



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA DRÁŽKOVÉHO NÁBOJE

PRODUCTION OF SPLINED SLEEVE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Vališ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michaela Císařová, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Ondřej Vališ**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Michaela Císařová, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

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 drážkového náboje

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Téma diplomové práce se zabývá výrobou drážkového náboje využívaného v automobilovém průmyslu. Jedná se o dutou rotační součást, jejíž výroba bude provedena objemovým tvářením za studena.

Cíle diplomové práce:

Vypracování aktuální literární studie na zvolenou technologii.
Zhodnocení současné technologie výroby součástí podobných tvarů.
Návrh postupu výroby součásti.
Provedení technologických a kontrolních výpočtů.
Návrh nástroje s vyhotovením výkresů vybraných dílů.
Technicko-ekonomické hodnocení navržené výroby.
Zhodnocení a závěry.

Seznam doporučené literatury:

BABOR, Karel, Augustin CVILINEK a Jan FIALA. Objemové tváření ocelí. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1967.

BRALLA, James G. Design for manufacturability handbook [online]. 2nd ed. New York: McGraw - Hill, 1999. ISBN 00-700-7139-X.

ELFMARK, Jiří, Alois FARLÍK a Jiří KOTOUČ. Tváření kovů. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1992. ISBN 80-030-0651-1.

FELDMANN, Heinz D. Protlačování oceli. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1962.

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.

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

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

VALIŠ Ondřej: Výroba drážkového náboje.

Diplomová práce předkládá návrh technologie výroby drážkového náboje využívaného v automobilovém průmyslu v sestavě kloubového hřídele. Dílec je zhotoven z konstrukční oceli ČSN 11 523 objemovým tvářením za studena v roční výrobní sérii 20 000 kusů. Výrobní postup byl navržen na čtyři tvářecí operace, mezi něž je zařazeno rekrystalizační žihání po druhé operaci pro obnovení plasticity před dalším tvářením. Pro tyto výrobní operace byly provedeny technologické a kontrolní výpočty. Postup byl navržen pro uskutečnění jednotlivých operací na konvenčních jednooperačních lisech dostupných v rámci strojního parku závodu. Pro všechny operace byly navrženy funkční nástroje a nástrojové sestavy. Na závěr práce bylo provedeno technicko-ekonomické zhodnocení návrhu výroby, z něhož vyplývá, že konečná cena celkových výrobních nákladů na výrobu jednoho kusu je 131,- Kč a k bodu zvratu, při kterém nastane zlom a série začne generovat zisk, dojde při výrobě 9 393 kusů.

Klíčová slova: drážkový náboj, dopředné protlačování, zpětné protlačování, ocel ČSN 11 523

ABSTRACT

VALIŠ Ondřej: Production of splined sleeve.

The master's thesis submits a technological project of production of splined sleeve used in automotive as a component of propeller shaft. The part is made of steel ČSN 11 523 by bulk forming technology in an annual production series of 20 000 pieces. Production process was designed in four operations, after the second operation there was recrystallization annealing included for regeneration of plasticity before following extrusion. There were made technological calculations for these production operations. Operations were projected to be done by common one-operation press machines available in local manufacturing facility. For all the operations were designed functional tools and tools setups. In conclusion, there was performed technical-economic evaluation. As emerged from this evaluation the final amount of total production costs for one piece is 131,- Kč. When 9 393 pieces are produced, the production series reaches to the break-even point and then the profit starts to be generated.

Keywords: splined sleeve, forward extrusion, backward extrusion, steel ČSN 11 523

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VALIŠ, Ondřej. *Výroba drážkového náboje* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125060>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Michaela Císařová.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

