipulačnou technikou – 6 osovými robotmi (obr. 53). [47; 48]



Obr. 52 Hydraulický lis INWORK 700 [48].



Obr. 53 Robotický manipolátor [48].

Tab. 7 Technické údaje hydraulického lisu INWORK 700 [47; 48].

Technické údaje	INWORK 700
Menovitá sila	7000 kN
Max. zdvih	760 mm
Rozmer upínacích dosiek	1200x1200 mm
Zdvih vyrážača	180 mm
Max. sila vyrážača	150 kN
Rozmery stroja	
Dĺžka	2800 mm
Šírka	2000 mm
Výška	3450 mm
Hmotnosť	14000 kg

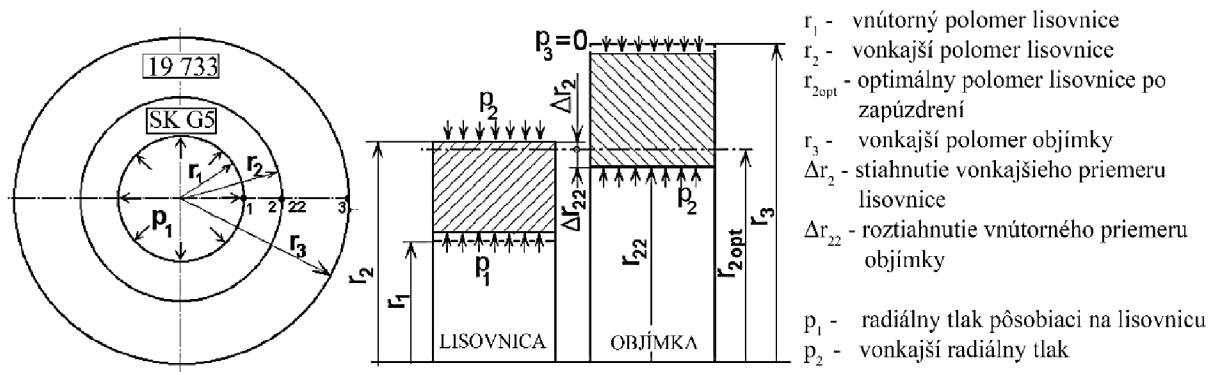
Zvoleným strojom pre výrobu súčiastky je hydraulický lis INWOROK 700 aj napriek vyšším výrobným časom oproti postupovému automatu a nevýhode, že je potrebné zhotovovať jednúčelové nástrojové sady pre predlisovanie a spätné pretlačovanie. Dôvodom použitia hydraulického lisu je, že uvažovaný trojpostupový automat TPD 630 po vykonaných výpočtoch nevyhovuje výrobe danej súčiastky. Príčinou toho je, že výpočty zapuzdrenia lisovnice ukázali, že maximálny priemer lisovnic stroja 170 mm nie je dostatočným rozmerom pre správnu funkčnosť objímky a lisovnice. Výpočty pôsobiacich tlakov na prietlačnicu a maximálneho dovoleného radiálneho tlaku pôsobiaceho na prietlačnicu pre zástavbové kritérium stroja TPD 630 sú v prílohe 6 a v prílohe 4. Keďže hydraulický lis INWORK 700 nemá obdobné zástavbové kritérium a vyhovuje ostatným požiadavkám je zvoleným strojom. [47; 48; 49]

Návrh konštrukcie prietlačnice sa riadi normou ČSN 22 7005, pričom väčšina geometrie prietlačnice je daná rozmermi prietlačku a vonkajší priemer je určený výpočtom. Doporučená geometria je uvedená v prílohe 9. Ako materiál pre prietlačnicu je podľa prílohy 3 zvolený spekaný karbid G5 a jako materiál objímky je oceľ 19 733. Aj keď investícia na zhotovenie prietlačnice zo spekaného karbidu bude väčšia, pri správnom zaobchádzaní zaručí vyššiu hospodárnosť pri hromadnej výrobe. [40]

Pomocou výpočtového programu OPTIM97 v závislosti na vnútornom tlaku, materiálu nástroja a jeho tepelnom spracovaní, sú optimalizované rozmery prietlačnice a objímky pre správne zapúzdrenie za tepla tak, aby pôsobiace radiálne napätie **sigmar** nepresiahlo maximálne dovolené napätie na lisovnici po zalisovaní. Program OPTIM97 využíva metódu MPIN – metódu maximálne prípustných intenzít napätí súčasne na lisovnici a na objímke. Využíva ich dovolené namáhanie, pričom rešpektuje konštrukčne zvolené polomery r_1 a r_3 . Vstupné údaje materiálu použité pre výpočet sú v tabuľke 8. Použité diagramy tepelnej rozťažnosti použitých materiálov sú v prílohe 5. [49]

Tab. 8 Vlastnosti materiálu použitého pre návrh prietlačnice a objímky [49].

Prietlačnica – spekaný karbid G5									
T_{kal} [°C]	T_{pop} [°C]	HRC	E [MPa]	μ [-]	R_m [MPa]	R_d [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	σ_{dov} [MPa]	α [K ⁻¹]
–	–	82,5	460000	0,26	1130	3140	0	850	$7 \cdot 10^{-6}$
Objímka – oceľ 19 733									
T_{kal} [°C]	T_{pop} [°C]	HRC	E [MPa]	μ [-]	R_m [MPa]	R_d [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	σ_{dov} [MPa]	α [K ⁻¹]
920	590	49	206000	0,30	1790	–	1670	1625	$136 \cdot 10^{-7}$



Obr. 54 Geometrický model lisovnice a objímky [49].

Tab. 9 Vstupné údaje geometrie lisovnice a objímky.

Vnútorný polomer lisovnice r_1	26,2 mm
Vonkajší polomer objímky r_3	162,4 mm

Vonkajší priemer objímky pre uvažovaný hydraulický lis INWORK 700 nie je obmedzený rozmermi stroja, preto priemer objímky r_3 je možné voliť tak, aby vyhovoval potrebám správneho zapúzdrenia lisovnice. Vstupné údaje geometrie sú v tabuľke 9. Geometrický model lisovnice a objímky je znázornený na obrázku 54. Vlastnosti materiálov zvolených pre konštrukciu objímky a prietlačnice sú v tabuľke 8. [40; 49]

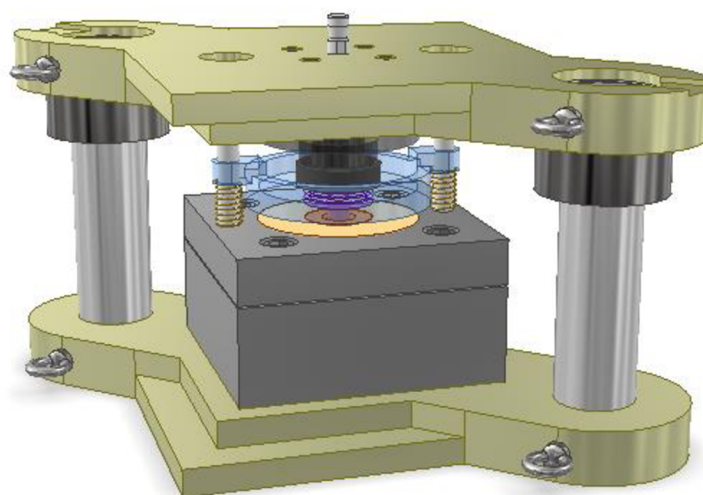
Výsledkom optimalizácie lisovnice je zistený potrebný vonkajší polomer lisovnice r_2 , maximálny dovolený tlak p_1 , a teplota objímky T_1 a lisovnice T_2 potrebná pre zapúzdrenie. Spomenuté výsledky a porovnanie hodnôt dovoleného a pôsobiaceho tlaku sú v tabuľke 10. Ďalšie vypočítané hodnoty a celý výpočtový protokol z použitého programu OPTIM97 je v prílohe 7. [49]

Tab. 10 Výsledky optimalizácie rozmerov lisovnice a objímky.

Vonkajší polomer lisovnice r_2	Teplota potrebná k ohrevu objímky T_1	Teplota potrebná k podchladeniu objímky T_2	Maximálny dovolený tlak p_1	Tlak posobiaci na stenu lisovnice σ_{r2str}
64,7 mm	580°C	-52,1 °C	1562,75 MPa	1490 MPa

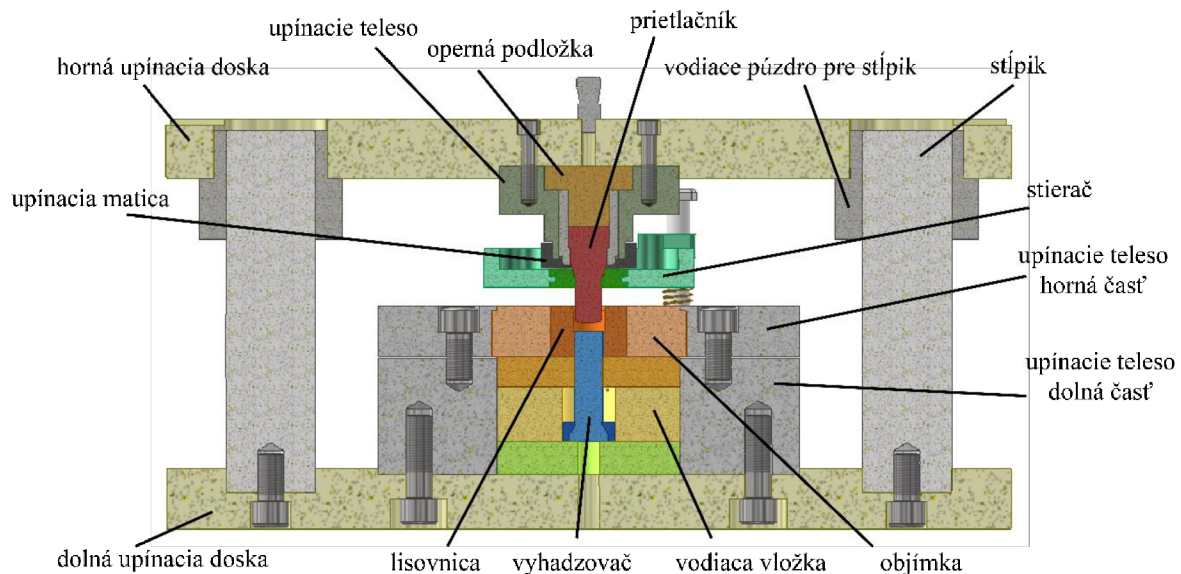
Prietlačník je obdobne ako prietlačnica navrhnutý podľa normy ČSN 22 7005. Ako materiál je použitá oceľ 19 820, kalená a popustená na 60 HRC. Vrstevnicový popúšťací diagram použitého materiálu je zobrazený v prílohe 10. Materiál je doporučený pre prietlačnicu zhotovenú zo spékaného karbidu. Konštrukčné a tvarové prevedenie prietlačníka je určené tvarom prietlačku a empirickými vzťahmi, ktoré su uvedené v prílohe 9. [40; 50]

Keďže pre zhotovenie súčiastky sú potrebné dve tvárniace operácie a to predlisovanie a spätné pretlačenie, je potreba zhotoviť dve sady nástrojov. Prvá nástrojová sada má za úlohu predlisovať odrezaný polotovar a vytvoriť zahĺbenia na čelách klátika pre zvýšenie kvality mazania a lepšie dosadnutie čela prietlačníka pri spätnom pretlačovaní. Druhá nástrojová sada je určená pre spätné pretlačenie. Jednooperačné pretlačovadlo v zovretom stave je zobrazené na obrázku 55.



