



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA PASTORKU

PRODUCTION OF PINION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Vališ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michaela Císařová, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: Ondřej Vališ
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojírenského inženýrství
Vedoucí práce: Ing. Michaela Císařová, Ph.D.
Akademický rok: 2016/17

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 bakalářské práce:

Výroba pastorku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o návrh výroby pastorku do převodovky technologií objemovým tvářením za studena. V práci by měly být uvedeny možné metody protlačování a výrobní postupy. Dále zde budou uvedeny příklady součástí a jejich využití v praxi spolu s popisem metody.

Cíle bakalářské práce:

Vypracování literární studie na téma protlačování, doplněná příklady součástí obdobného tvaru a jejich využití v praxi.

Vypracování technologického postupu výroby zadané součásti, doplněné o technologické výpočty a vlastní závěry.

Seznam doporučené literatury:

BABOR, Karel, Jan FIALA a Augustin CVILINEK. Objemové tváření ocelí. Praha: SNTL, 1967. Řada strojírenské literatury.

BRALLA, James G. Design for manufacturability handbook [online]. 2nd ed. New York: McGraw - Hill, 1999. [cit. 2014-03-15]. ISBN 00-700-7139-X. Dostupné z:
<http://www.scribd.com/doc/152678815/cold-headed-parts-pdf>.

FELDMANN, Heinz D. Protlačování ocelí. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1962. DT 669.14.

DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. Technologie tváření: plošné a objemové tváření. 2. vyd. Brno: CERM, 2007. ISBN 978-80-214-3425-7.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

VALIŠ Ondřej: Výroba pastorku.

Bakalářská práce se zabývá literární studií technologie objemového tváření za studena. Dále práce předkládá návrh technologie výroby pastorku do převodovky osobního automobilu z legované oceli dle ČSN 16 326. Na základě získaných poznatků z literární studie problematiky objemového tváření byla pro výrobu součásti navržena technologie dopředného protlačování s následným pēchováním za studena. Součást bude tedy vyráběna v průběhu dvou tvářecích operací ve výrobní sérii padesát tisíc kusů za rok. Tyto výrobní operace budou probíhat na postupovém tvářecím automatu od firmy Schuler o jmenovité síle dva tisíce tun, který je součástí společnosti Metaldyne Oslavany.

Klíčová slova: deformace, objemové tváření, pastorek, protlačování, pēchování

ABSTRACT

VALIŠ Ondřej: Production of pinion.

The bachelor thesis deals with literature study of cold forming technology. Further the thesis submits a proposal of the production technology of pinion into the gearbox of passenger vehicles made from alloy steel according to ČSN 16 326. Thanks to knowledges aquired by literary study of bulk forming issue was suggested a direct extrusion technology with consequential cold upsetting. The component part will be produced in two production processes and series of fifty thousand pieces per year. These manufacturing processes will be used on forming machine called Schuler with nominal force of two thousand tons which is part of Metaldyne Oslavany company involved in automative industry.

Keywords: deformation, bulk forming, pinion, extrusion, upsetting

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VALIŠ, Ondřej. *Výroba pastorku*. Brno, 2017. 39 s, 1 výkres, 1 příloha, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Michaela Císařová, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

Ve Zbýšově dne 26.5.2017

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji paní Ing. Michaelle Císařové, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce, dále pak firmě Metaldyne Oslavany a panu Radku Polákovi za pomoc a konzultace při tvorbě této práce. V neposlední řadě bych chtěl velmi poděkovat celé své rodině za podporu během studia.

OBSAH

Zadání
Abstrakt
Bibliografická citace
Čestné prohlášení
Poděkování
Obsah

ÚVOD	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ	10
2 TEORETICKÉ ZÁKLADY TVÁŘENÍ	11
2.1 Fyzikální podstata tváření	11
2.2 Zákony plastické deformace	12
2.3 Odporů při tváření	13
2.4 Zpevnění a odpevnění	13
2.5 Deformační stárnutí	14
3 OBJEMOVÉ TVÁŘENÍ ZA STUDENA	15
3.1 Protlačování	15
3.2 Pěchování	19
3.3 Materiály vhodné k protlačování	21
3.4 Nástroje k protlačování	25
3.5 Stroje pro tváření	26
4 NÁVRH VÝROBY SOUČÁSTI	27
4.1 Volba materiálu	27
4.2 Technologické výpočty	27
4.3 Návrh	31
5 ZÁVĚRY	33

Seznam použitých zdrojů
Seznam použitých symbolů a zkratk
Seznam obrázků
Seznam tabulek
Seznam příloh
Seznam výkresů

ÚVOD [1], [2], [3]

Ve strojírenském průmyslu existuje celá řada výrobních technologií. Jednou z nejstarších je slévárnictví, jehož počátky sahají až šest tisíc let před Krista. Výsledným produktem této technologie je odlitek, který se zhotovuje odléváním roztaveného materiálu do připravených forem. Dodnes nejrozšířenější metodou zpracování hutních polotovarů je obrábění, při kterém dochází k odebrání materiálu výrobku nástrojem ve tvaru klínu, materiál odchází ve formě třísek různých tvarů a délek. Obrábění je používáno pro výrobu hotových součástí nebo nástrojů pro jiné technologie. Další důležitou strojírenskou technologií je svařování, jehož základy byly položeny v první polovině devatenáctého století. Touto metodou se tvoří nerozebíratelná spojení s využitím tepelné, mechanické nebo radiační energie. Svařované konstrukce jsou nejčastěji zhotoveny z plechů a profilů. Pro konečné úpravy výrobků se používá technologie povrchových úprav, při kterých se opracovává nebo nanáší vrstva ochranného materiálu, sloužící ke zlepšení vlastností povrchu a především pro vyšší odolnost proti korozi, otěru a změnám teplot. Tato práce se bude dále věnovat technologii tváření, která je velmi významná ve strojírenském průmyslu.

Vývoj tváření kovů je historicky datován již od přelomu pozdního eneolitu a starší doby bronzové, avšak největšího rozvoje dosáhla teorie tvářecích procesů v průběhu dvacátého století. Technologie tváření se řadí do skupiny beztržiskových technologií. Má velký význam, jelikož jde o ekonomicky efektivní technologii často uplatňovanou v sériové a hromadné výrobě. Jedná se o výrobní proces, při kterém polotovary získávají konkrétní navržený tvar působením vnějších sil. Tímto procesem dochází ke zpevňování součástí, což je pozitivum této technologie. Jako další výhody je možné uvést podstatnou úsporu výrobního materiálu, zvýšení produktivity, snížení výrobních nákladů, zlepšení kvality výrobků. Nevýhodou může být poměrně vysoká cena nástrojů, někdy nutné povrchové úpravy před tvářením nebo zúžený výběr materiálu ke tváření.

Tváření je obecně rozděleno na dvě hlavní oblasti podle způsobu vnějšího zatížení: na plošné tváření a objemové tváření. Příklady součástí zhotovené těmito způsoby jsou znázorněny na obr. 1.



Obr. 1 Součásti zhotovené tvářením plošným (vlevo) a objemovým (vpravo) [20], [21]

1 ROZBOR ZADÁNÍ [4], [5]

Další část této práce se zaměří na návrh výroby zadané součásti. Zadaná součást je vyráběna firmou Metaldyne Oslavany, spol. s.r.o. Tato firma je součástí mezinárodní holdingové společnosti American Axle & Manufacturing, což je v současnosti globální lídr v dodávkách vysoce kvalitních technických komponentů, modulů a systémů do motorů, převodovek a řídicích zařízení. Firma Metaldyne působí v České republice již přes dvacet let a zabývá se výrobou strojních součástí technologií objemového tváření za studena, za tepla a poloohřevu. Výrobky zde zhotovené nacházejí svá odbytíště v různých odvětvích strojírenství, převážně v automobilovém průmyslu. Výrobní program zahrnuje například drážkové náboje sloužící k pohonu zadních náprav nákladních a osobních automobilů (obr. 2), tlumiče, různé druhy hřídelí včetně drážkovaných a dutých, tlakové filtry, tlakové láhve a další výrobky především z oceli.



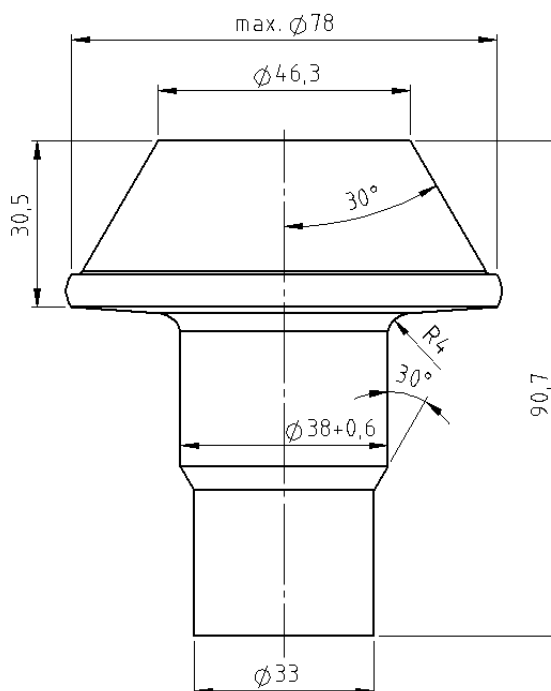
Obr. 2 Drážkový náboj [19]

Řešenou součástí této práce je pastorek do kuželového soukolí převodovky osobního automobilu. Dvě spoluzabírající ozubená kola tvoří ozubené soukolí (ozubený převod). Na obr. 3 je pro názornost zobrazeno kuželové soukolí stejného typu jako je řešená součást. Pastorek je kolo vlevo. Kuželová soukolí jsou v automobilovém průmyslu využívána do převodovek a diferenciálů k přenosu krouticího momentu, a tím rozvodu otáčivého pohybu na zadní nápravu či na všechna kola.



Obr. 3 Kuželové soukolí [22]

Řešená součást je zobrazena na obr. 4. Jako polotovar pro výrobu pastorku bude použit tyčový materiál a jelikož jde o symetrický tvar, technologický postup nevyžaduje použití speciálních nástrojů a metod a bude se vyrábět běžnými technologiemi tváření za studena, konkrétně dopředným protlačováním a pýchováním. Součást se bude vyrábět ve dvou výrobních operacích na postupovém automatu o jmenovité síle dva tisíce tun (viz příloha) v požadovaném množství padesát tisíc kusů ročně. Dle obr. 4 lze řešenou součást rozdělit na dvě části, a to na hlavu a dřík. Výrobek po tváření slouží dále jako polotovar pro obrábění – na ploše hlavy pastorku bude frézováno šikmé ozubení.