Ve Zbýšově dne 09.09.2020

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych velmi rád poděkoval paní Ing. Michaelle Císařové, Ph.D. za vedení, cenné připomínky a rady týkající se zpracování mé diplomové práce. Dále chci poděkovat firmě Metaldyne Oslavany za umožnění napsat tuto práci a jejím zaměstnancům za jejich čas, praktické připomínky a konzultace, především panu Radku Polákovi a panu Radku Dubšíkovi. Rád bych také velice poděkoval mé rodině a blízkým za zázemí a podporu během studia.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	10
1 ROZBOR ZADÁNÍ	11
2 FYZIKÁLNÍ PODSTATA A ZÁKLADY TVÁŘENÍ	14
2.1 STRUKTURNÍ PORUCHY MŘÍŽKY – DISLOKACE	14
2.2 DEFORMACE KOVOVÝCH MATERIÁLŮ	14
2.3 DŮSLEDKY PLASTICKÉ DEFORMACE	15
2.4 ODPEVNĚNÍ MATERIÁLU	16
2.5 STÁRNUTÍ KOVŮ.....	18
2.6 ODPORY PŘI TVÁŘENÍ.....	18
2.7 PŘETVÁRNÁ SÍLA A PRÁCE	19
2.8 TVAŘITELNOST KOVŮ A CHARAKTERISTIKY DEFORMACE – PŘETVOŘENÍ	20
2.9 ZÁKONY TVÁŘENÍ	20
3 OBJEMOVÉ TVÁŘENÍ ZA STUDENA	22
3.1 PROTlačOVÁNÍ.....	23
3.2 MATERIÁLY PRO PROTlačOVÁNÍ A JEJICH PŘÍPRAVA.....	25
3.2.1 Vlastnosti materiálů vhodných k protlačování	25
3.2.2 Příprava polotovaru.....	27
3.3 NÁSTROJE PRO OBJEMOVÉ TVÁŘENÍ ZA STUDENA	31
3.3.1 Konstrukční požadavky a řešení	31
3.3.2 Bandážování průtláčnic – armování	33
3.4 MATERIÁLY PRO NÁSTROJE.....	35
3.5 STROJE PRO TECHNOLOGII PROTlačOVÁNÍ	36
3.6 METODY TECHNOLOGIE PROTlačOVÁNÍ.....	38
3.6.1 Technologie dopředného protlačování.....	38
3.6.2 Technologie zpětného protlačování	41
3.6.3 Technologie kombinovaného protlačování.....	44
3.7 DEFEKTY PŘI PROTlačOVÁNÍ	45
3.8 TŘENÍ.....	46
3.9 MAZIVA	48
4 PLOŠNÉ TVÁŘENÍ	49
4.1 STRÍHÁNÍ	49
5 NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY	50
5.1 NÁVRHY VARIANT VÝROBY PROTlačOVÁNÍM	50
5.2 VOLBA MATERIÁLU.....	53
5.3 TECHNOLOGICKÉ VÝPOČTY A NÁVRH VÝROBNÍHO POSTUPU	54
5.3.1 Výpočet objemu součásti	54
5.3.2 Návrh rozměrů a stanovení výchozího polotovaru	56

5.3.3 Polotovar a jeho příprava	60
5.3.4 Technologické výpočty	62
5.4 NÁVRH A KONTROLNÍ VÝPOČTY NÁSTROJŮ	67
5.5 VOLBA TVÁŘECÍCH STROJŮ	74
6 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	75
7 ZÁVĚRY.....	83

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratek

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam příloh

Seznam výkresů

ÚVOD [1], [2], [3], [4], [5]

Strojírenská technologie je významnou větví strojího průmyslu, zahrnující vědu o technických zákonitostech výrobního procesu. V historii se tento obor rozvíjel na základě zkušeností jako nauka o dovednosti v oblasti výroby rozličných předmětů a výrobních postupů. Strojírenská technologie má široký rozsah působnosti a zahrnuje celou řadu výrobních technologií, jako jsou tváření kovů, obrábění, svařování a pájení, slévání, vstřikování a tváření plastů, povrchové úpravy a tepelné zpracování materiálů. Z hlediska globální produkce strojních součástí z kovů a slitin mají značný význam technologie obrábění a tváření, které splňují náročné požadavky na vysokou přesnost výrobků pro automobilní a letecký průmysl, vojenskou a výrobní techniku, energetiku atd.

Objemové tváření za studena, jemuž je tato diplomová práce věnována, je beztržisková, vysoce hospodárná a produktivní výrobní metoda, při níž dochází ke zpevnění materiálu a výrobky dosahují vysoké kvality a přesnosti. Principem této technologie je uvedení materiálu do plastického stavu působením vnějšího zatížení, čímž dochází ke změně tvaru a vlastností tělesa. Takto je polotovar přetvořen do konečné navržené podoby výrobku, aniž by došlo k porušení jeho soudržnosti a významné ztrátě materiálu.

Protlačování je základní metodou objemového tváření za studena, jež byla z počátku využívána v hutnických provozech při výrobě tyčí, profilů a trubek, a následně se z důvodu svého rozsáhlého využití rozšířila do různých oblastí průmyslu. Na základě svých charakteristických znaků, výhod a hospodárnosti vycházejících z této technologie slouží protlačování k výrobě velkého množství součástí napříč různými větvemi strojírenského průmyslu. Příklady výrobků zhotovené protlačováním jsou znázorněny na obrázcích níže.