Obr. 55 Jednooperačný nástroj spätného pretlačovania v uzavretom stave.

Základové dosky jednooperačného pretlačovadla sú upevnené do lisu pomocou stopky a pomocou úpiniek. Keďže nástroj je relatívne rozmerný a ťažký, k manipulácii slúžia závesné oká, ktoré uľahčia pohyb. Pohyb polotovaru zabezpečuje manipulátor, ktorým je lis vybavený. Klátik je najprv vložený do lisovnice a po zovretí lisu je výlisok z lisovnice vyvedený vyhadzovačom a následne stieračom, ktorý zotrie výlisok z pretlačovadla. Lisovnica a objímka je zafixovaná tak, aby nedošlo k deštrukcii tvaru a funkcii objímky a to radiálne a axiálne, pomocou horného a dolného upínacieho telesa šrúbovými spojmi. Prietlačník je vložený do objímky a upevnený pomocou upevňovacej matice k upínaciemu telesu a následne k hornej upínacej doske. Aby nedošlo k vybočeniu prietlačníka a kvôli správne centruvaniu je nástroj vybavený vodiacimi stĺpkami, ktoré sú upevnené šrúbovým spojom k dolnej upínacej doske a pohybujú sa vo vodiacom púzdre zalisovanom v hornej upínacej doske. Rez nástrojom je zobrazený na obrázku 56.



Obr. 56 Jednooperačný nástroj spätného pretlačovanie v reze.

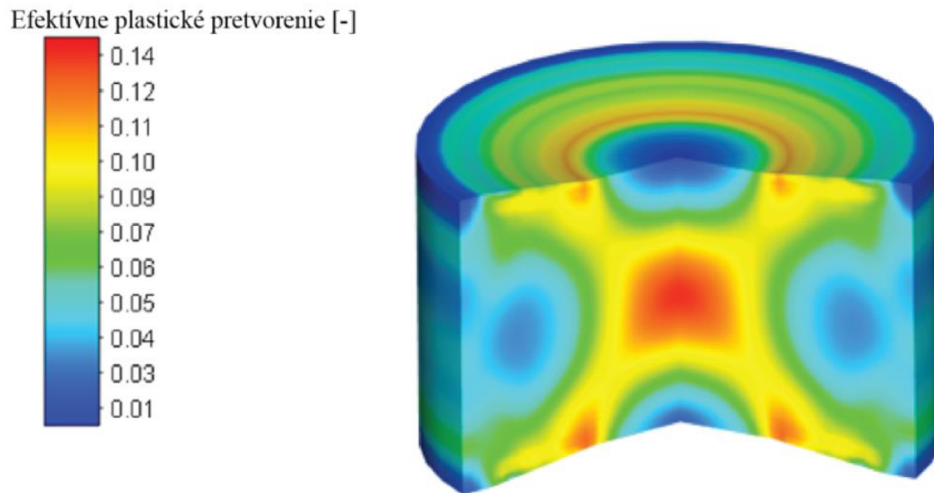
3.4 Simulácia tvárniacich procesov

Vyrobiteľnosť a správnosť vypočítaných výsledkov je možné overiť pomocou simulačného programu. Ako program bol použitý Simufact Forming, ktorý využíva metódu konečných prvkov [51]. Pred simuláciou je potrebné zvoliť správne vstupné parametre, ktoré sa čo najbližšie podobajú reálnym podmienkam.

Keďže použitý program neobsahuje materiálový model oceli 14 010.3, bol vytvorený pomocou aproximovaných niekoľkých hodnôt prirodzeného pretvárneho odporu získaných pomocou polynómu 5. stupňa z materiálovej skúšky v tlaku. Bližšie informácie o materiálovom modeli sú v prílohe 1 [20]. Geometria vložená do programu je zobrazená v prílohe 11. Ďalšie vstupné parametre sú v tabuľke 11.

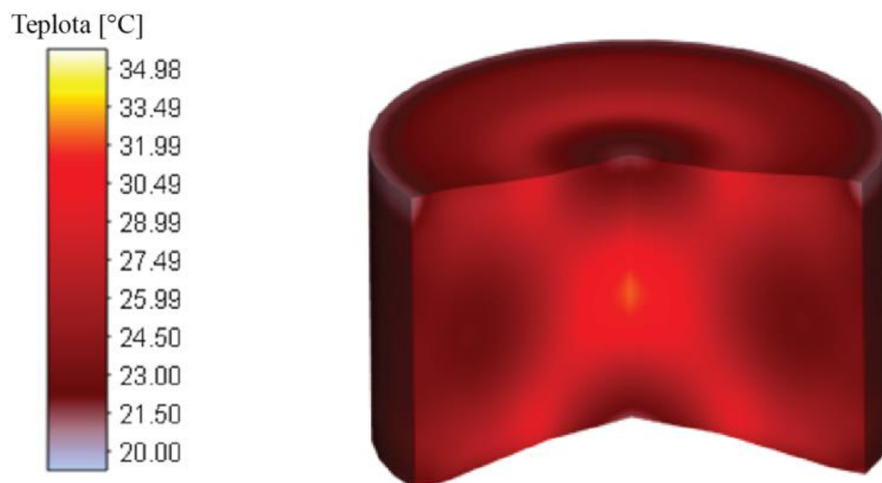
Tab. 11 Vstupné údaje pre simuláciu v programe Simufact Forming.

Priemerná rýchlosť barana	0,2 [m · s ⁻¹]
Koeficient trenia	0,05 [-]
Teplota	20 [°C]



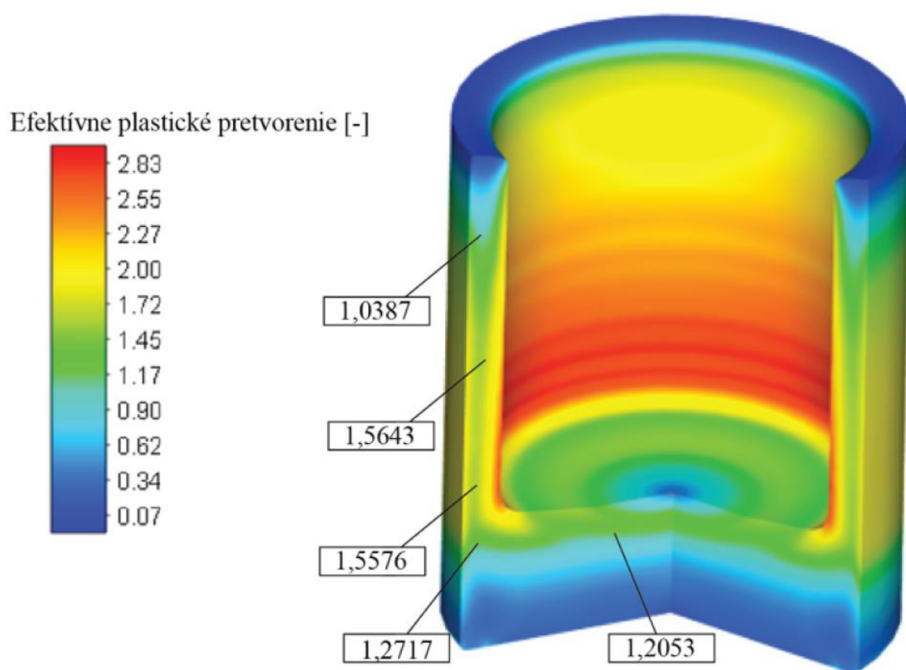
Obr. 57 Efektívne plastické pretvorenie po 1. operácií.

Zo simulácie zobrazenej na obr. 57 je možné pozorovať, že počas 1. operácie (predlisovanie) dôjde len k veľmi malému pretvoreniu, čo znamená, že sa minimálne vyčerpá plasticita, ktorá je potrebná v 2. operácii. Teplota vylisku sa významne nezvýši (obr. 58). Výsledné fyzikálne vlastnosti a geometria vylisku z 1. operácie sú použité ako vstupné parametre pre simuláciu 2. operácie.

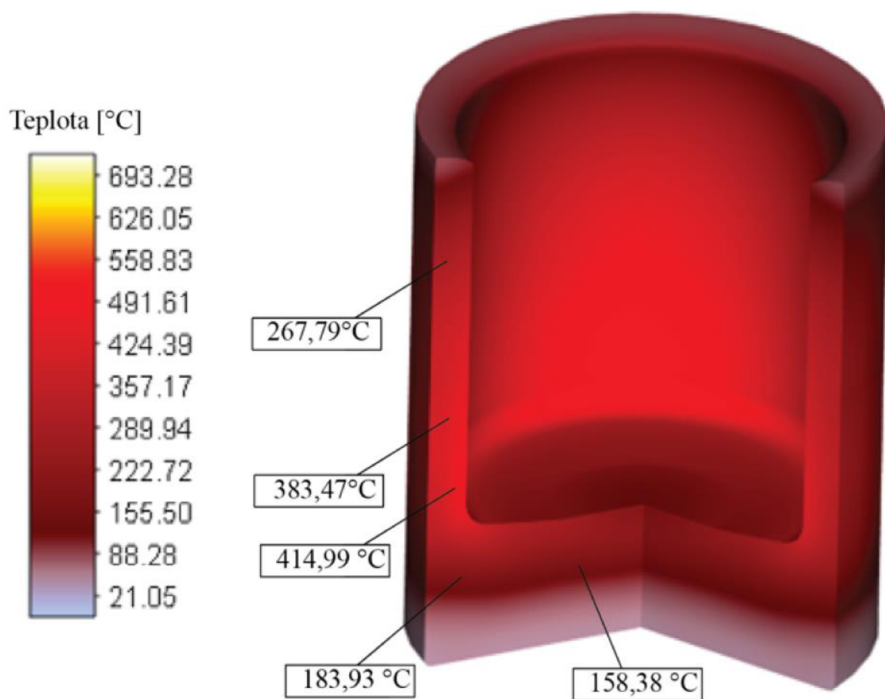


Obr. 58 Teplota materiálu po 1. operácií.