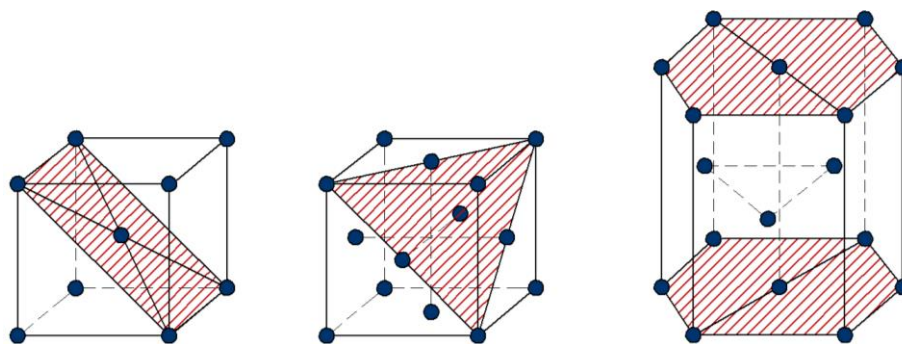


Obr. 4 Řešená součást

2 TEORETICKÉ ZÁKLADY TVÁŘENÍ [1], [3], [6], [7], [8]

2.1 Fyzikální podstata tváření [1], [3], [6], [9]

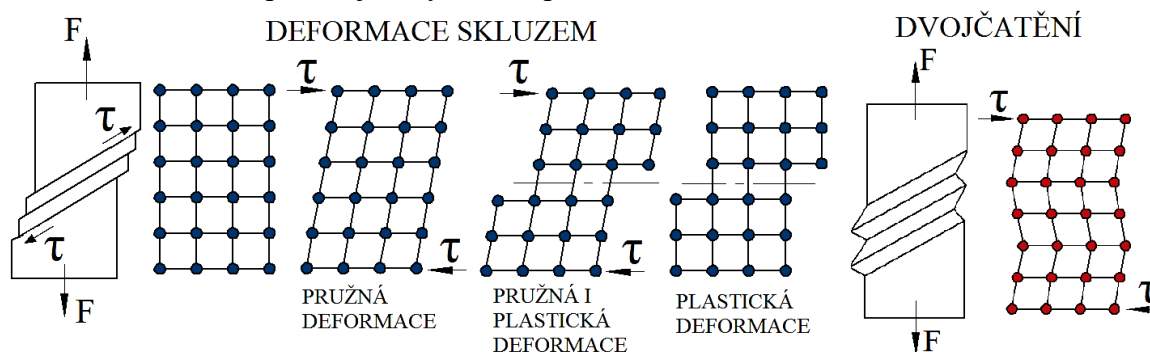
Pro krystalickou strukturu kovů z hlediska uspořádání atomů v pevných látkách je přirozeným stavem uspořádání v krystalové mřížce, která je charakteristická svým pravidelným geometrickým rozložením. Technické kovy krystalizují převážně v soustavě krychlové (prostorově středěná a plošně středěná mřížka atomů) nebo šesterečné (hexagonální mřížka) (viz obr. 5). Na krystalické stavbě závisí magnetické, elektrické, tepelné i mechanické vlastnosti kovů.



Obr. 5 Krystalové mřížky kovů: prostorově středěná (vlevo), plošně středěná (uprostřed), šesterečná (vpravo) [1]

Změna tvaru tělesa, která nastane působením vnějších nebo vnitřních sil, aniž by došlo k porušení materiálu se nazývá deformace. Každou plastickou (trvalou) deformaci předchází vždy deformace elastická (pružná). Elastická deformace je charakteristická tím, že po odstranění působení vnějšího zatížení nastane návrat materiálu do výchozího stavu. U plastické deformace je hlavním znakem nevratnost děje, avšak krystalická struktura kovu zůstává zachována. Součet všech hodnot plastické deformace při tváření, tedy velikost změny tvaru tělesa, se označuje pojmem přetvoření.

Jsou rozeznávány dva hlavní typy mechanismů plastické deformace: dvojčatění a skluz (obráz. 6). Dvojčatění je mechanismus, který způsobuje plastickou deformaci při vysokých deformačních rychlostech a nízkých teplotách. Je charakterizováno vytvořením zrcadlového obrazu, který vznikne přesunem atomů v krystalu o část meziatomární vzdálenosti, což vede k natočení jedné části mřížky vůči druhé kolem roviny symetrie. U polykrystalických kovů dvojčatění zajišťuje orientaci skluzových systémů vzhledem ke skluzovým napětím, což vede k uskutečnění skluzů. Skluz probíhá na základě posuvu dislokací ve skluzových rovinách krystalu, což jsou krystalografické roviny s největší hustotou atomů. Směr skluzu je rovněž stejný se směrem nejvíce obsazeným atomy. Skluz probíhá při natočení kluzové roviny do úhlu o velikosti 45° , v této poloze je smykové napětí maximální.



Obr. 6 Znáznornění pružné a plastické deformace skluzem a dvojčatěním [1]

S rostoucím stupněm deformace dochází ke změně tvaru zrn, která se postupně prodlužují ve směru největší deformace, až se z nich stanou protažená vlákna o malých příčných rozměrech. Také krystalová mřížka, která má před tvářením náhodnou orientaci, získá plastickou deformací orientaci usměrněnou. Toto usměrňování a změny tvaru zrn se označují jako deformační textura, jejíž vznik se projeví anizotropií vlastností polykrystalického materiálu, což je změna mechanických vlastností v různých směrech zatěžování.

Během procesu přetvoření může dojít i k nežádoucímu porušení spojitosti materiálu vznikem trhlin nebo ke kompletní destrukci tvářeného tělesa. Každému porušení předchází vždy nestabilní místní plastické deformace. Vzniká křehký nebo tvárný lom. Křehkému lomu předchází pružné a mikroplastické deformace. Tvárnému lomu předchází makroplastické deformace.

Ve skutečnosti u reálných kovů a slitin není mřížka dokonalá, ale obsahuje velké množství různých typů poruch. Tyto poruchy se zásadně podílejí na mechanických vlastnostech daných materiálu. Z obecného pohledu poruchy mřížky vznikají v primární (metalurgické) fázi přípravy a poté při technologii zpracování kovů a slitin. Podle tvaru a velikosti neuspořádanosti atomů v krystalografických mřížkách jsou známy čtyři druhy poruch: bodové, čárové, plošné a prostorové. Z hlediska teorie plastických deformací jsou nejvýznamnější poruchy čárové – dislokace.

2.2 Zákonů plastické deformace [1], [3], [9]

Základní zákonitosti, kterými se řídí tvářecí procesy mají velmi významnou roli pro rozbor technologií tváření. Mezi tyto zákonitosti patří:

- *Zákon stálosti objemu* – je založen na předpokladu nestlačitelnosti kovů. Objem tvářeného tělesa před přetvořením je roven objemu po přetvoření.
- *Zákon nejmenšího odporu* – každý bod tvářeného tělesa si pro svůj pohyb vybere ze všech možných směrů pohybů směr nejmenšího odporu.
- *Zákon stálosti potenciální energie změny tvaru* – nezávisle na schématu napjatosti je velikost měrné potenciální energie nutné na uskutečnění trvalé změny tvaru tělesa konstantní pro dané podmínky tváření.
- *Zákon podobnosti* – pokud dvě tvářená tělesa splňují podmínky geometrické, mechanické a fyzikální podobnosti, jsou podobná.
- *Zákon maximálních smykových napětí* – v krystalografických rovinách skloněných pod úhlem o velikosti 45° působí maximální smykové napětí.
- *Zákon odpružení (odtížení) po trvalé změně tvaru* – při zatížení tělesa dochází nejprve k pružné deformaci, poté k plastické. Po odlehčení (odstranění zatížení) dojde k odpružení a výsledná změna tvaru odpovídá pouze plastické deformaci.
- *Zákon přídavných napětí* – u skutečných tvářecích procesů vznikají lokální nerovnoměrné napjatosti a tím i nerovnoměrné deformace způsobené různými vlivy. V důsledku těchto vlivů vznikají v tělese tzv. přídavná napětí, která působí vždy při procesu tváření.
- *Zákon tření* – tření mezi materiálem polotovaru a nástrojem je jeden ze základních jevů při tváření, protože na něm závisí volba stroje z hlediska potřebné tvářecí síly. Je rozlišováno několik druhů tření: suché, mezní, smíšené, hydrodynamické.

2.3 Odpory při tváření [3]

Aby nastala požadovaná tvarová změna materiálu technologií tváření, je nutné překonat odpor materiálu proti plastické deformaci. V praxi je důležitá znalost hodnot deformačních odporů pro návrh technologického postupu. Tyto hodnoty je možné získat z křivek deformačních odporů. Křivky deformačních odporů se zjišťují pýchovací zkouškou. Tato zkouška probíhá za dané teploty ve zvoleném rychlostním intervalu. Nejčastěji jsou uvažovány základní typy odporů:

Deformační technologický odpor vyjadřuje souhrn napětí v deformovaném materiálu, která jsou orientována proti působení vnějších sil. Jedná se o součet hodnot přirozeného přetvárného odporu a pasivních odporů.

Přirozený přetvárný odpor působí proti zatížení vnějších sil za podmínek jednoosého stavu napjatosti a závisí na chemickém složení, struktuře materiálu, teplotě, rychlosti a velikosti deformace.

Pasivní odpory – nejedná se pouze o tření, ale i geometrii tvářené součásti, vliv nerovnoměrného rozložení napětí, rychlost deformace.

Deformační odpor skutečný vyjadřuje napětí, které je nutné překonat při tváření v konkrétních technologických podmínkách.

2.4 Zpevnění a odpevnění [1], [3], [6]

Během tváření kovů probíhá v materiálu zpevňování a odpevňování. Zpevnění se projevuje rostoucím odporem materiálu vůči přetvoření a je doprovázeno změnou jeho mechanických vlastností. Z měkkých a tvárných kovů se s rostoucím stupněm přetvoření stávají kovy tvrdší a pevnější. Dochází k poklesu tažnosti, kontrakce a vrubové houževnatosti, zároveň však vzrůstá pevnost a tvrdost. Tohoto se často využívá u hotových výrobků jako jsou například tyče, dráty, trubky, plechy, pásy, atd. Při tváření za studena je deformační zpevnění převládající proces.

Deformační odpevnění je částečné nebo úplné odstranění příčin zpevnění, závislé na čase a teplotě. Odpevnění může probíhat současně se zpevňováním s určitým časovým zpožděním nebo po tváření při ohřevu materiálu. Tato metoda vrací kovu jeho původní vlastnosti a provádí se z důvodu dosažení optimálních fyzikálních podmínek v materiálu po tváření. Dalším důvodem je zabránit vyčerpání plasticity materiálu při dalších tvářecích operacích.

Základní procesy odpevnění po plastickém přetvoření jsou zotavení s polygonací a rekrytalizace.

Zotavení. Je to soubor procesů, ke kterým dochází ve vnitřní stavbě deformovaného krystalu při teplotách 0,25 – 0,3 teploty tavení. V průběhu zotavení se postupně vytrácejí bodové poruchy a dochází k částečnému snížení hustoty dislokací a především k jejich přeuspořádání, což vede k postupnému zmenšování pevnosti, tvrdosti a snížení zbytkových napětí. Za určitých podmínek se dislokace uvnitř zrn shromažďují tak, že tvoří stěny subzrn (buněk), ve kterých se dislokace v podstatě nevyskytují. Na řezu tato subzrna vypadají jako mnohoúhelníky (polygony), z tohoto důvodu se tato fáze zotavení označuje jako polygonace.

Rekrytalizace. Probíhá při teplotách 0,35 – 0,45 teploty tavení a dochází ke změně mechanických i fyzikálních vlastností. Materiál tímto procesem dosahuje svého výchozího stavu, avšak v důsledku rovnoměrné struktury po tváření může nastat, že jeho vlastnosti získané rekrytalizací jsou dokonce lepší než původní. Dochází ke vzniku zárodků nedeformovaných zrn krystalické mřížky. Tyto zárodky pak postupně rostou až vznikne nová struktura nedeformovaných zrn. S rostoucí teplotou a dobou žíhání dochází k růstu rekrytalizačních zrn. Růst zrna probíhá migrací hranic větších zrn rostoucích na úkor zrn malých. Během rekrytalizace výrazně klesá pevnost a tvrdost a roste tažnost materiálu.