Obr. 1 Typické produkty protlačování [3]



Obr. 2 Složitě tvarované výrobky zhotovené protlačováním hliníku [4]



Obr. 3 Rozmanité druhy výrobků technologie protlačování [5]

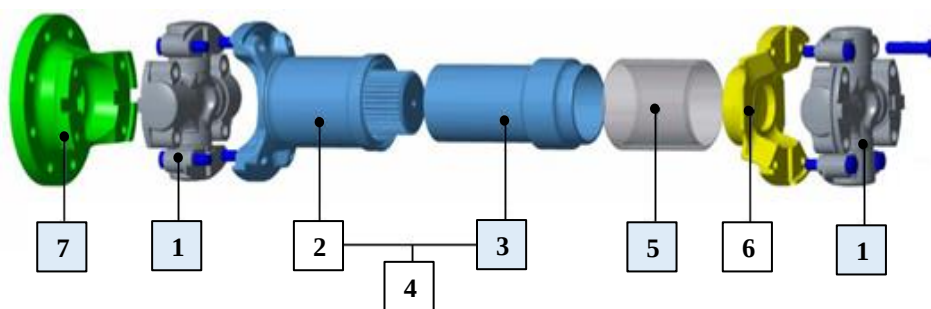
1 ROZBOR ZADÁNÍ [3], [6], [7], [8], [9], [10]

Problematika diplomové práce je zaměřena na návrh výroby drážkového náboje, viz obr. 4. Jedná se o dutou rotační součást obsahující vnitřní ozubení. Drážkový náboj je součástí sestavy kloubového – kardanového hřídele, jenž je používán v pohonném ústrojí nákladních automobilů i osobních automobilů s náhonem na zadní nápravu či pohonem všech čtyř kol.

Motor automobilu generuje výkon, jenž je přenášen přes spojku a převodovku dalším pohonným ústrojím na kola automobilu. Existují různé druhy a varianty složení těchto komponent, většinou dle jednotlivých výrobců a jejich portfolia. V této práci řešený drážkový náboj je součástí kardanu obsahujícího dva za sebou řazené křížové klouby, doplněné úpravou, kdy střední část hřídele je dělená právě pomocí drážkového spoje, jak ukazuje obr. 5, což umožňuje určitou změnu délky hřídele.



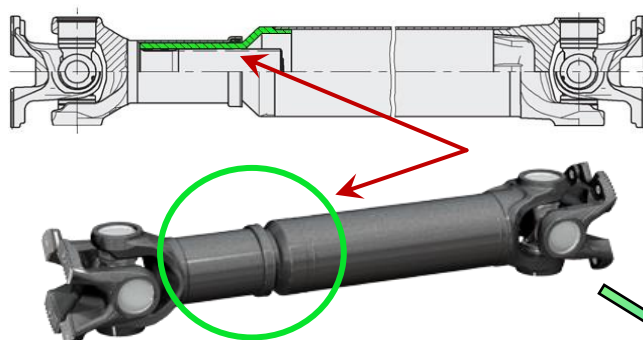
Obr. 4 Drážkový náboj [3]



1	křížový kloub
2	drážková hřídel
3	drážkový náboj
4	drážkový spoj
5	trubka
6	třmen
7	příruba

Obr. 5 Sestavení kardánového hřídele [7]

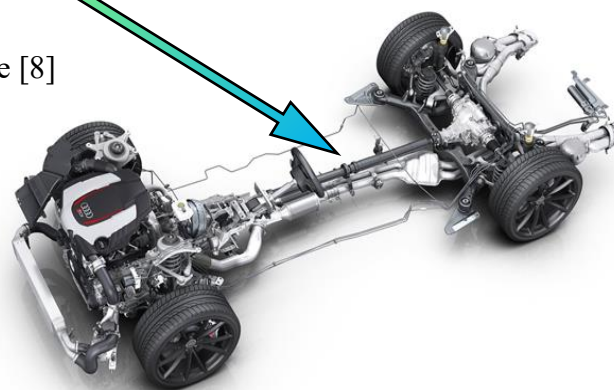
Malá změna délky hřídele je výhodná zejména u terénních vozidel, kde se tohoto využívá v případě, že se mění vzájemná vertikální poloha náprav, například při překonávání různých



velkých nerovností či překážek v terénu atd. Drážkový náboj je nasunut na svůj negativ v podobě drážkového hřídele s prachovým těsněním, který je součástí jednoho křížového kloubu. Poté musí být náboj kvalitně přivařen k trubce spojené s druhým křížovým kloubem. Schéma a model kardanu s umístěním drážkového náboje zobrazuje obr. 6.