Zo simulácie 2. operácie (spätne pretlačovanie) je možné vidieť, že efektívne pretvorenie dosahuje hodnôt v oblasti steny približne podobných, ako boli zistené analytickým výpočtom (obr. 59). Hodnoty efektívneho pretvorenia v oblasti steny sa pohybujú v intervale 1 až 1,7. Najvyššie hodnoty pretvorenia sa dosahujú na vnútornej strane steny pri zaoblení hrany, pretože tu dochádza k najväčšiemu brzdeniu toku materiálu. Teplota vylisku dosahuje najvyššie teploty okolo 415 °C (obr. 60). Pri týchto teplotách nedôjde k rekryštalizácii materiálu a materiál ostane v celom pretvorenom objeme spevnený. Potrebná tvárniaca sila zistená simulačným programom je 3 783 kN. Hodnota sa od analyticky vypočítanej tvárniacej sily líši rozdielom 600 kN. Dôvodom rozdielnych hodnôt tvárniacich síl sú odlišné vstupné parametre (aproximovaná krivka spevnenia, priemerná rýchlosť barana) a spôsob výpočtu deformačného odporu. Pribeh zistenej tvárniacej sily zo simulačného programu je zobrazený v prílohe 12 [51].



Obr. 59 Efektívne plastické pretvorenie prietlačku po 2. operácií.



Obr. 60 Teplota materiálu po 2. operácií.

4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOTENIE

V ekonomickom zhodnotení budú zistené potrebné náklady pre zvolenú technológiu výroby, ktoré definujú výrobnú cenu súčiastky. Taktiež bude zistený bod zvratu, ktorý určuje pri akom množstve vyrobených súčastí pri zvolenej marži 20 % sa stáva výroba zisková. Bude sa brať do úvahy vlastníctvo hydraulického lisu a do výpočtov nebude zaradené jeho zaobstaranie a údržba, pretože tieto náklady sú neznáme. Cena potrebných nástrojov je odhadovaná a je vyčíslená v tabuľke 12. Priame náklady na výrobu sú priame a fixné, pričom do priamych zapadajú náklady na materiál, mzdy, energie a k fixným nákladom spadajú náklady na zaobstaranie sady nástrojov. [52] Výpočet priamych nákladov:

- Náklady na materiál [52]:

$$N_{mat} = S \cdot C_{mat} \cdot n = 0,62015 \cdot 21,3 \cdot 200\,000 = 2\,641\,839, \quad (4.1)$$

kde: C_{mat} - cena materiálu v hodnote 21,3 [Kč · kg⁻¹] [53],
 n - počet kusov vyrábanej súčasti [ks · rok⁻¹],
 S - spotreba materiálu, spočítaná podľa vzťahu:

$$S = \frac{V_{pol(rezanie)} \cdot \rho}{10^6} = 79\,002 \cdot 7,85 = 62015. \quad (4.2)$$

- Náklady na mzdy [54]:

- Počet výliskov za jednu zmenu:

$$n_{výl/zmena} = t_{zmena} \cdot 60 \cdot n_{zdvih} = 7 \cdot 60 \cdot 40 = 16\,800. \quad (4.3)$$

kde: t_{zmena} - čistý čas pracovnej zmeny [hod],
 n_{zdvih} - počet zdvihov stroja za minútu, odhadnutý na hodnotu 40 [ks · min⁻¹].

- Potrebný počet zmien na výrobu série [54]:

$$n_{zmena} = \frac{n_{op} \cdot n}{n_{výl/zmena}} = \frac{2 \cdot 200\,000}{16\,800} = 23,8 \approx 24, \quad (4.4)$$

kde: n_{op} - počet tvárniacich operácií [-].

- Potrebný počet hodín na výrobu série:

$$n_{hod} = t_{zmena} \cdot n_{zmena} = 8 \cdot 24 = 192. \quad (4.5)$$

- Náklady na mzdy [54]:

$$N_{mzdy} = C_{obsluha} \cdot n_{hod} = 400 \cdot 192 = 76\,800, \quad (4.6)$$

kde: $C_{obsluha}$ - hrubá mzda obsluhy lisu [Kč · hod⁻¹].

- Náklady na elektrickú energiu [54]:

$$N_{energ} = C_{energ} \cdot n_{hod} \cdot P_s \cdot \eta_s = 5,35 \cdot 192 \cdot 55 \cdot 0,75 = 42\,372, \quad (4.7)$$

kde: C_{energ} - cena elektriny v hodnote 5,35 [Kč · kWh⁻¹] [55],
 P_s - výkon stroja odhadnutý na hodnotu 55 [kW],
 η_s - účinnosť stroja zvolená v hodnote 0,75 [-].

Celkové priame náklady sa vypočítajú podľa vzťahu [52]:

$$PN = N_{mat} + N_{mzdy} + N_{energ} = 2\,641\,839 + 76\,800 + 42\,372 = 2\,761\,011. \quad (4.8)$$

Tab. 12 Fixné náklady.

Náklady na 1. nástroj	Náklady na 2. nástroj	Náklady spolu
150 000 Kč	170 000 Kč	320 000 Kč

Celkovú výrobnú cenu tvorí súčet priamych a fixných nákladov. Výška fixných nákladov pre dve sady nástrojov bola odhadnutá na sumu $N_{fix} = 320\,000$ Kč. Celková výrobná cena sa vypočíta zo vzťahu [54]:

$$C_{vc} = PN + N_{fix} = 7\,749\,446 + 320\,000 = 3\,081\,011. \quad (4.9)$$

Do výpočtu celkovej tržnej ceny súčasti sú uvažované aj náklady na réžie. Medzi zaradené réžie do výpočtu patria [52]:

- Výrobné réžie [56]:

$$R_v = 0,4 \cdot C_{vc} = 0,4 \cdot 3\,081\,011 = 1\,232\,404. \quad (4.10)$$

- Správne réžie [56]:

$$R_s = 1 \cdot N_{mzdy} = 1 \cdot 76\,800 = 76\,800. \quad (4.11)$$

- Zásobovacie réžie [56]:

$$R_z = 1 \cdot N_{mzdy} = 1 \cdot 76\,800 = 76\,800. \quad (4.12)$$

- Celkové réžie [56]:

$$R_c = R_v + R_s + R_z = 1\,232\,404 + 76\,800 + 76\,800 = 1\,386\,004. \quad (4.13)$$

Tržná cena súčasti pri zvolenej marži 20 % sa vypočíta podľa vzťahu [57]:

$$C_{súčasť} = \frac{C_{vc} + R_c}{200\,000} \cdot 1,2 = \frac{3\,081\,011 + 1\,386\,004}{200\,000} \cdot 1,2 = 26,8. \quad (4.14)$$

Bod zvratu je určený vzťahom [57]:

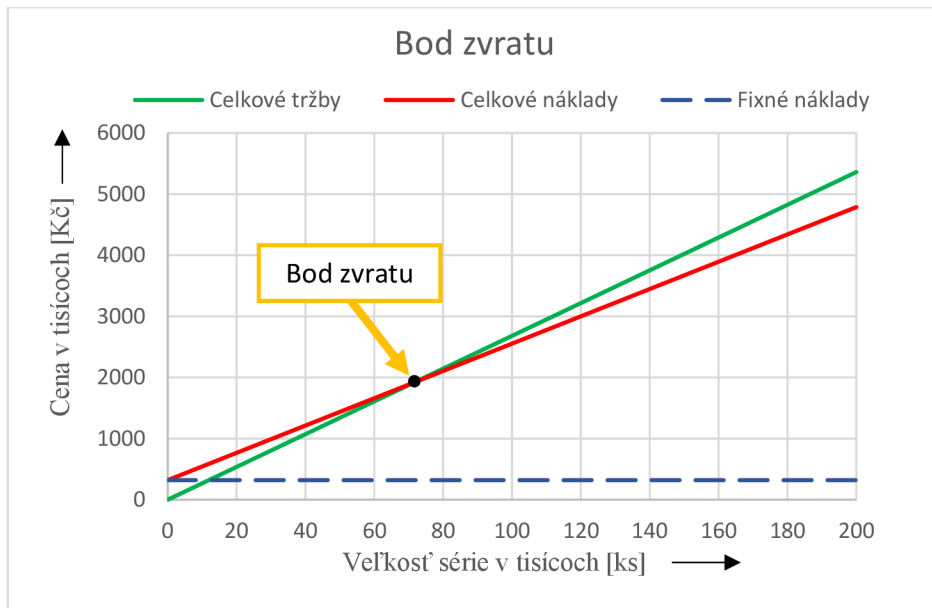
$$B_{zv} = \frac{N_{fix}}{C_{súčasť} - \frac{C_{vc} + R_c}{200\,000}} = \frac{320\,000}{26,8 - \frac{3\,081\,011 + 1\,386\,004}{200\,000}} = 71\,670. \quad (4.15)$$

Aby bolo možné určiť, či je zvolená technológia tvárnenia hospodárnejšia ako iná metóda výroby boli určené náklady na materiál aj pre technológiu obrábania. Objem polotovaru $\emptyset 52 - 55$ potrebného na obrábanie $V_{pol(obrábanie)}$ bol stanovený na hodnotu $121\,340 \text{ mm}^3$. Náklady na materiál boli obdobne vypočítané podľa vzťahu (4.1):

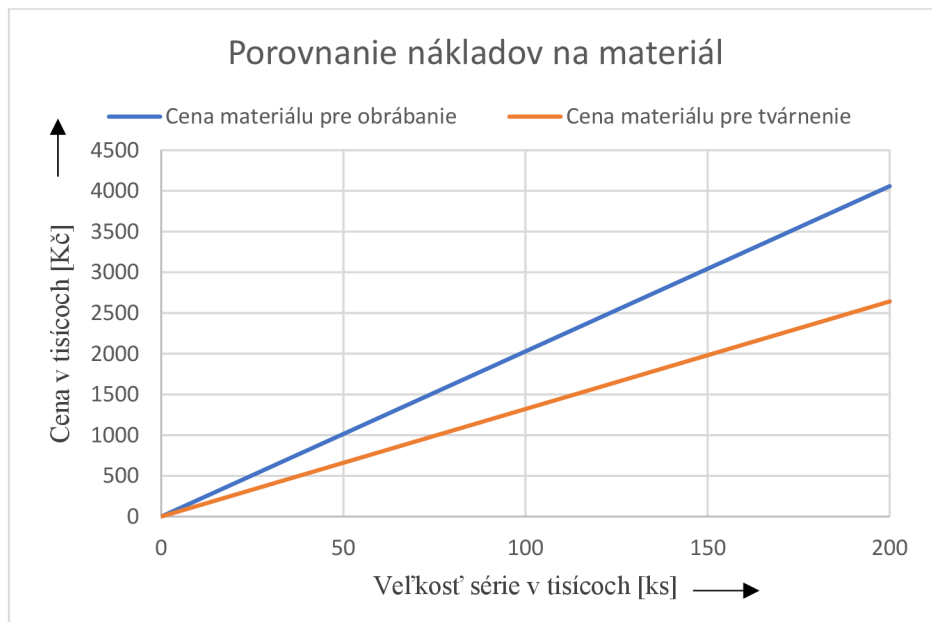
$$N_{mat(obrábanie)} = S_{obrábanie} \cdot C_{mat} \cdot n = 0,95252 \cdot 21,3 \cdot 200\,000 = 4\,057\,735,$$

kde: $S_{obrábanie}$ - spotreba materiálu pre obrábanie, spočítaná obdobne podľa vzťahu (4.2):

$$S = \frac{V_{pol(obrábanie)} \cdot \rho}{10^6} = 121\,340 \cdot 7,85 = 0,95252.$$



Obr. 61 Grafické určenie bodu zvratu.