2.5 Deformační stárnutí [3], [6]

Z fyzikálního hlediska je způsobeno sloučeninami dusíku s kovy na hranicích zrn a kluzných rovinách. Atomy uhlíku a dusíku mají snahu se dostat do energeticky nejvýhodnější polohy a přesunují se do okolí dislokací, kde se hromadí. Dusík má při teplotě 20 °C asi dvacetinásobně větší podíl vlivu na stárnutí než uhlík. Proces stárnutí je charakteristický pro neuklidněné oceli s obsahem uhlíku pod 0,1 %. V závislosti na čase a teplotě se mění mechanické vlastnosti kovu, dochází k poklesu tažnosti a ke vzniku ostré horní meze kluzu. Mez kluzu materiálu se zvyšuje s rostoucí rychlostí deformace (zatěžování) a tento růst je intenzivnější než růst meze pevnosti, což vede ke zhoršení tvárnosti za studena.

Deformační stárnutí je možné odstranit nebo snížit různými způsoby. Nežádoucí vliv stárnutí na tvařitelnost lze odstranit snížením obsahu dusíku v oceli (chemicky ho vázat na prvky s vyšší afinitou – hliník, titan, vanad). Dále je možné k eliminaci stárnutí použít nějakou z metod tepelného zpracování (například normalizační žíhání) nebo provést tváření za studena k uvolnění dislokací, například válcováním na válcovacích stolicích nebo střídavým ohybem na rovnacích kladkách. Takto lze dosáhnout odstranění skluzové prodlevy a materiál renovovat z hlediska tvařitelnosti. Poslední možností zamezení deformačního stárnutí je snížení teploty a doby skladování.

3 OBJEMOVÉ TVÁŘENÍ ZA STUDENA [2], [3], [8], [10], [11], [12], [13], [14]

Objemové tváření získalo ve druhé polovině minulého století široké uplatnění při výrobě především symetrických součástí, protože má oproti obrábění, u kterého dochází k odstranění velkého množství odpadního materiálu ve formě třísek nebo jiným známým výrobním metodám, řadu výhod. Jako zásadní výhody objemového tváření lze označit vysokou úsporu výrobního materiálu neboli vytěžování (využití až 95 %), snížení výrobních časů, zvýšení produktivity, snížení výrobních nákladů a zlepšení kvality výrobků.

Objemové tváření za studena se provádí za teplot výrazně nižších, než je rekrystalizační teplota. V průběhu technologických operací probíhá proces zpevňování a tvoří se deformační textura, což vede ke ztrátě plasticity materiálu. V porovnání s jinými výrobními metodami se objemové tváření vyznačuje působením všestranné tlakové prostorové napjatosti, čímž se vytváří podmínky pro velké trvalé deformace, aniž by došlo k porušení soudržnosti materiálu. Tím jsou dány předpoklady pro maximální využívání hmoty výchozího polotovaru a zvýšení jeho mechanických vlastností. Po přetvoření se materiálu zvýší mez kluzu a pevnost, tudíž je možné v některých případech pro daný účel použít méně hodnotný výchozí materiál, tj. materiál o nižší výchozí pevnosti.

Výrobek vytvořený technologií objemového tváření za studena (obr. 7) má významné metalurgické vlastnosti jako je například nepřerušovaný průběh vláken, zvýšení meze únavy materiálu vlivem zpevnění a současně, v porovnání například s technologií třískového obrábění, vznik příznivého systému vnitřního napětí.

Proces vzniku výrobku objemovým tvářením, při kterém se podstatně mění tvar polotovaru, je někdy navržen jako kombinace různých základních způsobů objemového tváření. Tyto hlavní způsoby objemového tváření jsou protlačování a pěchování.



Obr. 7 Rotační součást tvářená za studena [19]

3.1 Protlačování [2], [3], [10], [11]

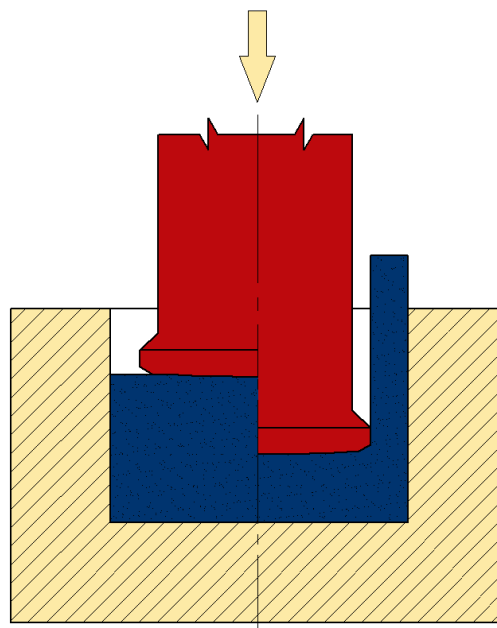
Protlačování kovů za studena je progresivní technologie, při které je dosaženo minimálního odpadu výchozího materiálu polotovaru. Nedochází k přerušení průběhu vláken a zvyšuje se mez kluzu a pevnost materiálu. Významná výhoda protlačování je vysoká kvalita povrchu součástí, je dosaženo drsnosti povrchu až Ra 0,8. Další výhodou je vysoká přesnost, která může dosahovat výrobních tolerancí IT6 až IT8, což je řádově přesnost $\pm 0,05$. Rozeznávají se čtyři hlavní způsoby protlačování podle směru a způsobu přemísťování (tečení) materiálu vzhledem k protlačovacímu nástroji:

- zpětné,
- dopředné,
- stranové,
- sdružené.

3.1.1. Zpětné (protisměrné) protlačování [2], [3], [10]

Výchozím polotovarem je kalota kruhového průřezu, jejíž výška je zpravidla větší než polovina jejího průměru, ale je možné vyrábět i součásti jiného pravidelného nebo nepravidelného tvaru. Polotovar je vložen do uzavřené průtláčnice a tlakem průtláčnicku je přiveden do plastického stavu. Posuv materiálu je proti pohybu průtláčnicku, materiál se přemísťuje mezerou mezi stěnou průtláčnice a průtláčnicku (viz obr. 8). Tento způsob se používá většinou na výrobu součástí ve tvaru kalíšku, se dnem i beze dna, používaných například v elektrotechnickém, strojírenském a spotřebním průmyslu jako jsou pouzdra, kryty, víčka, hydraulické a pneumatické válce, duté pístní tyče, apod.

Na obr. 9a nahoře je zobrazen v řezu typický produkt zpětného protlačování, na spodním snímku je možno vidět tvar protlačovacího nástroje. Na obr. 9b nahoře je fotografie polotovaru ustřiženého z tlustostěnné tyče, ze kterého je zpětným protlačením vyroben díl dole, který slouží jako pouzdro na cívku startéru osobního automobilu. Na obr. 9c je ukázka, že danou technologií je možné vyrábět i složitější tvary protlačků a na obr. 9d je tlustostěnný kalíšek, na kterém je zřetelná vrstva maziva po mýdlování.



Obr. 8 Schéma zpětného protlačování [2]



Obr. 9 Výrobky zpětného protlačování

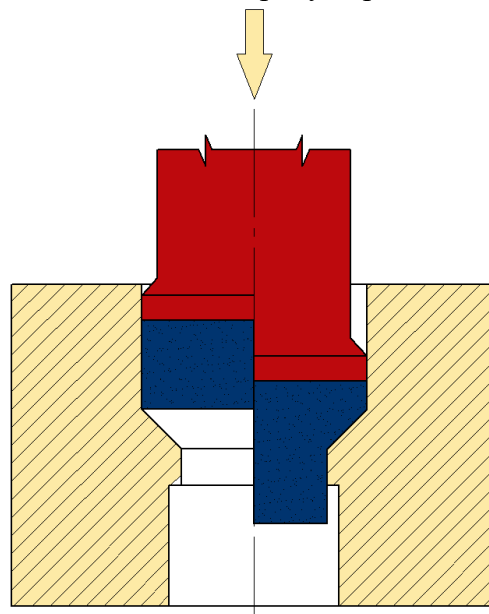
3.1.2. Dopředné (sousedné) protlačování [2], [3], [10]

Výchozím polotovarem může být dutý materiál jako kalíšek (vyrobený například zpětným protlačováním), prstenec z tlustostěnné bezešvé trubky, popřípadě drátu nebo plný špalík. Při dopředném protlačování teče materiál ve směru souhlasném se směrem pohybu průtlačníku. Konečný tvar dává průtlačku průtlačnice (obr. 10).

Průtlačky jsou buď dutá nebo plná tělesa, většinou kruhového průřezu, je možné však vyrábět i součásti jiného pravidelného tvaru. Používá se pro výrobu součástí čepového tvaru, jako šrouby, svorníky, nýty, pouzdra, trubky, hřídele (obr. 11).



Obr. 11 Výrobky dopředného protlačování



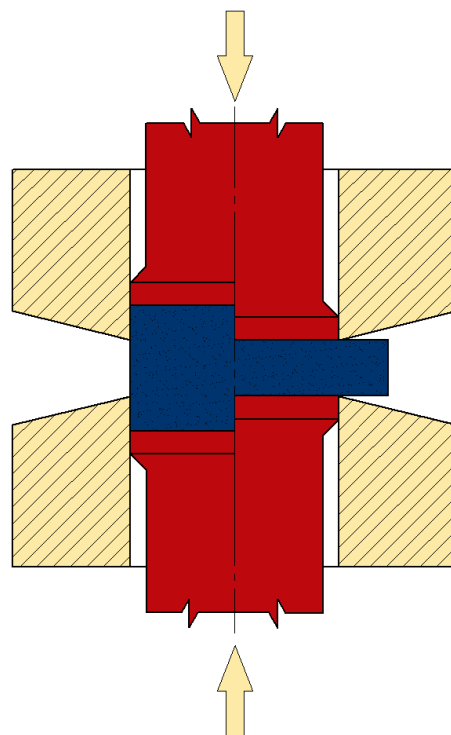
Obr. 10 Schéma dopředného protlačování [2]

3.1.3. Stranové protlačování [2], [3], [10]

Liší se od ostatních způsobů protlačování směrem hlavního přemísťování materiálu. Polotovár je umístěn do dělené průtlačnice a uzavřen průtlačníky z obou stran tak, že tečení materiálu je možné pouze ve směru kolmém k podélné ose polotovaru, tedy ve směru radiálním (obr. 13). Tento způsob protlačování bývá využíván ke změně průřezu určité části výlisku, například k tvorbě výstupků po obvodě, osazení (obr. 12) a k tvorbě žeber.



Obr. 12 Výrobek stranového protlačování

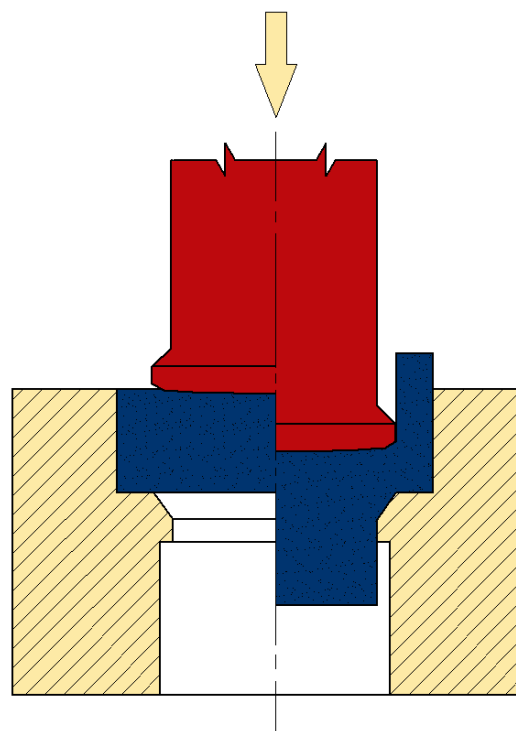


Obr. 13 Schéma stranového protlačování [2]

3.1.4. Sdružené (obousměrné, kombinované) protlačování [2], [3], [10]

Sdružené protlačování se provádí jako kombinace zpětného a dopředného protlačování. Materiál polotovaru se přemísťuje proti směru pohybu průtlačníku, vytváří tak stěny duté části průtlačku, a zároveň ve směru pohybu průtlačníku a vyplňuje dutinu průtlačnice (viz obr. 14). Pro dopředný a pro zpětný způsob protlačování je nutné uvažovat rozdílné podmínky posuvu kovu. Z tohoto důvodu je zavedena zásada, že ve spodní části výrobku (v části, kde materiál teče sousledně s pohybem průtlačníku) je zvolen menší stupeň přetvoření než v horní části, čímž je dosaženo vyšší kvality součásti.