Obr. 6 Schéma a model kardánové hřídele [8]

Kardan se nachází ve spodní části automobilu, jak je zobrazeno na obr. 7, podélně uložený uprostřed podvozku a jedná se o nezbytnou mechanickou komponentu v případě přenosu rotačního pohybu, kroutícího momentu a tím výkonu na zadní nápravu, uloženou ve značné vzdálenosti od motoru (ve srovnání s přední nápravou).

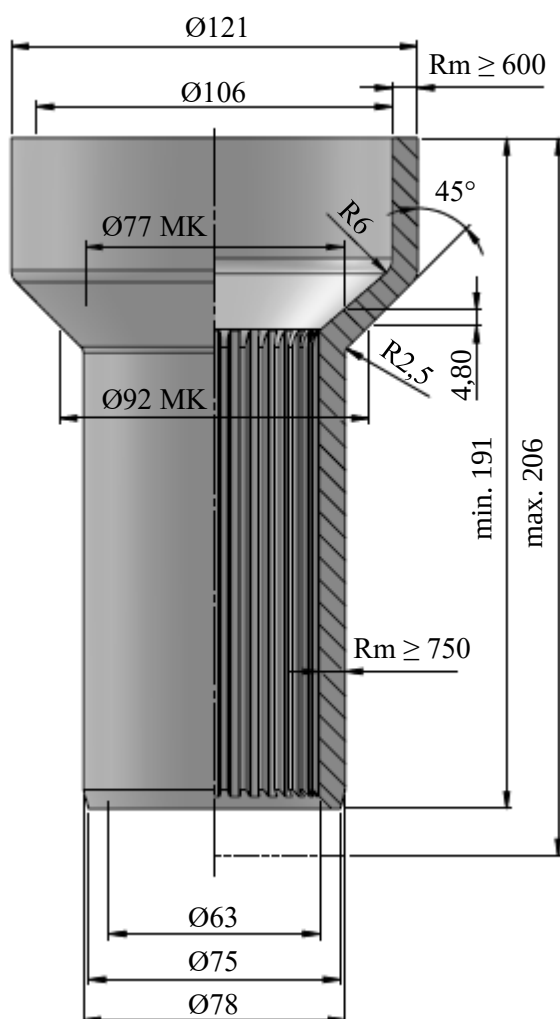


Obr. 7 Umístění kardanu v osobním automobilu [9]

Zadaný dílec je nový výrobek, jež rozšiřuje výrobní portfolio společnosti. Jedná se o součást geometricky a funkčně podobnou dalším produktům stávajícího výrobního programu, jejichž výrobními postupy a praktickými poznatky se lze při návrhu inspirovat. Vyrobená součást slouží jako polotovár pro následující operace, které si již provádí sám zákazník v rámci přípravy na montáž drážkového náboje do sestavy kloubového hřídele.

Konstrukce, geometrie a požadavky na výrobu a dodání drážkového náboje jsou zadány zákazníkem prostřednictvím zákaznického výkresu. Jak je patrné z obr. 8, který schematicky udává hlavní rozměry a důležité kóty výrobku, jedná se o rotační součást poměrně jednoduchého tvaru s vnitřním ozubením.

Mezi základní požadavky zákazníka na řešenou součást patří:



- pevnost hlavy $R_{m_{min.}} = 600$ MPa a pevnost dřívku s ozubením $R_{m_{min.}} = 750$ MPa,
- dodržení tzv. messkreisu (MK). Jedná se o parametr, uváděný vždy celočíselnou kótou, sloužící pro potřeby měření přímo v provozu při výrobě součástí, a tím možnost kontroly rozměrů a zajištění požadované přesnosti, kvality výrobků a plynulosti výroby. MK je pomocná měřicí kružnice sloužící k přepočtení délky, tloušťky stěny či jiných rozměrů kuželové části výrobku, jelikož při výrobě protlačováním zde často dochází k tvorbě nedolisovaných hran, od nichž nelze měřit. Měřidla jsou vyrobena a nastavena tak, že zajišťují pravidelné přesné měření, proveditelné běžným úchylkoměrem či posuvným měřidlem. Hodnotu a umístění MK si určí buď sám zákazník, nebo konstruktér výrobku,
- dodržení dodavatelských podmínek. Zákazník požaduje dodání výrobků v patřičně upraveném stavu, nelze dodat díly přímo v hrubém stavu po zhotovení. Díly musí být opatřeny alespoň krátkodobou ochranou proti korozi pro zajištění čistého povrchu a dané jakosti při jejich skladování a transportu zákazníkovi. Na povrchu je přípustný výskyt zbytků maziv, fosfátových povlaků a vad do hloubky 0,3 mm,