Obr. 62 Porovnanie nákladov na materiál pre obrábanie a tvárnenie.

Cena súčasti s maržou 20 % bola určená na 26,8 Kč bez sadzby DPH. Niektoré náklady vo výpočte neboli uvažované, ako napríklad kúpa stroja a náklady na kooperačné, finálne obrobenie výlisku. Počet kusov, ktorý musí firma vyrobiť aby zisk pokryl stratu bol určený na 71 670 ks. Bod zvratu je graficky znázornený na obrázku 61. Je možné sledovať, že približne po štvrtine sériovosti výroby začne podnik generovať zisk. Porovnanie nákladov potrebných na materiál pre tvárnenie a obrábanie je znázornené na obr. 62. Zvolenou technológiou tvárnenia sa ušetrí na materiáli približne 1 500 000 Kč.

ZÁVER

Objemové tvárnenie za studena patrí k nevyhnutným produktívnym technológiám používaných pri sériovej a hromadnej výrobe širokej škály súčiastok. Súčiastkou riešenou touto technológiou je piest diskovej brzdy automobilu, ktorý je vyrobený z konštrukčnej ocele ČSN 41 2010 žihanej na mäkko. Výroba ja naplánovaná na množstvo 200 000 kusov za rok.

Súčiastka je osovo symetrická a kalíškovitého tvaru, s rozmermi približne $\varnothing 52$ -52 mm. Materiálový model použitý pri riešení problematiky návrhu technológie výroby bol získaný kvázistatickou materiálovou skúškou v tlaku, z ktorej bol získaný priebeh prirodzeného pretvárneho odporu a mernej pretvárnej práce v závislosti na stupni logaritmického pretvorenia. Na základe literárnej štúdie boli navrhnuté tri technologické postupy výroby.

Prvým krokom návrhu technologického postupu bolo zistenie objemu konečného výlisku, na základe ktorého sa pomocou zákona zachovania objemu vypočítali rozmery polotovaru v predošlých operáciách. Na základe týchto rozmerov bolo skontrolované, či rozmery polotovaru vyhovujú predom zvolenej technológii strihania klátikov z tyčí. Keďže polotovar je relatívne hrubý bolo navrhnuté delenie polotovaru rezaním. Keďže výpočtami bolo zistené prekročenie kritickej hodnoty pretvorenia, tak pre splnenie požiadaviek na výrobu súčiastky bolo navrhnuté zväčšenie hrúbky dna súčiastky, aby sa zabránilo prekročenie kritickej hodnoty. Výsledný technologický postup pozostáva z dvoch tvárniacich operácií, kalibrovania a spätného pretlačovania.

Pre zvolený technologický postup bol vypočítaný priebeh napätia pôsobiaci na nástroje a potrebná tvárniaca sila a práca. Keďže tvárniaca sila sa zistila na hodnotu 3 192 kN, boli uvažované 2 možné stroje vhodné k použitiu a to postupový automat TPD 630 a hydraulický lis INWORK 700. Zistený priebeh napätia preukázal potrebu zapuzdrenia lisovnice objímkou. Rozmery lisovnice a objímky boli optimalizované pomocou programu OPTIM97 tak, aby vypočítané pôsobiace radiálne napätie nepresiahlo dovolené napätie vypočítané po zapuzdrení lisovnice. Tejto podmienky sa dosiahlo kombináciou materiálu lisovnice SK G5 a materiálu objímky 19 733. Na základe vypočítaných rozmerov lisovnice a objímky bol zvolený stroj hydraulický lis INWORK 700, pretože uvažovaný tvárniaci automat nevyhovoval týmto rozmerom. Vypočítané rozmery lisovnice, objímky a geometria súčasti boli podkladom konštrukčného návrhu nástroja. Pre výkresovú dokumentáciu bol vytvorený konštrukčný návrh nástrojovej sady spätného pretlačovania.

Vypočítané hodnoty pretvorenia a tvárniacej sily boli overené pomocou simulačného programu Simufact Forming. Hodnoty pretvorenia vypočítané analyticky a vypočítané pomocou programu sa približne zhodujú. Viditeľný rozdiel nastal pri výpočte tvárniacej sily. Tvárniaca sila o hodnote 3 783 kN, vypočítaná programom sa líši, pretože analyticky výpočet deformačného odporu a pretvárnej sily nezahŕňa vplyv rýchlosti deformácie. Skúmanou veličinou bola taktiež teplota materiálu. Zo simulácie vyplýva, že k dosiahnutiu rekryštalizačnej teploty nedôjde.

Nakoniec bolo vykonané technicko-ekonomické zhodnotenie, v ktorom sa určila cena súčasti pri zisku 20 % na 26,8 Kč. Bod zvratu bol zistený na 71 670 kusov.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮV

1. BEROUN, Stanislav. *Technologie tváření kovů* [online]. In: . s. 10 [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: <http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:1886>
 2. LANGE, Kurt. Handbook of Metal Forming. *Journal of applied metalworking* [online]. 1986, 4(2), 188-188 [cit. 2022-04-14]. ISSN 0162-9700. Dostupné z: doi:10.1007/BF02834383
 3. Pretlačovanie. In: *Scribd.com* [online]. [cit. 2022-04-14]. Dostupné z: <https://www.scribd.com/document/6596219/pretlacovanie>
 4. FELDMAN, Heinz, Vladimír HAŠEK. *Protlačování oceli*. První. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962. ISBN 04-266-62.
 5. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. První. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
 6. Cold forming tools. In: *Majorindustriesltd.com* [online]. [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: <https://www.majorindustriesltd.com/coldformingtools>
 7. Tools for cold heading machines. In: *Metiz.tw* [online]. [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: https://english.metiz.com.tw/tools_punch.htm
 8. Matice se šestihrannou hlavou. In: *Twycdrumparts.com* [online]. [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: <http://cz.twycdrumparts.com/fastener-nut/hex-cap-nuts/>
 9. Deepak cold formed parts. In: *Indiamart.com* [online]. [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/cold-forged-parts-17365526130.html>
 10. *Brzdy a brzdový systém automobilu* [online]. [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: <https://automonti.cz/wp-content/uploads/2020/01/brzdy-brzdovy-system.pdf>
 11. JANČO, Marcel. Brzdy a brzdový systém automobilu. In: *Autorubrik* [online]. [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: <http://www.autorubik.sk/clanky/brzdy-a-brzdovy-system-automobilu/#prettyPhoto>
 12. ZDENĚK, Jan, Bronislav ŽDÁNSKÝ a Jiří ČUPERA. *Automobily: Podvozky*. 4. vydání. Brno: Avid spol s.r.o., 2012. ISBN 978-80-87143-24-7.
 13. KALNICKÝ, Jakub. *Provozní a odlehčovací brzdy užitkových vozidel*. Brno, 2014. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce Jan Fojtášek.
 14. JANDOVÁ, Eva. *Brzdy motorového vozidla: Základní pojmy* [online]. In: . [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: <https://adoc.pub/brzdy-motoroveho-vozidla-zakladni-pojmy-.html>
 15. RIDEX Piest brzdového strmeňa. In: *AUTODOC* [online]. 2021 [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: <https://www.autodoc.sk/ridex/15185783>
 16. Opravná sada brzdového strmeňa. In: *AUTODOC* [online]. 2021 [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: <https://www.autodoc.sk/nahradne-diely/opravna-sada-brzdoveho-strmena-10733>
 17. Brzdový strmeň. In: *AUTODOC* [online]. 2021 [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: <https://www.autodoc.sk/nahradne-diely/brzdovy-strmen-10907>
 18. Ušlechtilé uhlíkové konstrukční oceli třídy 12, jejich složení a tepelné zpracování. In: *Tumlikovo* [online]. [cit. 2022-01-05]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/uslechtilé-uhlíkove-konstrukcni-oceli-tridy-12-jejich-slozeni-a-tepelne-zpracovani/>
 19. *ČSN 41 2010: ocel 12 010*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 1987.
 20. BENEŠ, Milan a František HRAZDIL. *Křivky přetvárných odporů oceli*. 4.díl. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1986. ISBN 06-089-86.
-