Výchozím polotovarem může být tlustostěnný prstenec, špalík nebo děrovaný rondel. Kombinovaného protlačování se využívá pro výrobu různě profilovaných součástí nebo výlisků, u nichž je kombinace kalíškování a protlačování plné části. Dále se využívá u výrobků, kde je potřebná hloubka dutiny v jedné části výlisku menší než ve druhé. U komplikovanějších případů (složitější tvar průtlačku) je ekonomicky výhodnější zvolit dvě tvářecí operace samostatně nebo použít speciální tvářecí stroje s funkcí dvou protiběžných průtlačníků. Ukázky výrobků sdruženého protlačování jsou na obr. 15.



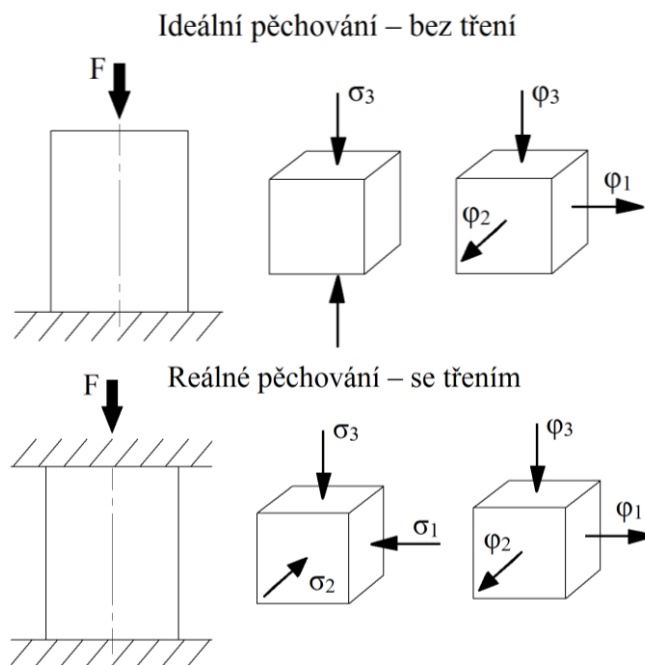
Obr. 14 Schéma sdruženého protlačování [2]



Obr. 15 Výrobky sdruženého protlačování

3.2 Pěchování [1], [2], [8], [12], [13], [15]

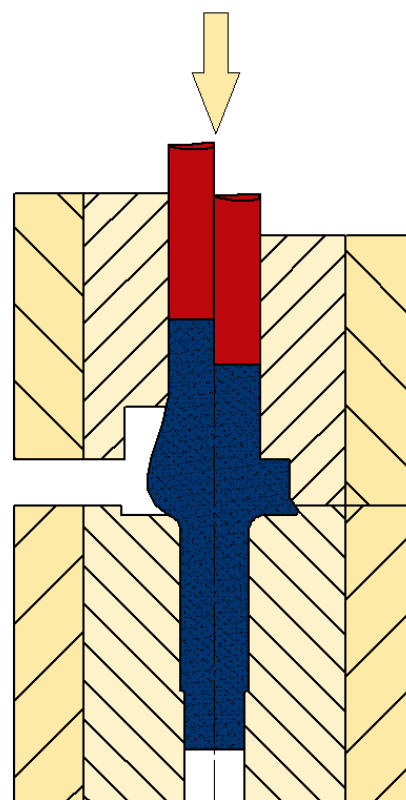
Pěchování je jednou ze základních technologií objemového tváření za studena. Je to tvářecí operace, při níž se na základě stlačení výchozího polotovaru mezi rovnoběžnými rovinami dosahuje vytvoření větších průřezů součásti, čímž většinou dojde ke snížení výšky součásti. V průběhu pěchování dochází v celém objemu materiálu ke vzniku nerovnoměrných deformací v důsledku tření, které vzniká uvnitř tělesa a zároveň i mezi tělesem a nástrojem. Jako modelový případ (avšak v praxi nedosažitelný, protože je při této úvaze zanedbáno tření) slouží stav deformace, u kterého má přetvoření stejnou hodnotu ve všech místech tělesa. Tento stav je charakterizován jednoosým napětím a prostorovým průběhem deformace a nazývá se **ideální pěchování** (obr. 16). Při pěchování v praxi se během tvářecí operace projevuje vliv tření a nastává druhý případ – **reálné pěchování**, které je charakterizováno víceosým napětím a prostorovou deformací.



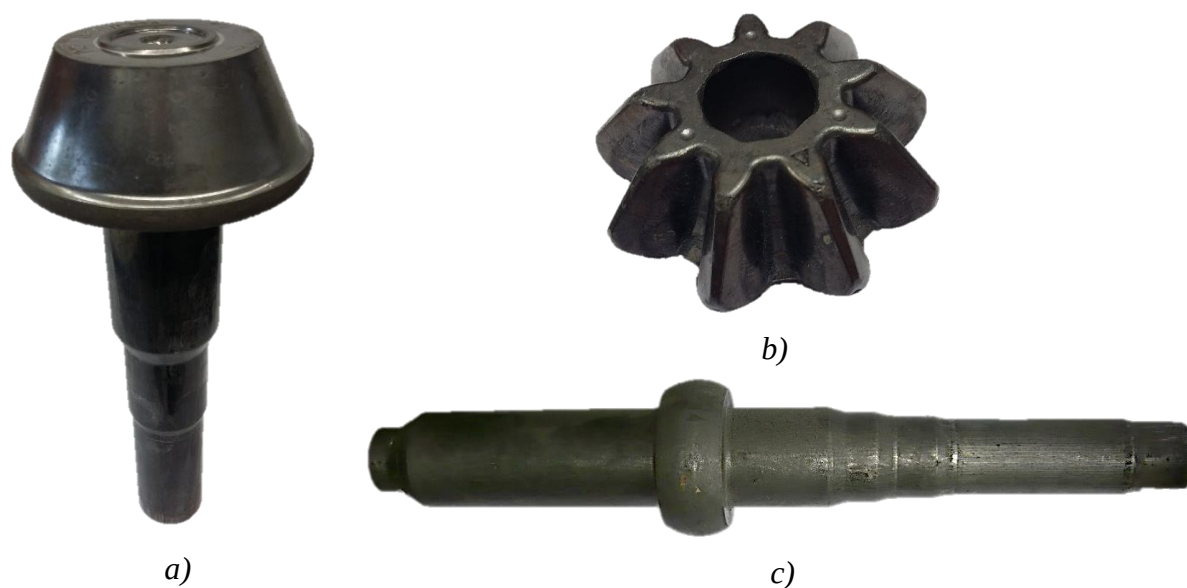
Obr. 16 Schémata deformace při pěchování [1]

Pěchování se provádí jako volné či uzavřené. Při volném pěchování je materiál umístěn volně mezi rovnoběžnými rovinami. Uzavřené pěchování se provádí v uzavřeném pěchovníku, který tvoří dutinu odpovídající tvaru pěchované součásti (viz obr. 17).

Největší využití má tento způsob tváření při výrobě různých tvarových osazení a především menších (spojovacích) součástí čepového tvaru jako jsou šrouby (hlavy šroubů), čepy atd. Lze však pěchovat i větší výlisky jako jsou například součásti převodovek, hřídele atd. Na obr. 18a je znázorněna součást do diferenciálu osobního automobilu, u které je pěchována kuželová hlava. Na obr. 18b je kuželový pastorek převodovky s přímými zuby, který je vyroben pěchováním materiálu za studena v uzavřeném nástroji. Obr. 18c znázorňuje pěchovanou hřídel. Často se ve výrobním postupu součásti volí kombinace metody pěchování s metodou protlačování, kdy je pěchování jedna tvářecí operace.



Obr. 17 Schéma uzavřeného pěchování [2]



Obr. 18 Výrobky zhotovené pēchováním za studena

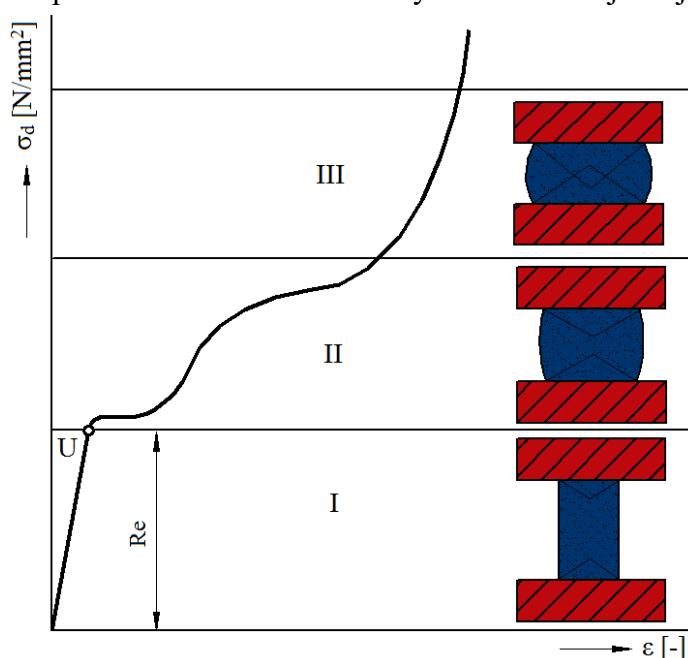
Pēchovací zkouška

Pēchovací zkouška se provádí především z důvodu vyhodnocení tvařitelnosti ocelí i neželezných kovů. Dále může sloužit například k určení mechanických vlastností jako je přetvárný odpor při pēchování, horní a dolní mez kluzu v tlaku či mez pevnosti v tlaku. Výsledkem pēchovací zkoušky je pracovní diagram pro tlakovou zkoušku (obr. 19).

Tento diagram má tři fáze. První fáze je lineární, materiál se snaží odolat tlaku, v důsledku čehož se tvoří tlakové kužele. Během druhé fáze slabě vzroste deformační napětí. Ve třetí fázi se k sobě přiblíží tlakové kužele, což vede k prudkému nárůstu napětí. Třetí fáze nastává pouze u materiálů s dobrou tvařitelností, zatímco u křehkých materiálů nastává pouze první fáze, tedy lom aniž by došlo k plastické deformaci.

Pracovní diagram pēchovací zkoušky udává:

- mez kluzu v tlaku R_e [MPa],
- mez pevnosti σ_d [MPa],
- stlačení Δh [mm],
- poměrné stlačení ε [-],
- logaritické stlačení φ [-].



Obr. 19 Pracovní diagram pēchovací zkoušky [13]

3.3 Materiály vhodné k protlačování [10], [11], [14], [16]

3.3.1 Volba a příprava materiálu [2], [3], [14]

Volba materiálu je velice důležitá a v praxi se často volí ekonomicky výhodný materiál, který zajistí požadovanou funkčnost vyráběné součásti. Pro správnou volbu materiálu je také vhodné přihlídnout ke konečnému tvaru vyráběné součásti.

Ocel je nejrozšířenější materiál ve strojírenství a také nejčastěji používaným materiálem k protlačování. Používají se různé druhy ocelí, které jsou schopny deformace za studena, od nízkouhlíkových až po nástrojové. Žádoucími vlastnostmi ocelí vhodných k objemovému tváření jsou nízká mez kluzu, dostatečná tvárnost, malý sklon ke zpevnění a také jemnozrnná struktura s minimálním výskytem příměsí a vad. Vysoká tvárnost za studena je dána krystalovou strukturou kovu a určuje se pýchovací zkouškou. Mezi součástmi a nástrojem je povolen maximální přípustný tlak, který také omezuje výběr materiálu. Protlačování u ocelí je vhodným způsobem výroby hlavně u větších výrobních sérií.