Obr. 8 Schéma a rozměry součásti

- tvorba vnitřního ozubení náboje, jehož geometrické parametry jsou dány interní normou zákazníka. Požadavkem pro výrobu protlačováním je vytvoření drážek ve tvaru rovnoramenného lichoběžníku o vysoké pevnosti dané zpevněním při objemovém tváření za studena. Drážky nejsou zhotoveny s konečnou přesností a jejich rozměr se může pohybovat v širokém tolerančním poli s přesností dle možnosti technologie, jelikož zákazník celou součást potáhne polyamidem, do kterého jsou následně protahováním vytvořeny již přesné zuby s přesností IT9. Je použit polyamid PA 11 RILSAN, jež splňuje vysoké funkční parametry,

- s ohledem na aplikaci řešené součásti, pracovní prostředí součásti, požadavky zákaznické i technologické je zapotřebí při volbě vyhovujícího materiálu najít optimální řešení splňující všechny zadané parametry. Drážkový náboj neustále pracuje za určitých otáček a musí odolávat značnému únavovému namáhání. Je také značně mechanicky namáhán působením různých vlivů jako jsou vibrace, vzájemný pohyb v drážkovém uložení atd. Výrobek musí být odolný vůči korozi, působení nečistot, prachových částic, chemikálií jako pohonné hmoty, oleje atd. Zvýšení odolnosti konečného výrobku proti korozi, chemikáliím, zvýšení tepelné i mechanické odolnosti, snížení vibrací a další zajišťuje na závěr nanesený povlak polyamidu PA11 RILSAN. Materiál musí být vhodný pro objemové tváření za studena a zároveň dobře svařitelný pro zajištění kvalitního svarového spoje v sestavě kardanu. Materiál byl vybrán s ohledem na všechny požadavky a poté schválen zákazníkem,
- požadovaná velikost výrobní série řešené součásti je 20 000 ks/rok.

Nejvhodnější technologií pro kompletní výrobu zadaného dílce je z hlediska geometrie, konečného využití a splnění požadavků objemové tváření za studena. Pro zhotovení drážkového náboje byla dále jako nejvhodnější způsob výroby určena technologie protlačování.

Zadanou součást lze z obecného hlediska vyrobit i pomocí jiných technologií a metod. Jako přípustnou technologii výroby lze uvažovat odstředivé lití, vhodné pro výrobu dutých rotačních součástí. Jedná se ovšem o technologii s vysokými provozními náklady, jelikož je součástí procesu ohřev k roztavení materiálu, složité nástroje a výrobní zařízení. V hotových výrobcích se v závěru mohou vyskytovat různé materiálové vady plynoucí z dané technologie a pro získání požadovaných vlastností by muselo následovat zušlechtní, čímž dále rostou náklady.

Jedna z dalších výrobních možností je třískové obrábění, které se ovšem pro výrobu daného dílce jeví jako velmi nevhodné. Náboj by musel být obráběn z tyčového polotovaru o průměru zvětšeném o přírůstek na obrábění vůči největšímu průměru hotového výrobku. Jelikož jde o dutou součást, bylo by využito pouze 20 % vstupního materiálu. Následně by musela být součást zušlechtěna, čímž se dále zvyšují výrobní náklady.

Lze uvažovat i variantu, která při výrobě drážkového náboje kombinuje třískové obrábění s objemovým tvářením za studena. V tomto případě je tvar náboje vytvořen protlačováním za studena a ozubení je na vnitřní ploše následně zhotoveno protažením pomocí protahovacího trnu na obráběcím stroji. V takovém případě je ovšem opět nutné pro dosažení požadované pevnosti zubů hotovou součást zušlechtit.

Výroba drážkového náboje je řešena ve spolupráci s firmou Metaldyne Oslavany, spol. s r. o., která je nyní součástí globální společnosti American Axle & Manufacturing, jejíž portfolio tvoří výrobní program zahrnující technické komponenty, moduly a systémy do motorů, převodovek, diferenciálů a dalších částí pohonného ústrojí a součástí především do automobilů, ale i jiné dopravní techniky. V místní pobočce tvoří výrobní program především výroba tlakových filtrů, součástí převodovek a diferenciálů, drážkových nábojů a dalších dílců pro automobilový průmysl.