-
21. Drsnost povrchu. In: *E-konstrukter* [online]. [cit. 2022-03-04]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/drsnost-povrchu>
 22. KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění* [online]. Brno: CERM, 2001, 270 s. [cit. 2022-03-04]. ISBN 80-214-1996-2. Dostupné z: <https://dnnt.mzk.cz/view/uuid:fae229c0-1e7c-11e2-a61d-005056827e52?page=uuid:ba5631fe-2a97-47ce-d27d-8ed286fdd23c>
 23. In Situ machining. In: *Insituolution* [online]. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://insituolution.com/>
 24. NĚMEC, Milan, Bohumír BEDNÁŘ a Barbora STUNOVÁ. *Teorie slévání*. 2. vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 220 s. ISBN 978-80-01-06026-1.
 25. BERNÁŠEK, Vladimír a Jan HOREJŠ. *Technologie slévání*. 3. upravené vydání. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2006, 176 s. ISBN 80-7043-491-0.
 26. Rozdíl mezi armaturou z litého a tvářeného materiálu. In: *Armaturygroup.cz* [online]. [cit. 2022-03-21]. Dostupné z: https://www.armaturygroup.cz/aktuality/rozdil-mezi-armaturou-z-liteho-a-tvareneho-materialu_nd85
 27. Forging & casting. In: *Engmark* [online]. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://www.engmark.co.uk/industrial-marketing/forging-casting/>
 28. BABOR, Karel, Augustin CVILINEK a Jan FIALA. *Objemové tváření ocelí*. První. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1967. ISBN 04-239-67.
 29. Technologie. In: *Net-kovo* [online]. [cit. 2022-03-04]. Dostupné z: <https://www.net-kovo.cz/technologie/>
 30. LONG, Hui. Quantitative evaluation of dimensional errors of formed components in cold backward cup extrusion. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. (177), 591-595 [cit. 2022-03-04]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Plastic-deformation-and-temperature-distribution-of-extruded-cup_fig3_222883388
 31. Cold formed products. In: *Coldformedproducts* [online]. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://www.coldformedproducts.co.uk/our-company/>
 32. ŽÍDEK, Milan. *Metahurgická tvaritelnost ocelí za tepla a za studena*. Vydání první. Praha: ALEKO s.r.o., 1995. ISBN 80-85341-45-X.
 33. BAČA, Jozef, Jozef BÍLIK a Viktor TITTEL. *Technológia tvárnenia*. 1. vydanie. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2010. ISBN 978-80-227-3242-0.
 34. ILIESCU, Constantin. *Cold-Pressing Technology*. Vol.9. Department of Mechanical Engineering, University of Brasov, Romania: Editura Stiintifica si Enciclopedica, 1990. ISBN 0-444-98865-3.
 35. Examples of cold extrusion design. In: *Totalmetria* [online]. [cit. 2022-01-23]. Dostupné z: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=408>
 36. HLADÍK, Milan. *Výroba šroubu radlice pluhu* [online]. Brno, 2021 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/199954>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Milan Forejt.
 37. SCHULER, GmbH. *Metal forming handbook*. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1998. ISBN 3-540-61185-1.
 38. PSICA, Lukáš. *Výroba čepu spojky objemovým tvářením* [online]. Brno, 2011 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/4344>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Milan Forejt.
-

-
39. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: Plošné a objemové tváření*. 3. vydanie. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2013. ISBN 978-80-214-4747-9.
 40. ČSN 22 7005: Tvářecí stroje. Protlačování za studena. *Všeobecné požadavky na konstrukci a výpočet*. Praha 10-Hostivař: Vydavatelství norem, 1992.
 41. ELFMARK, Jiří, Alois FARLÍK, Jiří KOTOUČ, Bohumil POČTA, Josef RADA, Boris SOMMER, Miroslav ZAPOTIL a Milan ŽIDEK. *Tváření kovů*. První. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1992. ISBN 04-410-91.
 42. BLAŠČÍK, František, Juraj HUDÁK a Svetlana BODNÁROVÁ. *Technológia objemového tvárnenia: Návod na cvičenia*. 1. vydanie. Bratislava: ALFA, 1988. ISBN 063-720-88.
 43. BAČA, Jozef a Jozef BÍLIK. *Technológia tvárnenia*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2000. ISBN 80-227-1339-2.
 44. FOREJT, Milan. *TEORIE TVÁŘENÍ: Návod do cvičení [online]*. In: . [cit. 2021-12-06]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/hta_theorie_tvareni_navody_do_cvi_ceni_2019p_forejt.pdf
 45. 3D CAD Inventor: Autodesk. In: *Autodesk [online]*. [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.autodesk.cz/products/inventor/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>
 46. HÝSEK, Rudolf. *Tvářecí stroje 1971*. Vyd. 10. Praha: SNTL, 1972, 600 s.
 47. Inwork. In: *Invera [online]*. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://invera.cz/produkt/14-inwork>
 48. Katalog hydraulické lisy. In: *Invera [online]*. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://invera.cz/files/product/14/691689898-23218-in-katalog-hydraulicke-lisy-po-strankach.pdf>
 49. FOREJT, Milan. *Příspěvek k optimalizaci životnosti složených lisovnic a metoda jejich návrhu*. Brno: VUT FSI, 1991, 86 s. Habilitační práce. VUT Brno.
 50. ČSN 41 9820: *Ocel 19 820 rychlořezná*. Praha 10-Hostivař: Vydavatelství ÚNM, 1984.
 51. Simufact Forming. In: *Simufact [online]*. [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.simufact.com/simufactforming-forming-simulation.html>
 52. FOREJT, Milan. *Oborový projekt 2 [online]*. In: . Vysoké učení technické v Brně, FSI, UST, 2003 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/h2p_oborovy_projekt_2_forejt.pdf
 53. Structural Steel C10, Ck10. In: *Made in China [online]*. [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://taixie.en.made-in-china.com/product/lwHQWxIjbTke/China-Structural-Steel-C10-1-0301-Ck10-1-1121-1011-M1010-C10-S9ck-Bar-Rod.html>
 54. MERGEŠČÍKOVÁ, Lenka. *Výroba závěsu lustru [online]*. Brno, 2021 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132375>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Ladislav Žák.
 55. Ceny elektřiny 2022: srovnání E.ON, PRE, ČEZ. In: *Tzbinfo [online]*. [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/ceny-paliv-a-energi/14-ceny-elektriny>
 56. Kalkulace nákladů - příklady. In: *Mendelu [online]*. [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: https://akela.mendelu.cz/~xcepl/inobio/inovace/Ekonomika_lesniho_hospodarstvi/Prezentace_c.12.pdf
-

57. PETR TYL, Jan. Bod zvratu. In: *Marketingmind* [online]. [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: <https://www.marketingmind.cz/bod-zvratu-priklad-vzorec-vypocet-graf/>
58. CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. 2013 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <http://citacepro.com/info>

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

Symbody

Označenie	Legenda	Jednotka
A	tvárniaca práca	[J]
A _{j1}	merná pretvárná práca v oblasti 1	[J]
A _{j3}	merná pretvárná práca v oblasti 3	[J]
A ₅	ťažnosť	[%]
b	hrúbka dna kalíšku	[mm]
B _{zv}	bod zvratu	[ks]
C _{energ}	cena energií	[Kč. kWh ⁻¹]
C _{mat}	cena materiálu	[Kč . kg ⁻¹]
C _{obsluha}	hrubá mzda obsluhy lisu	[Kč . hod ⁻¹]
C _{súčasť}	tržná cena súčasti	[Kč]
C _{vc}	celková výrobná cena	[Kč]
D	vonkajší priemer telesa	[mm]
D ₀	priemer polotovaru	[mm]
D ₀₁	vonkajší priemer lisovnice	[mm]
D ₀₂	vonkajší priemer prvej objímky	[mm]
D ₀₃	vonkajší priemer druhej objímky	[mm]
D ₁	priemer predlisku	[mm]
D ₂	priemer výlisku	[mm]
d	vnútorný priemer telesa	[mm]
d _v	priemer vzorky	[mm]
E	modul pružnosti v ťahu	[mm]
f ₁	koeficient trenia medzi materiálom a nástrojom	[-]
f ₂	koeficient trenia vo vnútri materiálu	[-]
F _{tvárniaca}	tvárniaca sila	[N]
G	modul pružnosti v šmyku	[MPa]
H	výška telesa	[mm]
H ₀	výška polotovaru	[mm]
H ₁	výška predlisku	[mm]
H ₂	výška výlisku	[mm]
n	počet kusov výrobnej série	[ks . rok ⁻¹]
n _{výl/zmena}	počet výliskov za jednu zmenu	[-]
N _{energ}	náklady na energie	[Kč]
N _{fix}	fixné náklady	[Kč]
n _{hod}	počet hodín na výrobu série	[hod]
N _{mzdy}	náklady na mzdy	[Kč]
n _{op}	počet tvárniacich operácii	[-]
n _{zdvih}	počet zdvihov stroja za minútu	[ks . min ⁻¹]
p ₁	maximálny dovolený tlak pôsobiaci na lisovnicu	[MPa]
PN	priame náklady	[Kč]
P _s	výkon stroja	[kW]
R ₁	zaoblenie hrany prietlačníka	[mm]
r ₁	vnútorný priemer lisovnice	[mm]
r ₃	vonkajší priemer objímky	[mm]
R _a	drsnosť povrchu	[μm]
R _c	celkové réžie	[Kč]
R _d	medza pevnosti v tlaku	[MPa]

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

Symbole

Označenie	Legenda	Jednotka
R_e	medza klzu	[MPa]
R_m	medza pevnosti v ťahu	[MPa]
R_s	správne réžie	[Kč]
R_v	výrobné réžie	[Kč]
R_z	zásobovacie réžie	[Kč]
S	obsah plochy	[mm ²]
S_0	počiatočný obsah plochy	[mm ²]
T	teplota okolia	[°C]
T_1	teplota objímky	[°C]
T_2	teplota lisovnice	[°C]
T_{kal}	teplota kalenia	[°C]
T_{pop}	teplota popúšťania	[°C]
T_{tav}	teplota tavenia	[°C]
t_{zmena}	čistý čas pracovnej zmeny	[hod]
V	objem telesa	[mm ³]
V_0	počiatočný objem telesa	[mm ³]
V_1	objem plného válca	[mm ³]
V_2	objem vnútorného válca	[mm ³]
V_3	objem zrezaného vnútorného kužeľa	[mm ³]
V_4	objem zrezaného vonkajšieho kužeľa	[mm ³]
V_i	čiastkový objem telesa	[mm ³]
$V_{pol(rezanie)}$	objem rezaného polotovaru so zreteľom na odpad	[mm ³]
$V_{pol(strihanie)}$	objem strihaného polotovaru so zreteľom na odpad	[mm ³]
x	rozmer v smere osy x	[m]
x_0	počiatočný rozmer v smere osy x	[m]
y	rozmer v smere osy y	[m]
y_0	počiatočný rozmer v smere osy y	[m]
z	rozmer v smere osy z	[m]
z_0	počiatočný rozmer v smere osy z	[m]
z_n	dráha nástroja	[m]
α	uhol čela prietlačníka	[°]
γ_{el}	veľkosť pružnej deformácie v šmyku	[-]
ε	pomerná deformácia	[%]
$\dot{\varepsilon}$	rýchlosť pomernej deformácie	[s ⁻¹]
ε_{el}	veľkosť pružnej deformácie v tlaku alebo ťahu	[-]
ε_H	pomerná deformácie rozmeru	[%]
ε_S	pomerná deformácia prierezu	[%]
η_s	účinnosť stroja	[-]
ρ	hustota	[g·cm ⁻³]
σ_d	deformačný odpor	[MPa]
σ_{dov}	dovolené napätie	[MPa]
σ_p	prirodzený pretvárný odpor	[MPa]
σ_{p1}	prirodzený pretvárný odpor v oblasti 1	[MPa]
σ_{p2str}	stredná hodnota prirodzeného pretvárného odporu v oblasti 2	[MPa]
σ_{pc}	celkový prirodzený pretvárný odpor v oblasti 3	[MPa]