Taktéž neželezné kovy a jejich slitiny je možno protlačovat za studena. Nejlépe se protlačují čisté kovy, vhodné pro výrobu tenkostěnných a tvarovaných nádob, které dosahují dobré jakosti a mají čistý povrch. Slitiny jsou charakteristické rychlým tvrdnutím a při jejich tváření dochází k výraznému opotřebování protlačovacího nástroje. Proto se používají pouze na výrobu tlustostěnných součástí jednou výrobní operací. Běžné neželezné protlačované materiály jsou hliník, měď, olovo, cín, nikl, zinek, stříbro a různé slitiny, zejména hliníkové, mosaz, atd. Z neželezných kovů je nejčastěji protlačován hliník, jehož produkty mají lesklý a čistý povrch dobré jakosti.

Téměř zpravidla se jako polotovary při protlačování používají tyče, které je před samotnou výrobou nutné upravit. To se provádí různými způsoby, jako je loupání nebo rovnání tyčí, dělení na špalíky, tepelné zpracování, odstranění nečistot. Pro dosažení lepších podmínek při protlačování se provádí některé povrchové úpravy, na základě kterých dojde ke snížení tření. Toto vede ke zlepšení kvality povrchu výrobku a zároveň ke zvýšení životnosti nástroje, u kterého se tím sníží opotřebení. Mezi tyto úpravy se řadí odmaštění v alkalických lázních, chemické čištění povrchu jako je moření ponorem v lázni v některé anorganické kyselině (kyselina sírová, chlorovodíková, v některých případech fosforečná). Moření je velmi účinný způsob chemického čištění, při kterém se odstraňují okraje, korozní poruchy a vyšší drsnost povrchu kovu, popřípadě je tímto způsobem možné kvalitně odstranit i naleptání či různé zmetkovité povrchové úpravy jako například zinkované nebo chromované povlaky. Takto materiál získá hladký, kovově čistý povrch bez nečistot. Další úpravou povrchu je fosfátování, což je další typ chemické úpravy povrchu oceli, který má však velký význam v technologii tváření za studena, jelikož zajišťuje snižování tření. Provádí se za účelem zvýšení odolnosti materiálu vůči korozi a především kvůli zlepšení přilnavosti a zvětšení přilnavé povrchové plochy, na kterou se poté nanáší mazací prostředky. Na povrchu kovu se vytváří nerozpustná krystalická vrstva, vznikají buňky podobné včelímu plástu, do kterých se poté mazivo vsakuje. Využívají se různé druhy fosfátů (manganatý, zinečnatý, vápenozinečnatý, železitý, atd.) podle funkce vyráběné součásti. Materiál se suší a poté následuje mazání, přičemž mazivo může být olejové (i rostlinné oleje), mýdlové nebo tuhé, taktéž živočišné a rostlinné tuky. V technologii tváření za studena a zvláště při protlačování se často používá speciální mazivo, tzv. molyko, které je obsaženo v poslední lázni na lince povrchových úprav. Jedná se o tuhé mazivo ve formě jemnozrnného prášku šedočerné barvy, které má výborné mazivostní vlastnosti a je velmi odolné vůči vysokým tlakům. Je vyrobeno na bázi drceného sulfidu molybdeničitého, neboli molybdenitu, což je hornina vytěžovaná v Coloradu v USA. Na základě své vrstevnaté struktury má po drcení sulfid molybdeničitý ve formě prášku vynikající mazací vlastnosti, díky čemuž má molyko údajně nejlepší vlastnosti ze všech běžně dostupných tuhých maziv.

3.3.2 Defekty při tváření [11]

Během tváření mohou vznikat různé vady na materiálu výrobku. Příčinou může být chyba při výrobě, opotřebení a porušení nástroje nebo selhání materiálu výrobku. Mohou vznikat různé povrchové praskliny a trhliny na vnitřních či vnějších plochách nebo naraženiny (obr. 20a). Vnitřní povrchové trhlinky vznikají z důvodu překonání přípustné deformace při tváření. V takovém případě je nutné rozdělit proces na více operací (rozložení deformace) a zařadit alespoň jedno mezioperační žihání. Dalším možným defektem jsou praskliny na vnějším povrchu součásti, které se táhnou pod úhlem 45° (obr. 20b). Tyto praskliny jsou způsobené vyčerpanou tvařitelností při pěchování, kdy materiál již nelze dále tvářet. Je nutné tento problém vyřešit například zvětšením vstupního průměru polotovaru. Na vnějším povrchu součásti se mohou také tvořit trhlinky, jejichž příčinou vzniku může být špatné mazání. Pokud je použito příliš mnoho tekutého maziva, které není schopno uniknout z nástroje během protlačování, dojde k jeho stlačení a následné explozi, která způsobí vznik těchto defektů.



a) naraženiny

b) trhliny pod úhlem 45°

c) vnější trhlina na osazení

Obr. 20 Defekty při tváření

3.3.3 Základní výpočty objemového tváření za studena [1], [3], [11]

Z hlediska průběhu tváření je nutné provést základní výpočty a rozbor výroby.

Protlačovací síla závisí na:

- chemickém složení a mechanických vlastnostech materiálu,
- přípravě polotovaru před tvářením, především mazání,
- geometrii nástroje,
- velikost redukce (na větší redukci je nutná větší síla),
- tloušťka stěny dutých součástí,
- druh tvářecího stroje.

Stupeň přetvoření je omezen zpevněním materiálu. Z tohoto důvodu je nutné zachovat určitou hodnotu přetvoření, aby nenastalo porušení celistvosti tvářené součásti. Přetvoření se vyjadřuje buď logaritmickým přetvořením ϕ nebo poměrnou změnou průřezu ε v procentech. Orientační stupně přetvoření na jeden tvářecí proces uvádí tab. 1. V praxi se používá přetvoření do 80 %.

Tab. 1 Stupně přetvoření na jednu operaci. [3]

ZPŮSOB PROTLAČOVÁNÍ		OCEL	HLINÍK	MĚĎ
Zpětné	φ	50 - 140	160 - 450	120 - 200
	ε [%]	40 - 70	80 - 99	70 - 85
Dopředné	φ	92 - 300	160 - 480	120 - 300
	ε [%]	60 - 95	80 - 99	70 - 95

Dopředné protlačování:

- Logaritmické přetvoření:

$$\varphi = \ln \frac{S_0}{S_1} = \ln \frac{D_0^2}{D_1^2} [-] \quad (1)$$

- Stupeň přetvoření:

$$\varepsilon = \left(\frac{S_0 - S_1}{S_0} \right) \cdot 100 [\%] = \frac{D_0^2 - D_1^2}{D_0^2} \cdot 100 [\%] \quad (2)$$

- Protlačovací síla:

$$F = \frac{S_0 \cdot Re \cdot \varphi}{\eta_F} [N] \quad (3)$$

Zpětné protlačování:

- Logaritmické přetvoření:

$$\varphi = \ln \frac{D_0^2}{D_0^2 - D_1^2} = \ln \frac{S_0}{S_0 - S_1} [-] \quad (4)$$

- Stupeň přetvoření:

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{S_0 - S_1}{S_0} \right) \cdot 100 [\%] = \frac{D_1^2}{D_0^2} \cdot 100 [\%] \quad (5)$$

- Protlačovací síla:

$$F = \frac{S_0 \cdot Re \cdot \varphi}{\eta_F} [N] \quad (6)$$

kde:

S_0 [mm²] - plocha styku nástroje s materiálem před tvářením

S_1 [mm²] - plocha styku nástroje s materiálem po tváření

D_0 [mm] - průměr před tvářením

D_1 [mm] - průměr po tváření

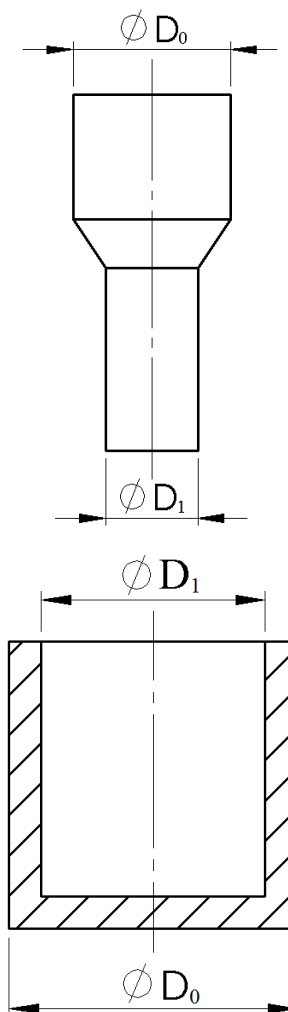
F [N] - tvářecí síla

Re [MPa] - mez kluzu

φ [-] - logaritmické přetvoření

η_F [-] - deformační účinnost změny tvaru; dopředné protlačování: $\eta_F = (0,6 - 0,8)$,

zpětné protlačování: $\eta_F = (0,5 - 0,7)$



Obr. 21 Schéma dopředného a zpětného protlačování [3]

Mechanická práce:

Dopředné i zpětné protlačování:

$$W = F \cdot l \cdot x \text{ [J]} \quad (7)$$

kde:

$$l = (h_0 - h_1)$$

$$x = \frac{F_m}{F_{max}} \approx 0,6$$

W [J] - práce

F [N] - tvářecí síla

l [mm] - posunutí

x - faktor procesu ($x = 1$)

F_m [N] - střední (průměrná) síla - odečteno z grafu závislosti síly na dráze nástroje

F_{max} [N] - maximální síla

h_0 [mm] - výchozí výška polotovaru

h_1 [mm] - výška dna

Pěchování

- Logaritmické přetvoření:

$$\varphi = \ln \frac{h_0}{h} = \ln \frac{D_2^2}{D_0^2} [-] \quad (8)$$

- Stupeň přetvoření:

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h}{h_0} [\%] \quad (9)$$

kde:

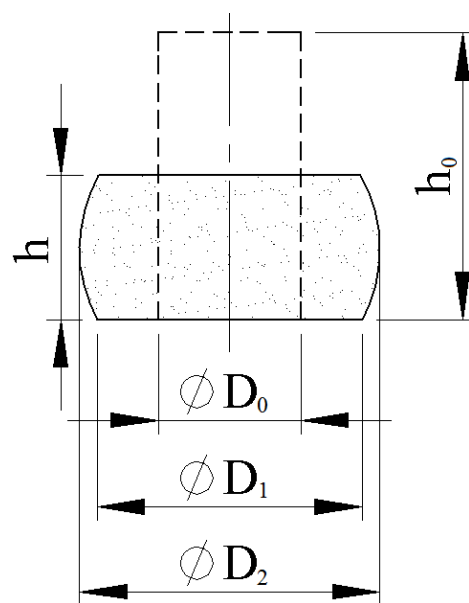
h_0 [mm] - výchozí výška

h [mm] - výška po pěchování

D_0 [mm] – průměr polotovaru

D_1 [mm] – průměr stykové plochy

D_2 [mm] – průměr v nejširším místě soudečku po pěchování



Obr. 22 Schéma pěchování [12]

Pro vyjádření napětí při daném přetvoření lze použít tzv. Ludwik-Hollomonův vztah:

$$\sigma = K \cdot \varphi^n \text{ [MPa]} \quad (10)$$

kde: K – pevnostní koeficient [MPa]

n – exponent deformačního zpevnění

Výsledek napětí se dále užívá ke stanovení velikosti protlačovací síly.