Obr. 9 Logo firmy [10]

2 FYZIKÁLNÍ PODSTATA A ZÁKLADY TVÁŘENÍ

2.1 Strukturní poruchy mřížky – dislokace [1], [11], [12]

Na krystalické stavbě kovu závisí jeho mechanické, tepelné, elektrické a magnetické vlastnosti. Převážná většina technických kovů krystalizuje v soustavě krychlové prostorově středěné mřížky (BCC), krychlové plošně středěné mřížky (FCC) nebo šesterečné mřížky (HCP).

Atomy v krystalech technických kovů a slitin nejsou ve skutečnosti uspořádány ideálně, nýbrž obsahují řadu nedokonalostí – strukturních poruch krystalové mřížky. Jedná se v podstatě o odchylky od ideálního uspořádání krystalových mřížek, které vznikají v průběhu metalurgické fáze přípravy materiálu během krystalizace a při jeho dalším zpracování. Tyto poruchy výrazně ovlivňují mechanické vlastnosti materiálu. Rozeznává se několik druhů mřížkových poruch podle geometrického tvaru – bodové poruchy, čárové poruchy (dislokace), plošné a prostorové poruchy.

Dislokace jsou s ohledem na problematiku plastické deformace nejdůležitější. Jedná se o místní nedokonalosti struktury, které se dělí podle jejich uspořádání na dislokace hranové a šroubové. Nejdůležitější vlastností tohoto druhu strukturní poruchy je schopnost pohybu. Volné dislokace se v materiálu pohybují difuzí nebo skluzem – postupným pohybem dislokací ve skluzových rovinách krystalové mřížky, což má z hlediska plastického přetvoření kovových materiálů zásadní význam. Difuzní pohyb dislokací – šplhání – je oproti skluzovému pohybu pomalejší a značně se mění s teplotou.

Počet dislokací v krystalu je významnou charakteristikou vyjádřenou hustotou dislokací. Dislokace vznikají již v průběhu krystalizace materiálu nebo se mohou tvořit v jeho tuhém stavu při plastické deformaci účinkem napětí způsobeného vnějším zatížením, kdy se uplatňuje Frank-Readův zdroj dislokací, jenž generuje opakovaně nové dislokace až do vyčerpání zdroje, ke kterému dojde, když se tvorba nových dislokací zastaví v důsledku neschopnosti dalšího pohybu stávajících dislokací. Ty jsou buď blokovány řadou překážek, nebo dojde k jejich přehuštění. Dislokace mohou také zanikat – anihilovat. To je způsobeno přitahováním dislokací s opačnými znaménky v jedné rovině, až dojde k jejich vzájemnému zrušení.

2.2 Deformace kovových materiálů [1], [11], [12], [13], [14]

Pokud na kovový materiál působí vnější zatížení o určité velikosti, například síla tvářecího stroje, dochází k deformaci jeho krystalové mřížky, a tím ke změně tvaru daného tělesa.

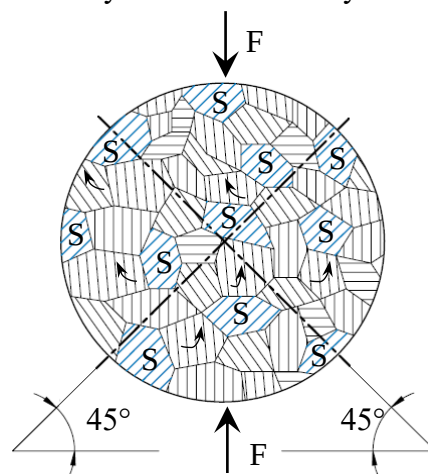
Tvářecí stroj působí na materiál v nástroji určitou tvářecí silou, která vyvolává v materiálu napětí. Velikost úhlu skluzové roviny, při němž dosahuje tečná – smyková složka napětí svého maxima, je 45° . Pokud toto smykové napětí dosáhne kritické hodnoty – meze kluzu, spustí se postupný posuv dislokací v kluzových rovinách – skluz, čímž se materiál začne plasticky deformovat.

Při velké změně tvaru výchozího polotovaru na navrhovanou podobu součásti, při které dojde k výrazným deformacím materiálu, je pro rozsáhlé deformace a jejich sumarizaci používáno pojmu přetvoření.