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

Symbole

Označenie	Legenda	Jednotka
σ_{r1}	radiálne napätie v oblasti 1	[MPa]
σ_{r2}	radiálne napätie v oblasti 2	[MPa]
σ_{r2str}	stredná hodnota radiálneho napätia v oblasti 2	[MPa]
σ_{z1}	osové napätie v oblasti 1	[MPa]
σ_{z1str}	stredná hodnota osového napätia v oblasti 1	[MPa]
σ_{z2}	osové napätie v oblasti 2	[MPa]
σ_{zmax}	maximálna hodnota osového napätia	[MPa]
τ	šmykové napätie	[MPa]
τ_{max}	maximálna hodnota šmykového napätia	[MPa]
τ_{krit}	kritická hodnota šmykového napätia	[MPa]
φ	logaritmické pretvorenie	[-]
$\dot{\varphi}$	rýchlosť logaritmického pretvorenia	[s ⁻¹]
φ_1	logaritmické pretvorenie v oblasti 1	[-]
φ_2	logaritmické pretvorenie v oblasti 2	[-]
φ_3	logaritmické pretvorenie v oblasti 3	[-]
φ_H	logaritmické pretvorenie rozmeru	[-]
φ_i	čiastkové hodnota logaritmického pretvorenia	[-]
φ_{krit}	kritická hodnota logaritmického pretvorenia	[-]
φ_S	logaritmické pretvorenie prierezu	[-]
φ_x	normálová zložka logaritmického pretvorenia v smere osy x	[-]
φ_y	normálová zložka logaritmického pretvorenia v smere osy y	[-]
φ_z	normálová zložka logaritmického pretvorenia v smere osy z	[-]

Skratky

Označenie	Legenda
SK	spekaný karbid
MPIN	metóda prípustných intenzít napätia

ZOZNAM PRÍLOH

- Príloha 1 Materiálový model oceli 12 010.3
- Príloha 2 Úchylky rozmerov za studena pretlačovanej nádoby
- Príloha 3 Materiály k výrobe pretlačovacích nástrojov
- Príloha 4 Priebeh napätia na prietlačnici a prietlačníku
- Príloha 5 Diagramy tepelnej rozťažnosti ocele a spekaného karbidu G5
- Príloha 6 Protokol výstupu programu OPTIM97 pre zástavbové kritérium stroja TPD630
- Príloha 7 Protokol výstupu programu OPTIM97
- Príloha 8 Obrazový výstup priebehu napätia a predpätia na lisovnici a objímke po zapuzdrení programu OPTIM97
- Príloha 9 Konštrukčné a tvarové prevedenie prietlačníkov a prietlačníc pre spätné pretlačovanie
- Príloha 10 Informatívny popúšťací diagram oceli 19 820
- Príloha 11 Vstupné geometrické modely pre simuláciu tvárnenie v programe Simufact Forming
- Príloha 12 Priebeh sily na dráhe vypočítanej pomocou programu Simufact Forming

Zoznam výkresov

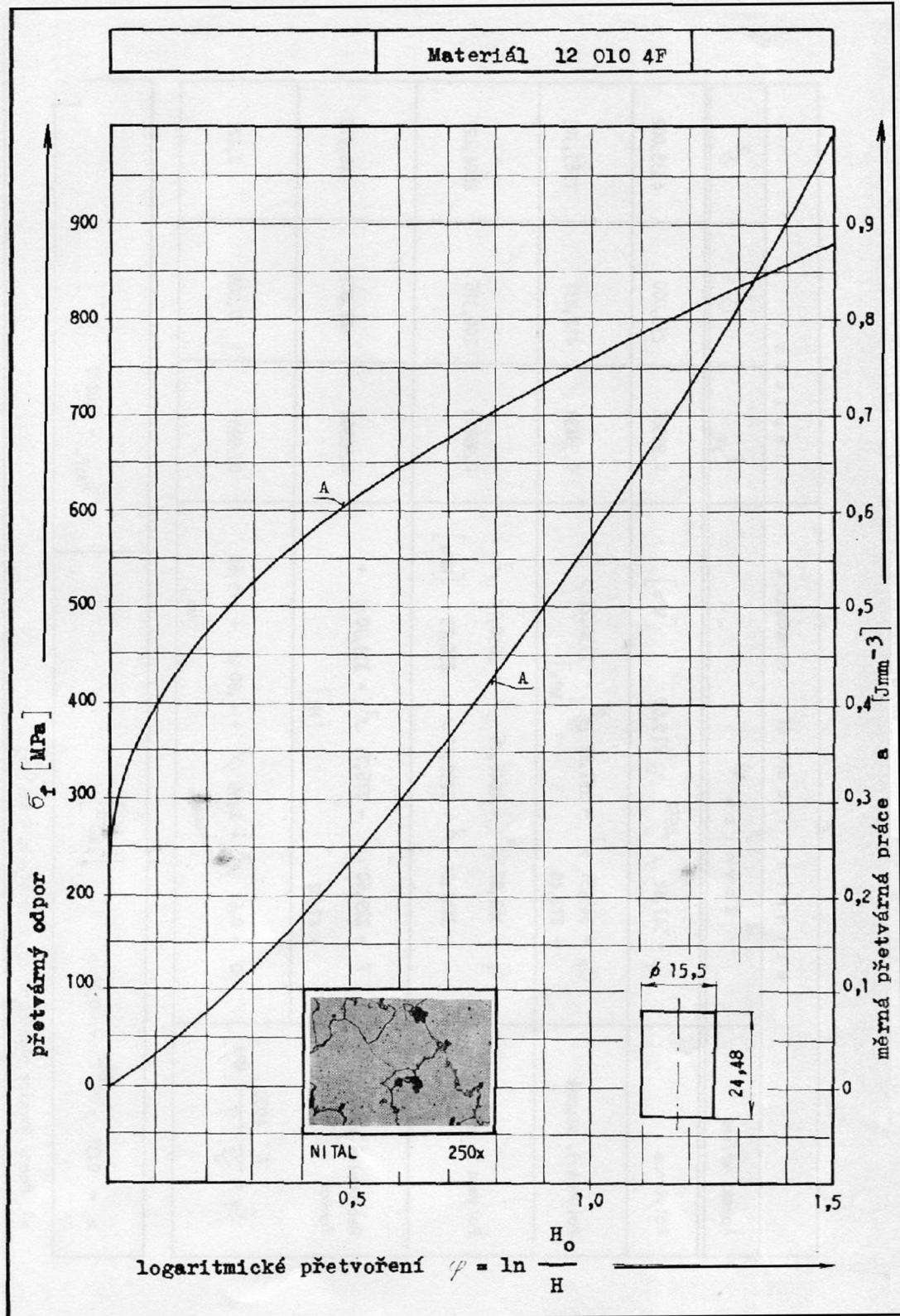
Piest; 2022-DP-191661-01

Prietlačník; 2022-DP-191661-02

Prietlačnica; 2022-DP-191661-03

Nástroj spätného pretlačovania; 2022-DP-191661-Z1

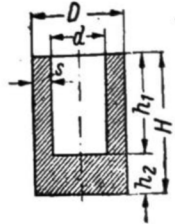
Nástroj spätného pretlačovania – kusovník; 2022-DP-191661-K1



Materiál 12 010 4F označení A		Teplota		
Aprox. křivka	Rovnice *)	I_{yx}	σ^2	δ^2
Polytropa	$\sigma_f = 547,42 \varphi^{0,4662} + 215,62$ [MPa]	0,99586	255,000	4335,002
Polynom 3. stupně	$\sigma_f = 345,51 \varphi^3 - 997,92 \varphi^2 + 1130,27 \varphi + 272,48$ [MPa]	0,99494	472,831	7565,303
Polynom 5. stupně	$\sigma_f = 362,87 \varphi^5 - 1846,26 \varphi^4 + 3650,17 \varphi^3 - 3451,24 \varphi^2 + 1792,11 \varphi + 236,75$ [MPa]	0,99813	200,316	2804,427
Racionálně lomená funkce	$F = 229,60 \varphi^3 - 276,71 \varphi^2 + 339,30 \varphi + 47,02$ [kN]	0,99984	21,807	348,910
	$\sigma_f = \frac{F}{D^2} \frac{4000}{\pi} \text{ [MPa]}$ $D = 0,61 \varphi^3 + 2,99 \varphi^2 + 4,90 \varphi + 15,64$ [mm]	0,99991	0,008	0,121

$a = 0,37 \varphi^{1,4662} + 0,22 \varphi$ [Jmm ⁻³]	$\varphi_{stř.} = 0,0207$ [s ⁻¹]
---	--

*) Pozn. Rovnice platí pro φ v intervalu 0 až 1,63



Tabulka 10. Úchylky rozměru za studena pretlačované nádoby o poměru $\frac{H}{D} \leq 1,2$
Tloušťka stěny $s = 2 - 15$ mm