3.4 Nástroje k protlačování [2], [3], [10]

V průběhu procesu protlačování jsou nástroje těžce zatěžovány a zároveň jsou vystaveny střídavým změnám teplot, opakovanému zahřívání a ochlazování. Z důvodu těchto náročných podmínek jsou na materiály nástrojů k protlačování kladeny velmi vysoké požadavky.

Materiál má největší vliv na celkovou životnost nástroje. Musí být velmi odolný vůči tlakovému a rázovému zatížení, musí splňovat dostatečnou houževnatost, vysokou hodnotu tvrdosti a odolnosti proti opotřebení a je zároveň nutné, aby byl dobře obrobitelný. Nejvyšší kvalita materiálu je vyžadována u průtlačníků a průtlačnic, u pěchovníků a pěchovnic a také u vyhazovačů. Nástrojový materiál se volí podle použité tvářecí metody, druhu nástroje a také dle velikosti výrobní série.

Vlastnosti tvářecích nástrojů mají velmi významný vliv v technologii objemového tváření. Těmito vlastnostmi je možné označit stálost, jednoduchost, bezporuchovost, pořizovací a servisní cenu nástroje. Každý tvářený materiál má však jiné chování během tvářecího procesu a to silně ovlivňuje všechny tyto vlastnosti. Tvářecí nástroje musí splňovat vysoké nároky z důvodu velkého zatížení a namáhání, při kterém pracují. Je nutné učinit potřebná opatření, aby se předešlo deformaci nebo prasknutí nástroje.

Z konstrukčního hlediska se proto musí dodržet základní zásady:

- Je zapotřebí zamezit pružení funkčních částí, které nastane kvůli nepřesnosti výlisku, a tím zajistit dostatečnou tuhost nástroje jako celku.
- Nutností je opatřit nástroj vyhazovačem, což je zařízení pro odstraňování výlisků z průtlačnice, čímž se zabráňuje kolizím a poruchám vzniklým neodstraněním výrobku z pracovního prostoru.
- Zásadní k zaručení žádoucí souososti tvářené součásti je dokonalé vedení funkčních částí nástroje.
- Z hlediska zvýšení životnosti a hospodárnosti funkčních částí nástroje je třeba zvolit vhodný stupeň deformace během jednotlivých operací.
- Je nutné zajistit dokonalé mazání a chlazení nástroje v průběhu jeho práce, a to hlavně u strojů, u kterých je polotovár mechanicky vkládán. U protlačování je materiál velmi rychle zahříván a přenáší teplo na funkční části nástroje, tyto je nutno řádně chladit.
- Výhodné je zajistit snadnou a rychlou montáž funkčních částí nástroje, nejlépe mimo pracovní prostor lisu.



a) pro zpětné protlačování



b) pro zpětné protlačování



c) pro drážkové náboje
(vnitřní drážky)

Obr. 23 Ukázky průtlačníků

3.5 Stroje pro tváření [3], [10]

Při technologii tváření za studena je potřeba vyvinout velkou a stálou sílu působící na poměrně dlouhé dráze. Tato síla se nazývá tvářecí síla a na základě jejího působení je dosaženo potřebného přetvoření materiálu. Proto je nutno hodnotu této tvářecí síly uvažovat při výběru vhodného tvářecího stroje.

Tvářecí stroje musí splňovat různé požadavky jako například dlouhé vedení a dostatečný zdvih beranu, vysoký poměr pracovního zdvihu vůči celkovému zdvihu beranu a nejvyšší možný počet zdvihů za minutu. Také musí být zajištěna dostatečná tuhost lisu. Dále je kladen důraz na kvalitní chlazení a mazání. Výhodou stroje je možnost přenastavení zdvihu beranu a samostatně ovladatelný přestavitelný vyhazovač.

Používají se:

1. Mechanické lisy. Jsou významné zejména pro objemové tváření velkých součástí, k jejichž přetvoření je potřeba velká tvářecí síla. Využívají se pro výrobu dílů, jejichž série jsou malé pro použití postupových lisů a k jejichž výrobě stačí nejvýše dvě tvářecí operace. Velké využití mají také pro výlisky, které je třeba mezioperačně tepelně zpracovávat. Žádaná provozní vlastnost mechanických lisů je jejich tuhost, která zvyšuje účinnost tváření. Rychlost beranu je další výhodná vlastnost tohoto typu. Dělí se na:

- Klikové lisy – nejvhodnější k protlačování neželezných kovů.
- Kolenové lisy – vhodné pro nízké součásti z důvodu malého zdvihu.
- Výstředníkové lisy – malá tuhost, použití převážně pro přípravné práce.

2. Hydraulické lisy. Hydraulické lisy je možné používat pro všechny druhy součástí. Tyto stroje jsou vhodné pro větší protlak většinou rozměrných a dlouhých výlisků. Zajišťují stálou sílu v libovolné poloze beranu. Nevýhodou hydraulických lisů je poměrně malá pracovní rychlost a malý počet zdvihů za minutu.

3. Speciální lisy. Jako speciální stroje pro tváření lze zmínit například tvářecí automaty pro hromadnou výrobu. Výrobky se přesouvají pomocí kleštín mezi jednotlivými operacemi. Na základě možnosti použití víceoperačního objemového tváření na daných výrobních strojích a tvářecích postupových automatech je v hromadné výrobě dosaženo zkrácení výrobních časů a zkvalitnění procesu výroby.

4 NÁVRH VÝROBY SOUČÁSTI

4.1 Volba materiálu [17], [18]

Jelikož tato součást pracuje v převodovce automobilu, což je vysoce náročné pracovní prostředí, musí splňovat vysoké pevnostní charakteristiky, s čímž je spojen i důkladný výběr materiálu. Pro řešenou součást byla zvolena legovaná ocel ČSN 16 326 s feriticko-perlitickou strukturou, jejíž chemické složení zobrazuje tab. 2 a mechanické vlastnosti udává tab. 3. Jedná se o nikl-chrom-molybdenovou ocel s vyšší pevností v jádře po kalení, s velmi vysokou prokalitelností, zvýšenou houževnatostí a vysokou odolností proti únavě materiálu. Tato ocel je vhodná pro strojní součásti s cementovaným povrchem. Cementovaná vrstva po tepelném zpracování dosahuje na povrchu tvrdosti 62 až 64 HRC, zatímco jádro cementované součásti je i při relativně vysoké pevnosti značně houževnaté. Využívá se pro vysoce namáhané strojní díly s požadavkem na vysokou pevnost a houževnatost, součásti strojů, motorů a vozidel jako například kola diferenciálů a ozubená kola převodovek.

Tab. 2 Chemické složení [%] oceli 16 326. [18]

S	P	Mo	Ni	Cr	Si	Mn	C
max.0,035	max.0,035	0,25 - 0,35	1,4 - 1,7	1,5 - 1,8	0,15 - 0,4	0,4 - 0,6	0,14 - 0,19

Tab. 3 Mechanické vlastnosti oceli 16 326. [18]

Průměr [mm]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]
d ≤ 11	980	1230 - 1520	9
11 < d ≤ 25	735	980 - 1320	9
25 < d ≤ 50	640	885 - 1080	10
50 < d ≤ 100	490	685 - 980	11

kde: R_{p0,2} – mez kluzu [MPa]
R_m – mez pevnosti [MPa]
A – tažnost [%]

4.2 Technologické výpočty

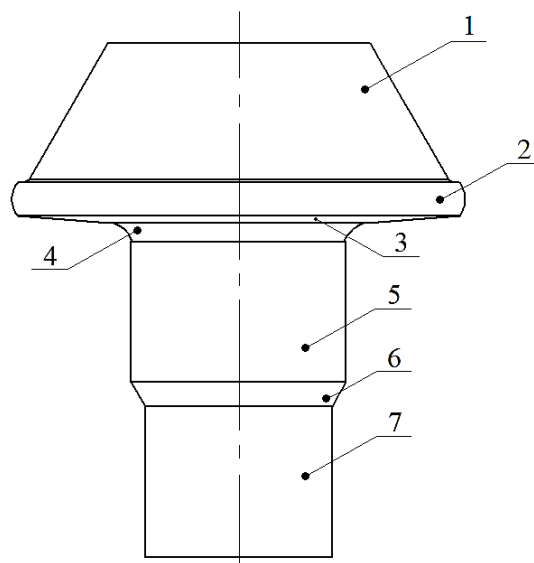
Na základě zákona o stálosti objemu je spočítán celkový objem součásti V_C , z kterého se poté určí objem vstupního polotovaru. Součást je rozdělena na jednotlivá dílčí geometrická tělesa (obr. 24), součet jejich objemů tvoří celkový objem součásti. Výrobek se skládá z jednotlivých válců a komolých kuželů, jejichž objemy jsou vypočteny na základě matematických vztahů. Výsledný výpočet je ověřen pomocí softwaru Solidworks, v němž jsou vytvořeny modely a výkresy.

Objem válce:

$$V_{VÁLEC} = \pi \cdot r^2 \cdot h_V [mm^3]$$

kde:

r je poloměr válce; h_V je výška válce



Obr. 24 Schéma rozdělení součásti

Objem komolého kužele:

$$V_{KUŽEL} = \frac{\pi \cdot h_K}{3} \cdot (r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2) [mm^3]$$

kde:

r_1 je poloměr horní podstavy

r_2 je poloměr spodní podstavy

h_K je výška kužele

Výpočet celkového objemu součásti:

$$V_1 = \frac{\pi \cdot 24}{3} (23,15^2 + 23,15 \cdot 37 + 37^2) = 69\,403,373 \text{ mm}^3$$

$$V_2 = \pi \cdot 38,5^2 \cdot 6 = 27\,939,754 \text{ mm}^3$$

$$V_3 = \frac{\pi \cdot 1,2}{3} (39^2 + 39 \cdot 23 + 23^2) = 3\,703,309 \text{ mm}^3$$

$$V_4 = \frac{\pi \cdot 4}{3} (19^2 + 19 \cdot 23 + 23^2) = 5\,558,524 \text{ mm}^3$$

$$V_5 = \pi \cdot 19^2 \cdot 28 = 31\,755,218 \text{ mm}^3$$

$$V_6 = \frac{\pi \cdot 5}{3} (19^2 + 19 \cdot 16,5 + 16,5^2) = 4\,957,171 \text{ mm}^3$$

$$V_7 = \pi \cdot 16,5^2 \cdot 26 = 22\,231,763 \text{ mm}^3$$

$$V_c = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 + V_6 + V_7 \cong 165\,555 \text{ mm}^3$$

Hmotnost součásti je taktéž ověřena pomocí softwaru Solidworks.

$$m = V_c \cdot \rho = 0,165555 \cdot 7850 = 1299,6 \text{ g} \cong 1300 \text{ g}$$

Výpočet polotovaru:

Na základě platnosti zákona o zachování objemu před a po tváření stanovím základní rozměry polotovaru, tj. průměr a výšku špalíku. Za předpokladu rovnoměrného přetvoření v celé součásti bude vypočítán průměr špalíku.

$$\begin{aligned} \varphi_{HLAVA} &= \varphi_{DŘÍK} \\ \ln \frac{D_4^2}{D_0^2} &= \ln \frac{D_0^2}{D_3^2} \\ \frac{D_4^2}{D_0^2} &= \frac{D_0^2}{D_3^2} \end{aligned}$$

Stanovení středního průměru hlavy D_4 (z výkresu):

$$\text{a) } 78 - 46,3 = 31,7$$

$$\text{b) } 31,7 \cdot \frac{1}{2} = 15,85$$

$$\text{c) } 46,3 + 15,85 = 62,15 = D_4$$

$$D_4^2 \cdot D_3^2 = D_0^4 \rightarrow D_0 = \sqrt[4]{D_4^2 \cdot D_3^2} = \sqrt[4]{62,15^2 \cdot 33^2} = 45,287 \text{ mm}$$

Velikost průměru vstupního polotovaru je výpočtem určena na přibližně 45,3 mm. Do závodu se však dodávají zakázkově objednané tyčové polotovary o průměru 43 mm, které se použijí k výrobě pastorku. Dále je nutné na základě znalosti vztahu pro výpočet objemu válce stanovit výšku h vstupního polotovaru.

$$V_c = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \cdot h \rightarrow h_c = \frac{4 \cdot V_c}{\pi \cdot D_0^2} = \frac{4 \cdot 165\,555}{\pi \cdot 43^2} = 114 \text{ mm}$$

Tyčový polotovar o průměru 43 mm bude připravován dělením na špalíky délky 114 mm.