Na začátku silového působení se těleso dostává do stavu pružné deformace, kdy po odlehčení nabývá opět původního tvaru, tento proces je vratný. Překročí-li však napětí vyvolané vnějším zatížením danou mez, dochází k přemísťování celých vrstev atomů v krystalových rovinách současně a těleso se začne plasticky deformovat a zůstane deformováno i po odlehčení, aniž by došlo ke změně krystalické struktury materiálu. Nevratná a trvalá deformace se nazývá plastická deformace a dochází při ní k posunutí atomů o vzdálenost větší, než je jejich mřížková konstanta.

K plastické deformaci kovů tedy dochází pohybem dislokací, který je uskutečňován dvěma mechanismy. Jedním je dvojčatění, což je rychlé přeskupení atomové mřížky části krystalu. Jedna část mřížky je natočena vůči druhé kolem roviny symetrie a vytváří tak zrcadlový obraz, tzv. mechanické dvojče. Jedná se o komplikovaný pohyb dislokací a méně častý mechanismus plastické deformace, který vzniká převážně při vyšších rychlostech tváření.

Druhým mechanismem je již zmíněný skluz. Skluz probíhá nejsnadněji v rovinách, které jsou nejhustěji obsazeny atomy a jeho směr je s nimi taktéž shodný. Výrazný vliv na průběh skluzu má různá orientace zrn materiálu a jejich hranic. Při mechanickém zatížení materiálu vzniká největší kluzové napětí v rovinách orientovaných pod úhlem 45° vůči směru působící síly. V těchto kluzových rovinách se dislokace začínají pohybovat nejdříve, to znamená v zrnech označených písmenem „S“ na obr. 10, a současně dochází v důsledku zachování kontinua k natočení sousedních nevhodně orientovaných zrn do směrů vhodných pro uskutečnění skluzu.

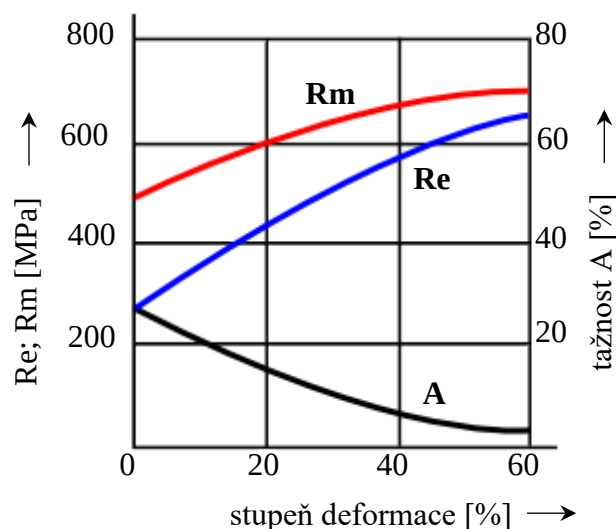


Obr. 10 Schematické znázornění skluzu [12]

2.3 Důsledky plastické deformace [1], [11], [14], [15]

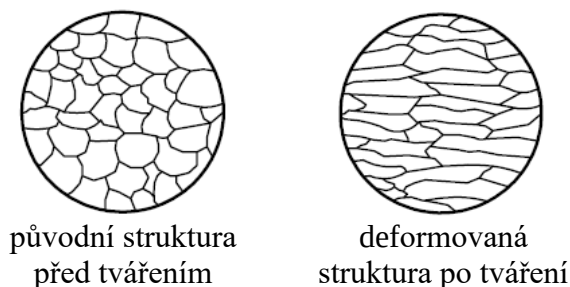
Dislokace se pohybují napříč celým krystalem, některé se při tomto pohybu zablokují a znehybní, čímž způsobí zdroje vnitřního napětí, které zabraňuje pohybu ostatních dislokací. Pohyb dislokací vychází z vnějšího zatížení a pokud se zastaví, je potřeba k jeho opětovnému zahájení zvýšit napětí, aby se zachycené dislokace odtrhly od překážek nebo aby byly do pohybu uvedeny volné dislokace. Takto dochází k výraznému zvýšení hustoty dislokací a tím ke snížení jejich pohyblivosti. To způsobuje postupně náročnější podmínky tváření, jelikož materiál tak proti pokračující plastické deformaci zvyšuje svůj odpor a dochází k jeho zpevňování.