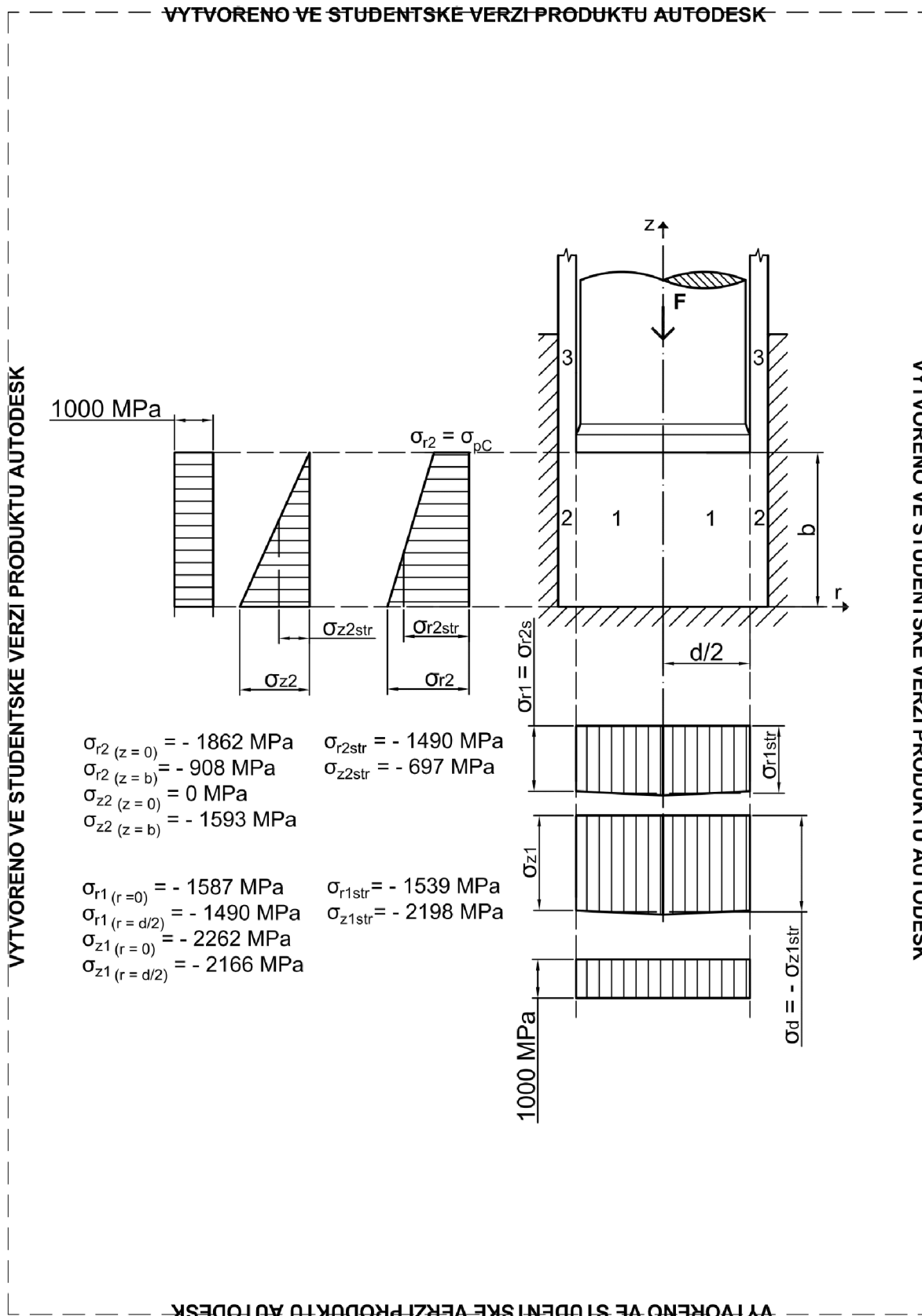
Vnější průměr			Úchylka od d		Tloušťka stěny		
Jmenovitý rozměr D, mm	Úchylka od D		normálně dosažitelná, mm	dalším pracovním postupem, mm	Jmenovitý rozměr s, mm	Úchylka od s	
	normálně dosažitelná, mm	dalším pracovním postupem, mm				normálně dosažitelná, mm	dalším pracovním postupem, mm
pod 10	± 0,08	± 0,05	± 0,10	± 0,05	pod 2	± 0,10	± 0,05
10—30	± 0,10	± 0,04	± 0,10 až ± 0,20	± 0,05 až ± 0,10	2—10	± 0,15	± 0,10
30—40	± 0,12	± 0,07	± 0,15 až ± 0,25	± 0,10 až ± 0,15	10—15	± 0,20	± 0,15
40—50	± 0,15	± 0,10	± 0,20 až ± 0,25	± 0,10 až ± 0,15	Tloušťka dna		
50—60	± 0,20	± 0,12	± 0,20 až ± 0,30	± 0,12 až ± 0,20	Jmenovitý rozměr h ₂ , mm	Úchylka od h ₂	
60—70	± 0,22	± 0,15	± 0,20 až ± 0,30	± 0,15 až ± 0,25		normálně dosažitelná, mm	dalším pracovním postupem, mm
70—80	± 0,25	± 0,17	± 0,20 až ± 0,35	± 0,15 až ± 0,25	pod 2	± 0,15 až ± 0,2	± 0,10
80—90	± 0,30	± 0,20	± 0,25 až ± 0,40	± 0,20 až ± 0,30	2—10	± 0,20 až ± 0,3	± 0,15
90—100	± 0,35	± 0,22	± 0,30 až ± 0,45	± 0,25 až ± 0,35	10—15	± 0,25 až ± 0,3	± 0,20
100—120	± 0,40	± 0,25	± 0,35 až ± 0,50	± 0,30 až ± 0,40	15—25	± 0,30 až ± 0,4	± 0,25
					25—40	± 0,40 až ± 0,5	± 0,35

Tabulka 1 – Materiály k výrobe protlačovadel

Součást protlačovadla		Materiál	
Prútláčnik		19 314, 19 315, 19 426, 19 550, 19 569, 19 572, 19 820, 19 830	
Prútláčnice		19 436, 19 550, 19 569, 19 572, 19 735, 19 655, 19 820, 19 830	
Zďeř	jednoduchá	19 550, 19 740 tepelně zpracováno na 45 HRC až 48 HRC	
	dvojité	vnitřní zďeřový kroužek	19 550 tepelně zpracováno na 52 HRC až 55 HRC 19 655 tepelně zpracováno na 50 HRC
		vnější zďeřový kroužek	15 261 tepelně zpracováno na 40 HRC až 45 HRC; pro zďeře větších rozměrů při požadavku větší houževnatosti 19 426 tepelně zpracováno na 40 HRC až 45 HRC
Vyhadzovač		19 314, 19 569, 19 820, 19 830	
Kolík vyhadzovače		19 314, 19 426, 19 550	
Opěrná deska a podložka vodící vložka		19 314, 19 356, 19 550; pro nejvyšší tlaková namáhání 19 436	
Těleso protlačovadla, matice		11 600, 11 700, 12 060, 13 180, 14 260 tepelně zpracováno na 40 HRC až 45 HRC	
POZNÁMKY 1 Ocel 19 655 lze doporučit jen pro rozměrnější prútláčnice s hlubokými dutinami. 2 Oceli 19 820 a 19 830 se doporučují pro nástroje maximálně namáhané nebo při výrobě větších sérií. Nástroje z těchto materiálů se doporučuje upravovat buď iontovou nitrací nebo fyzikálním inotoplazmovým povlakováním nitridem titanu TiN.			

Tabulka 2 – Přehled slinutých karbidů používaných při výrobě prútláčnic

Druh slinutého karbidu		Poměrná deformace %		Poznámka
řada	ČSN	Zpětné protlačování A	Dopředné protlačování B	
G3	41 8523	45	30	A průchozí tvary dutin prútláčnic bez přechodů B redukovací prútláčnice
G4N	41 8524	45	40	A, B průběžné tvary dutin prútláčnic bez ostrých přechodů
G5	41 8525	55	55	A, B mírné tvary s dokonalým zaoblením, hlavně v koutech $\left(r \pm \frac{D-d}{2} \right)$
POZNÁMKY 1 Slinutý karbid G5 se jeví jako nejvhodnější. 2 Při použití prútláčnic ze slinutých karbidů se doporučuje používat prútláčníků a příp. i vyhadzovačů z materiálu 19 830 a 19 820, iontonitridovaných nebo povlakovaných TiN.				



Diagramy tepelnej rozťažnosti ocele a spekaného karbidu G5

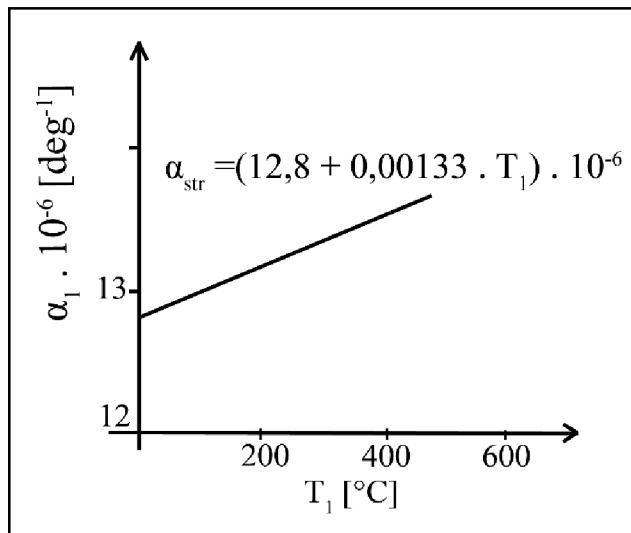


Diagram tepelnej rozťažnosti ocele

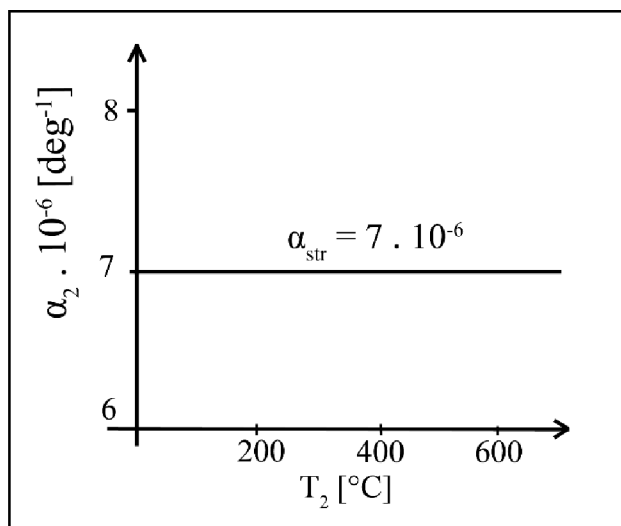


Diagram tepelnej rozťažnosti SK G5

Protokol výstupu programu OPTIM97 pre zástavbové kritérium stroja TPD 630

OPTIMALIZACE LISOVNICE S JEDNOU OBJIMKOU

*****Protokol programu optim97.exe*****

VSTUPNI DATA - MATERIAL:

		LISOVNICE	OBJIMKA
		SK G5	Ocel 19 733
Modul pružnosti v tahu	E [MPa]	460000	206000
Mez pevnosti v tahu	Rm [MPa]	1130.0	1790
Mez pevnosti v tlaku	Rd [MPa]	3140.0	0
Mez kluzu	Rp(0,2) [MPa]	0.0	1670
Poissonovo číslo	μ	0.26	0.30
Dovolené napeti	σ_D [MPa]	850	1525

VSTUPNI DATA - GEOMETRIE:

Vnitřní polomer lisovnice	- r₁ [mm]	26.2
Vnější polomer objímky	- r₃ [mm]	85

VSTUPNI DATA - TEPLOTA, TEPEL. ROZTAZNOST:

Teplota okolí	- T_o [°C]:	21
Teplota popouštění	- T_p [°C]:	590
Str.hodnota koef.tepel.roztaznosti lisovnice	- α₁ [1/K]:	0.00000700
Str.hodnota koef.tepel.roztaznosti objímky	- α₂ [1/K]:	0.0000136

VSTUPNI DATA - PODMINKY UNOSNOSTI A PODMINKY POUZDRENI:

LISOVNICE:	Podmínka PKP pro slinutý křemík
OBJIMKA:	Podmínka energetická HMH pro ocel
Pouzdeno za tepla	Ohřev s vyrovnáním teploty