Výpočet rozměrů před 2. operací:

Objem hlavy:

$$V_{HLAVA} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 = 69\,403,373 + 27\,939,754 + 3703,309 + 5558,524 \\ = 106\,604,96 \text{ mm}^3$$

Objem dřívku:

$$V_{DŘÍK} = V_5 + V_6 + V_7 = 31\,755,218 + 4957,171 + 22\,237,763 = 58\,950,152 \text{ mm}^3$$

Výška spodního dřívku:

$$V_{DŘÍK} = \pi \cdot r_2^2 \cdot h \rightarrow h_{D1} = \frac{V_{DŘÍK}}{\pi \cdot r_2^2} = \frac{58\,950,152}{\pi \cdot 19^2} \\ = 51,979 \approx 52 \text{ mm}$$

Výšku středního dřívku o průměru 43 mm volím 29 mm z důvodu zjednodušení výroby nástrojů:

$$h_{Dstř.} = 29 \text{ mm}$$

Objem středního dřívku:

$$V_{Dstř.} = \pi \cdot 21,5^2 \cdot 29 = 42\,113,835 \text{ mm}^3$$

Objem nepředpěchované hlavy (Ø 43 mm):

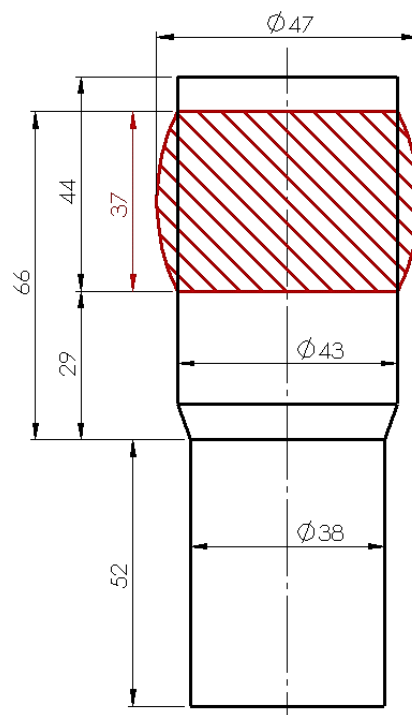
$$V_{NP} = V_{HLAVA} - V_{Dstř.} = 106\,604,96 - 42\,113,835 \\ = 64\,491,125 \text{ mm}^3$$

Výška nepředpěchované hlavy:

$$h_{NP} = \frac{4 \cdot V_{NP}}{\pi \cdot 43^2} = \frac{4 \cdot 64\,491,125}{\pi \cdot 43^2} = 44,409 \text{ mm}$$

Výška předpěchované hlavy (soudečku):

$$h_P = \frac{4 \cdot V_{NP}}{\pi \cdot 47^2} = \frac{4 \cdot 64\,491,125}{\pi \cdot 47^2} \approx 37 \text{ mm}$$



Obr. 25 Zobrazení rozměrů před 2. operací

Výpočet přetvoření:

1. operace

a) dopředné protlačování dřívku je vypočteno dle vztahů (1) a (2) viz kapitola 3.3.3:

$$\varphi_1 = \ln \frac{D_0^2}{D_2^2} = \ln \frac{43^2}{38^2} = 0,247$$

$$\varepsilon_1 = \frac{D_0^2 - D_2^2}{D_0^2} \cdot 100 [\%] = \frac{43^2 - 38^2}{43^2} \cdot 100 [\%] = 21,9 \%$$

b) předpěchování hlavy je vypočteno dle vztahů (8) a (9) viz kapitola 3.3.3:

$$\varphi_2 = \ln \frac{h_P}{h_{NP}} = \ln \frac{37,17}{44,4} = -0,177$$

$$\varepsilon_2 = \frac{h_{NP} - h_P}{h_{NP}} \cdot 100 [\%] = \frac{44,4 - 37,17}{44,4} \cdot 100 [\%] = 16,28 \%$$

2. operace

a) dopředné protlačení dříku je vypočteno dle vztahů (1) a (2) viz kapitola 3.3.3:

$$\varphi_3 = \ln \frac{D_3^2}{D_2^2} = \ln \frac{38^2}{33^2} = 0,282$$

$$\varepsilon_3 = \frac{D_2^2 - D_3^2}{D_2^2} \cdot 100 [\%] = \frac{38^2 - 33^2}{38^2} \cdot 100 [\%] = 24,58 \%$$

b) přechování hlavy je vypočteno dle vztahů (8) a (9) viz kapitola 3.3.3:

$$\varphi_4 = \ln \frac{h''}{h'} = \ln \frac{30,5}{66} = -0,772$$

$$\varepsilon_4 = \frac{h' - h''}{h'} \cdot 100 [\%] = \frac{66 - 30,5}{66} \cdot 100 [\%] = 53,78 \%$$

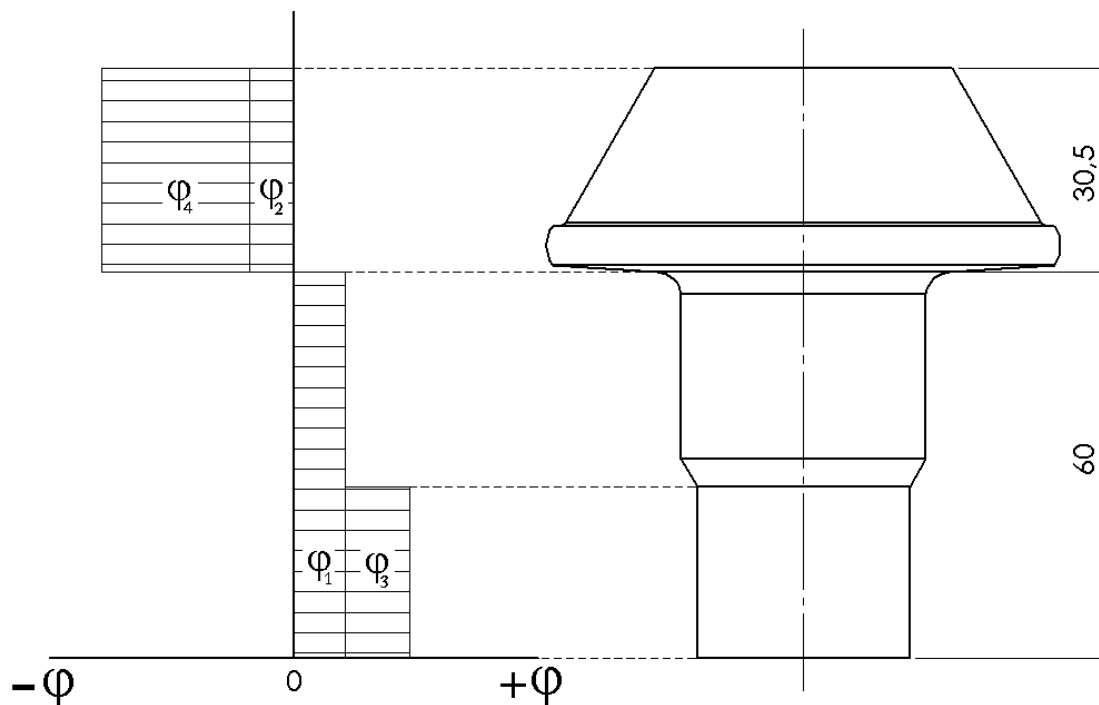
$$\varphi_{HLAVA} = |\varphi_2| + |\varphi_4| = |-0,177| + |-0,772| = 0,949$$

$$\varphi_{DŘÍK} = |\varphi_1| + |\varphi_3| = |0,247| + |0,282| = 0,529$$

$$\varphi_{CELKOVÉ} = |\varphi_1| + |\varphi_2| + |\varphi_3| + |\varphi_4| = 0,247 + 0,177 + 0,282 + 0,772 = 1,478$$

Výpočet napětí:

$$\sigma = K \cdot \varphi^n = 682,41 \cdot 1,478^{0,4791} = 822,88 \text{ MPa}$$



Obr. 26 Logaritmičké přetvoření v jednotlivých průřezech součásti

4.3 Návrh

Protože hutní polotovary přichází do závodu ve stavu a délkách nevyhovujících výrobě, je zapotřebí materiál před tvářením připravit a provést patřičné úpravy. V případě dlouhých tyčí, které se v průběhu transportu nebo skladování ohnuly a pokrřivily, je nutné jejich narovnání. Při výrobě zadané součásti se jako první úprava materiálu před tvářením provede dělení dlouhé tyče kruhového průřezu o průměru 43 mm. Tyč bude dělena řezáním na kotoučové pile na špalíky o délce 114 mm (obr. 27), čímž se získá vstupní polotovar pro naši součást. Dále je zapotřebí úprava povrchu špalíku z důvodu odstranění povrchových vad, jako jsou především okuje a nečistoty nebo drobné vady vzniklé při přepravě a manipulaci s materiálem, což se provádí otryskáváním špalíku tlakem proudu jemných abrazivních částic.



Obr. 27 Špalík

Při další úpravě polotovar putuje na linku povrchových úprav, kde dochází k jeho chemickému čištění a zpracování, počínaje odmaštěním v alkalické lázni a následným oplachem horkou vodou o teplotě přibližně 75 °C. Dále se provede moření ponorem ve vanách s kyselinou sírovou, čímž se odstraní zbytky okují, korozní poruchy a sníží se drsnost povrchu kovu a materiál tak získá hladký, kovově čistý povrch bez nečistot. Následuje oplach a poté aktivací oplach. Další úpravou materiálu je fosfátování. Na povrchu kovu vznikají buňky podobné včelímu plástu, do kterých se poté mazivo vsakuje. Fosfátování polotovaru řešené součásti bude probíhat ve vaně se zinečnatým fosfátem, který slouží jako vhodná základní vrstva pro zlepšení přilnavosti při nanášení molyka v poslední lázni.