VYPOCTENE HODNOTY

Poměrný deliči polomer	r₂/r₁ [mm]	1.92025
Maximální radiační tlak	p₁ [MPa]	1150.00000
Kontaktní tlak	p₂ [MPa]	572.00520
Deliči polomer	r₂ [mm]	50.31060
Vypočtený přesah	2Δr [mm]	0.33152
Kontaktní předpětí	p̄₂ [MPa]	446.05949
Stavení vnějšího Ø lisovnice	2Δr₂ [mm]	0.07241
Roztavení vnitřního Ø objímky	2Δr₂₂ [mm]	0.25911
Zvětšení kontaktního tlaku od p ₁	p'₂ [MPa]	125.94571
Konstrukční přesah	2Δr_s [mm]	0.36467
Stavení funkčního Ø lisovnice	2Δr₁ [mm]	- 0.06972
Teplota potřebná k ohřevu objímky	T₁ [°C]	580.00
Teplota potřebná k podchlazení lisovnice	T₂ [°C]	-0.4

Protokol výstupu programu OPTIM97

OPTIMALIZACE LISOVNICE S JEDNOU OBJIMKOU

*****Protokol programu optim97.exe*****

VSTUPNI DATA - MATERIAL:

		LISOVNICE	OBJIMKA
		SK G5	Ocel 19 733
Modul pružnosti v tahu	E [MPa]	460000	206000
Mez pevnosti v tahu	Rm [MPa]	1130.0	1790
Mez pevnosti v tlaku	Rd [MPa]	3140.0	0
Mez kluzu	Rp(0,2) [MPa]	0.0	1670
Poissonovo číslo	μ	0.26	0.30
Dovolené napětí	σ_D [MPa]	850	1625

VSTUPNI DATA - GEOMETRIE:

Vnitřní polomer lisovnice	- r₁ [mm]	26.2
Vnější polomer objímky	- r₃ [mm]	162.4

VSTUPNI DATA - TEPLOTA, TEPEL. ROZTAZNOST:

Teplota okolí	- T_o [°C]:	21
Teplota popouštění	- T_p [°C]:	590
Str.hodnota koef.tepel.roztaznosti lisovnice	- α₁ [1/K]:	0.00000700
Str.hodnota koef.tepel.roztaznosti objímky	- α₂ [1/K]:	0.0000136

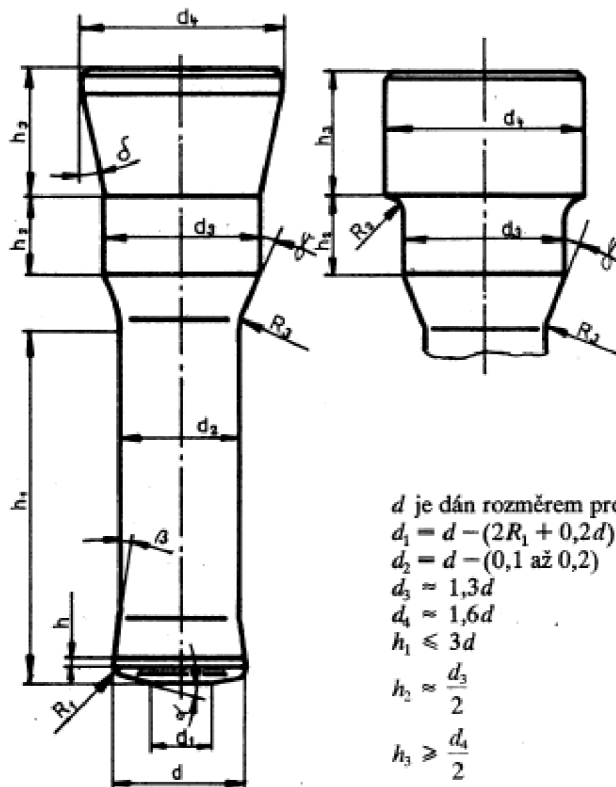
VSTUPNI DATA - PODMINKY UNOSNOSTI A PODMINKY POUZDRENI:

LISOVNICE:	Podmínka PKP pro slinutý křemík
OBJIMKA:	Podmínka energetická HMH pro ocel
Pouzďeno za tepla	Ohřev s vyrovnáním teploty

VYPOCTENE HODNOTY

Poměrný deliči polomer	r₂/r₁ [mm]	2.46954
Maximální radiační tlak	p₁ [MPa]	1562.75000
Kontaktní tlak	p₂ [MPa]	789.27389
Deliči polomer	r₂ [mm]	64.70183
Vypočtený přesah	2Δr [mm]	0.45529
Kontaktní předpětí	p̄₂ [MPa]	663.60097
Stavení vnějšího Ø lisovnice	2Δr₂ [mm]	0.10569
Roztavení vnitřního Ø objímky	2Δr₂₂ [mm]	0.34961
Zvětšení kontaktního tlaku od p ₁	p'₂ [MPa]	125.67293
Konstrukční přesah	2Δr_S [mm]	0.50082
Stavení funkčního Ø lisovnice	2Δr₁ [mm]	- 0.09042
Teplota potřebná k ohřevu objímky	T₁ [°C]	580
Teplota potřebná k podchlazení lisovnice	T₂ [°C]	-52.1

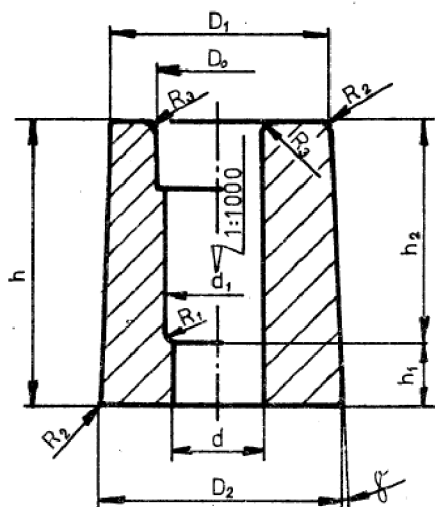
Konštrukčné a tvarové prevedenie prietlačníkov a prietlačníc pre spätné pretlačovanie



- d je dán rozměrom protlačku
- $d_1 = d - (2R_1 + 0,2d) \approx 0,7d$
- $d_2 = d - (0,1 \text{ až } 0,2)$
- $d_3 \approx 1,3d$
- $d_4 \approx 1,6d$
- $h_1 \leq 3d$
- $h_2 \approx \frac{d_3}{2}$
- $h_3 \geq \frac{d_1}{2}$
- $h = 0,5\sqrt{d}$
- $\alpha = 5^\circ \text{ až } 8^\circ$
- $\beta = 4^\circ \text{ až } 5^\circ$
- $\gamma = 15^\circ \text{ až } 30^\circ$
- $\delta = 5^\circ \text{ až } 15^\circ$
- $R_1 = (0,05 \text{ až } 0,1)d$
- $R_2 = 0,3(d_4 - d_3)$
- $R_3 = \text{min. } d$

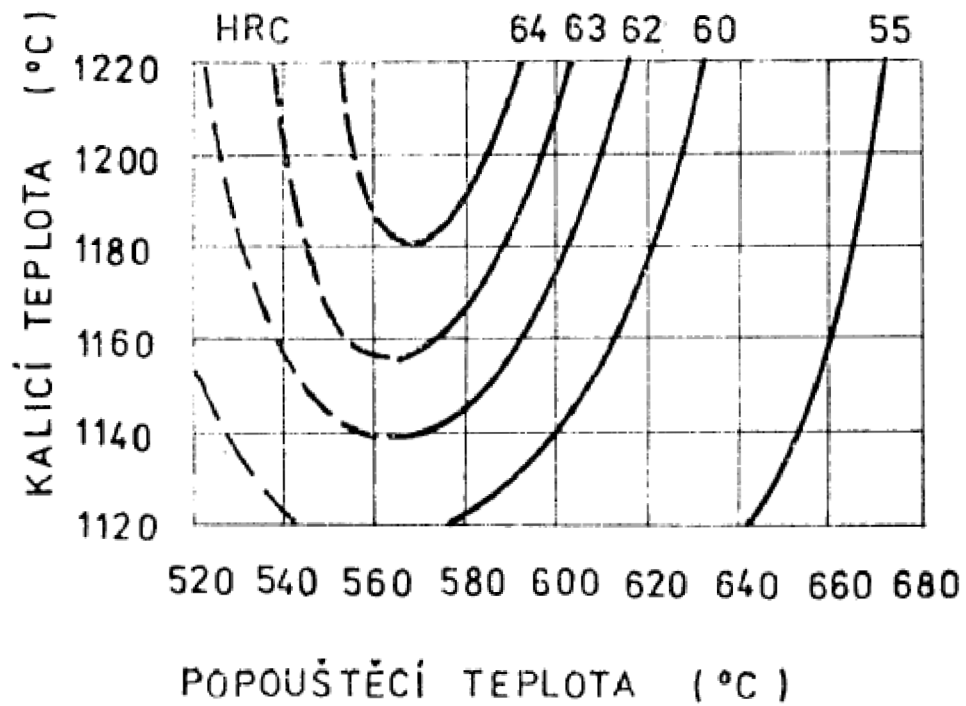
Drsnost povrchu $R_a = 0,4$, drsnost povrchu činné časti $R_a = 0,1$.

Rozměry v mm



- d, d_1, D_0, R_1, h, h_2 jsou dány tvarem a rozměry protlačku
- D_1, D_2 se určí výpočtem
- $\gamma = 1^\circ \text{ až } 3^\circ$
- $h_1 = \text{min. } 0,9d$
- $R_2 = (0,5 \text{ až } 1) \text{ mm}$

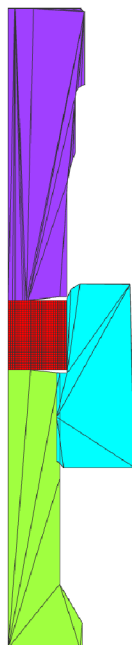
Drsnost povrchu průtlačnice $R_c = 0,4$, drsnost činné časti $R_a = 0,1$.



Doba austenitizace: 3 min
Ochlazovací prostředí: olej
Doba popouštění: 3krát 45 min
Vzorek: 4HR 20 mm

Vstupné geometrické modely pre simuláciu tvárnenia v programe Simufact Forming

Geometry
Simulace-vyhadzovac-1op
Simulace-lisovnik-1op
Simulace-lisovnica-1op
Cylinder

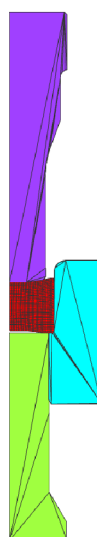


op1 - Results - 2
Sub-stage: positioning_tool
Progress: 100.00%

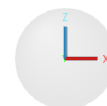


Geometrický model 1. operácie

Geometry
Simulace-vyhadzovac-2op
Die-2
Die
Cylinder



op2 - Results - 1
Sub-stage: Forming
Progress: 70.87%



Geometrický model 2. operácie

Priebeh sily na dráhe vypočítanej pomocou programu Simufact Forming