Postup výroby je zvolen tak, aby bylo dosaženo požadovaného tvaru výrobku dle technologických možností. Výroba pastorku je rozdělena na dvě operace. Pastorek je vyráběn na postupovém automatu, který je schopen až pěti operací zároveň, z nichž se při výrobě zadané součásti, která nemá příliš komplikovaný tvar a velikost, využívají pouze dva bloky pro dané dvě operace. Polotovary jsou v bednách přepraveny a vysypány do zásobníku stroje v podobě kontejneru, odkud se dostávají na nakloněný rovinný nepohyblivý dopravník, po kterém jsou odvalovány k úzkému žlabu, kde je dávkovací závora uvolňuje do žlabu vždy po jednom kusu. Ve žlabu se polotovar posouvá k zařízení s kruhovou dírou přibližně o poloměru polotovaru, do které je zatlačen, a dále otočením o devadesát stupňů se dostane do svislé polohy, odkud si jej vezme kleština a dopraví ho do pozice první operace. První operace využívá technologii dopředného protlačování, přičemž probíhá dopředná redukce dířku (viz obr. 28a). Poté, co je dosaženo redukce dířku z průměru 43 mm na průměr 38 mm, se materiál ve spodní části průtláčnice opře o vyhazovač a dojde k malému předpěchování vrchního válečku na průměr 47 mm, čímž vznikne



a) 1. operace



b) hotový výrobek

Obr. 28 Součást po první a druhé operaci

mírný soudeček. Toto je v navrženém výrobním postupu přípustné, protože je tím usnadněna následující operace a také to vede k lepší symetrii konečného tvaru součásti. Na obr. 28 tento soudeček není znázorněn, protože se jedná o individuální záležitost a při výrobě není jeho vznik zaručen na každém výrobku. Dále kleština přesune polotovar do pozice druhé operace, při které dochází opět k dopředné redukci dříku z průměru 38 mm na průměr 33 mm (v průtlačnici viz obr. 29a), zmenší se jeho výška, čímž se zabráni vzpěru, a materiál se opře o vyhazovač. Díky tomu se nezdeformuje při následujícím pěchování kuželové hlavy pastorku, která vznikne tak, že materiál vyplní horní část nástroje, do které je vpěchován (obr. 29b). Podavač dále přesune výrobek do bedny s hotovými díly (obr. 28b).



a) průtlačnice pro pastorek – uvnitř redukční kužel pro redukci dříku



b) pěchovnice pro kuželovou hlavu pastorku

Obr. 29 Nástroje pro řešenou součást



Obr. 30 Hotový pastorek vyjmutý z lisu

5 ZÁVĚRY

Obsahem této bakalářské práce je seznámení se s objemovým tvářením vztažené na konkrétní součást, doplněné o obrázky výrobků jednotlivých metod. Polotovar pro pastorek do kuželového soukolí převodovky osobního automobilu je vyroben kombinací dopředného protlačování a pěchování.

Materiálem pro výrobu pastorku byla zvolena legovaná ocel dle ČSN 16 326 (18CrNiMo) s feriticko-perlitickou strukturou. Tento materiál se využívá pro vysoce namáhané strojní díly, součásti strojů, motorů a vozidel jako například kola diferenciálů a ozubená kola převodovek.

V rozboru součásti je popsána funkce pastorku a pro názornost uvedena ilustrace kuželového soukolí. Při návrhu se postupovalo po jednotlivých krocích výrobního procesu. Byla popsána úprava materiálu před tvářením v případě, že obsahuje různé nečistoty a defekty, poté pracovní postup na lince povrchových úprav a nakonec návrh samotného tvářecího procesu. Ten bude probíhat ve dvou tvářecích operacích. V první operaci je dopředným protlačováním zhotoven osazený tvar dříku a předpěchován tvar hlavy. Druhá operace kombinuje dopředné protlačování, při kterém dojde k další redukci dříku na hotovo, s pěchováním kuželové hlavy v uzavřené pěchovnici.

Pro návrh výroby byly provedeny technologické výpočty. Poté, co byl stanoven objem součásti a jeho hmotnost, byly obě tyto hodnoty ověřeny pomocí softwaru Solidworks. Za předpokladu rovnoměrného přetvoření v celé součásti byla určena hodnota průměru polotovaru 45,3 mm. Pro výrobu se však použije tyčový polotovar o průměru 43 mm, který je do společnosti objednáván z důvodu použitelnosti pro několik různých produktů obdobného tvaru a velikosti. Na základě zákona o stálém objemu před a po tvářením se stanovila výška špalíku 114 mm, čímž byly získány optimální rozměry vstupního polotovaru. Dále byla spočtena přetvoření pro jednotlivé operace a stanoven výpočet celkového napětí.

Pastorek bude vyráběn na postupovém automatu Schuler v počtu 50 000 ks ročně. Konečné obráběcí operace, jako je například vyfrézování ozubení na hlavě pastorku a úprava dříku budou provedeny zákazníkem.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 8021423749.
2. BABOR, Karel, Augustin CVILINEK, Jan FIALA a Vladimír HAŠEK. *Objemové tváření oceli*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1967, 329 s.
3. DVOŘÁK, Milan. *Technologie II*. Vyd. 3., doplněné. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 238 s. ISBN 8021426837.
4. *Metaldyne* [online]. Oslavany: Metaldyne, 2017 [cit. 2017-02-24]. Dostupné z: www.metaldyne.cz
5. SHIGLEY, Joseph, Charles MISCHKE, Richard BUDYNAS, Martin HARTL a Miloš VLK. *Konstruování strojních součástí*. Brno: VUTIUM, 2010 ISBN 9788021426290.
6. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu. I. 2. opr. a rozš. vyd.* Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, 516 s. ISBN 8072042831.
7. BRALLA, James. Design for Manufacturability Handbook. *Journal of Manufacturing Systems* [online]. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers (publishers), 1999, 18(5), 378 [cit. 2017-05-24]. DOI: 10.1016/S0278-6125(99)90099-7. ISSN 02786125. Dostupné z: <http://www.scribd.com/doc/152678815/cold-headed-parts-pdf>
8. FOREJT, Milan. *Teorie tváření*. Vyd. 2. Brno: CERM, 2004, 167 s. ISBN 8021427647.
9. BENEŠOVÁ, Soňa a Vladimír BERNÁŠEK. *Technologie tváření* [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2014 [cit. 2017-05-24]. ISBN 978-80-261-0449-0. Dostupné z: <http://zcu.cz/export/sites/zcu/pracoviste/vyd/online/TechnologietvareniTTSS.pdf>
10. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013, 169 s. ISBN 9788021447479.
11. TSCHÄTSCHE, Heinz. *Metal forming practise: processes, machines, tools*. Berlin: Springer, 2006, 405 s. ISBN 3540332162.
12. Technologie tváření kovů. *Odbor technologie tváření kovů a plastů* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně - Fakulta strojního inženýrství - Ústav strojírenské technologie - Odbor technologie tváření kovů a plastů, 2017 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/technologie_vyroby_I_tvareni_gajdos.pdf
13. KRYŠTŮFEK, Karel. *Strojírenská technologie* [online]. 1999 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://mujweb.atlas.cz/www/pk80/pub/st/>
14. *Techmagazín* [online]. Praha: Tech Media Publishing, c2010-2017 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/>
15. ELFMARK, Jiří. *Tváření kovů*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1992, 524 s. ISBN 8003006511.
16. GROCHE, Peter, Sebastian ZANG, Philipp KRAMER, Christoph MÜLLER a Vladimír REZANOV. Influence of a heat treatment prior to cold forging operations on the performance of lubricants. *Tribology International*. 2015, 92, 67-71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.05.028>. ISSN 0301679x. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X15002364>
17. Legované oceli - použití, rozměry. *Poldi* [online]. Kladno: Poldi, b.r. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.poldi.cz/legovane-oceli?str=273>

18. Přehled vlastností oceli 18CrNiMo7-6. In: *Bolzano* [online]. Kladno: Bohdan Bolzano, 2017 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/oceli-k-cementovani-podle-en-10084/prehled-vlastnosti-oceli-18crnimo7-6>
19. *Metaldyne Performance Group* [online]. Detroit: Metaldyne Performance Group, 2017 [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: www.metaldyne.com
20. *Kontura Tools* [online]. Zlín: Kontura Tools, 2017 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <http://www.konturatools.cz/>
21. Hollowed shaft. In: *AAM* [online]. Detroit: AAM, 2017 [cit. 2017-04-03]. Dostupné z: <https://www.aam.com/images/default-source/products/metal-formed-products/hollowedshaft.png?sfvrsn=4>
22. THYES, Myriam. Bevel gear (toothed wheels). In: *Wikimedia Commons* [online]. 2007 [cit. 2017-02-22]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gear-kegelzahnrad.svg>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
D_0	průměr polotovaru	[mm]
D_1	průměr po tváření	[mm]
D_2	průměr v nejširším místě po přechování	[mm]
D_3	průměr zredukovaného díku v druhé operaci	[mm]
D_4	střední průměr hlavy	[mm]
F	tvářecí síla	[N]
F_m	střední (průměrná) síla	[N]
$F_{\max}$	maximální síla	[N]
h	výška po přechování	[mm]
h_0	výchozí výška	[mm]
h_1	výška dna	[mm]
h_{D1}	výška spodního díku po první operaci	[mm]
$h_{D\text{stř.}}$	výška středního díku	[mm]
h_K	výška kužele	[mm]
h_V	výška válce	[mm]
h'	výška kuželové hlavy po přechování	[mm]
h''	výška materiálu před přechováním hlavy	[mm]
Δh	stlačení	[mm]
K	pevnostní koeficient	[MPa]
l	posunutí	[mm]
m	hmotnost	[kg]
n	exponent deformačního zpevnění	[-]
R_e	mez kluzu	[MPa]
r	poloměr válce	[mm]
r_1	poloměr horní podstavy kužele	[mm]
r_2	poloměr spodní podstavy kužele	[mm]
S_0	plocha styku nástroje s materiálem před tvářením	[mm ²]
S_1	plocha styku nástroje s materiálem po tváření	[mm ²]
V	objem	[m ³]
V_C	celkový objem	[kg·m ⁻³]
W	práce	[N · m]
x	faktor procesu	[-]
ε	poměrné přetvoření	[-]
η_F	deformační účinnost změny tvaru	[%]
ρ	hustota	[kg·m ⁻³]
σ	napětí	[MPa]
σ_d	mez pevnosti	[MPa]
φ	logaritmické přetvoření	[-]
τ	smykové napětí	[MPa]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Součásti zhotovené tvářením plošným (vlevo) a objemovým (vpravo) [20], [21]	9
Obr. 2 Drážkový náboj [19]	10
Obr. 3 Kuželové soukolí [22]	10
Obr. 4 Řešená součást	10
Obr. 5 Krystalové mřížky kovů: prostorově středěná, plošně středěná, šesterečná [1]	11
Obr. 6 Znázornění pružné a plastické deformace skluzem a dvojčatěním [1]	11
Obr. 7 Rotační součást tvářená za studena [19]	15
Obr. 8 Schéma zpětného protlačování [2]	16
Obr. 9 Výrobky zpětného protlačování	16
Obr. 10 Schéma dopředného protlačování [2]	17
Obr. 11 Výrobky dopředného protlačování	17
Obr. 12 Výrobek stranového protlačování	17
Obr. 13 Schéma stranového protlačování [2]	17
Obr. 14 Schéma sdruženého protlačování [2]	18
Obr. 15 Výrobky sdruženého protlačování	18
Obr. 16 Schémata deformace při pěchování [1]	19
Obr. 17 Schéma uzavřeného pěchování [2]	19
Obr. 18 Výrobky zhotovené pěchováním za studena	20
Obr. 19 Pracovní diagram pěchovací zkoušky [13]	20
Obr. 20 Defekty při tváření	22
Obr. 21 Schéma dopředného a zpětného protlačování [3]	23
Obr. 22 Schéma pěchování [12]	24
Obr. 23 Ukázky průtlačníků	25
Obr. 24 Schéma rozdělení součásti	27
Obr. 25 Zobrazení rozměrů před 2. operací	29
Obr. 26 Logaritmické přetvoření v jednotlivých průřezích součásti	30
Obr. 27 Špalík	31
Obr. 28 Součást po první a druhé operaci	31
Obr. 29 Nástroje pro řešenou součást	32
Obr. 30 Hotový pastorek vyjmutý z lisu	32

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Stupně přetvoření na jednu operaci. [3].....	23
Tab. 2 Chemické složení [%] oceli 16 326. [18]	27
Tab. 3 Mechanické vlastnosti oceli 16 326. [18]	27

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Postupový automat Schuler

SEZNAM VÝKRESŮ

Pastorek VUT-FSI-BP-1000

Příloha 1: Postupový automat Schuler

Výška: 7 m

Jmenovitá síla: 2000 t