Proces zpevnění materiálu probíhá při tváření za nízkých teplot – za studena. Zpevnění při tváření za studena má významný vliv na mechanické, fyzikální i chemické vlastnosti kovu. Zpevnění se z hlediska mechanických vlastností projevuje růstem tvrdosti materiálu, pevnosti a meze kluzu viz obr. 11. Současným projevem je snížení vrubové houževnatosti, tažnosti a kontrakce, přičemž se vytrácí plasticita materiálu a dochází k jeho křehnutí. Z hlediska fyzikálních vlastností dochází po tváření o vysokém stupni deformace ke zmenšení hustoty materiálu a k růstu elektrického odporu, což je způsobeno vyšší hustotou dislokací v materiálu. V důsledku nehomogenity vnitřních napětí se s rostoucím stupněm tváření snižuje odolnost proti korozi.



Obr. 11 Změna mechanických vlastností v důsledku tváření za studena [1]

Důsledkem tvárné deformace není pouze změna tvaru tělesa, ale také výrazné submikroskopické změny struktury. Natačením kluzových rovin ve směru působících sil dochází ke změně tvaru zrn, původně polyedrická zrna se prodlužují ve směru převládající deformace. Dochází k prodloužení zrn dle obr. 12 a zároveň k usměrnění jejich krystalografických os, čímž vzniká struktura s nepřerušnými vlákny.



Obr. 12 Změna mikrostruktury v důsledku tváření za studena [15]

2.4 Odpevnění materiálu [11], [15], [16], [17]

Změny vlastností materiálu po tváření za studena, jako zvýšení pevnosti a tvrdosti, jsou většinou z hlediska technické praxe žádoucí. Avšak vyčerpání plasticity znemožňuje realizaci dalších tvářecích operací a zvýšená křehkost součástí omezuje rozsah aplikace. V takových případech je nutné materiál regenerovat, a tím mu vrátit jeho původní vlastnosti.

K tomuto slouží statické odpevňovací procesy. Po tváření za studena je v krystalové mřížce nahromaděna spousta vnitřní energie, která se zvyšuje s rostoucím stupněm deformace a deformovaná struktura je termodynamicky nestabilní. Základem regenerace vlastností jsou tepelně aktivované pochody difuzního charakteru, které umožňují návrat do rovnovážného výchozího stavu snížením vnitřní energie. Intenzita těchto tepelně aktivovaných dějů závisí na výšce teploty, době žhání a na stavu deformovaného kovu.

Rozlišují se tři stádia odpevňování:

1. Zotavení a polygonizace

Zotavením je dosaženo snížení deformační energie krystalové mřížky při zvýšené teplotě $[(0,1 \div 0,35) \cdot T_{\text{TAVENÍ}}]$, jejíž přesná velikost závisí na čistotě a stavu kovu. Mikrostruktura deformovaného kovu se nemění a orientace mřížky v jednotlivých zrnech zůstává zachována. Podle podstaty změn, které zotavení vyvolá v závislosti na výšce teploty se rozlišuje zotavení bodových poruch a zotavení dislokací. Zotavení bodových poruch probíhá již za nízkých teplot, kdy dojde k difuzi vakancí a intersticií, vzniklých při předchozí deformaci. Rychlost zotavování se exponenciálně zvyšuje s rostoucí teplotou.

Postupným zvyšováním teploty navazují na zotavení bodových poruch pochody, které způsobí přeskupování dislokací, čímž zajistí snížení uložené deformační energie, k čemuž dochází anihilací a také ustavením dislokací do stěn, představujících energeticky výhodnější konfiguraci. Tyto dislokační stěny vytvořené hromaděním dislokací tvoří subzrna mnohoúhelníkového tvaru, čímž tato fáze zotavení dostala název polygonizace. Při procesu zotavení nedochází ještě z důvodu nízkých teplot ke změnám mechanických vlastností.

2. Primární rekrystalizace

Z hlediska inženýrské praxe je důležitější rekrystalizace, jelikož za vyšších teplot dochází k rekrystalizačním pochodům, při kterých se výrazně snižuje hustota dislokací a mizí deformační zpevnění materiálu. Dochází k výrazným změnám mechanických vlastností, tvrdost a pevnost se snižují a houževnatost vzrůstá.

Jedná se o obnovení plasticky deformované struktury za studena na novou nedeformovanou strukturu původní fáze, aniž by došlo k překrystalizaci. Tento děj spočívá ve tvorbě zárodků nových zrn, které se postupně zvětšují a pohlcují původní zrna deformovaného materiálu. Nová zrna mají podstatně odlišnou orientaci proti zrnům původním, jsou souměrná a nevykazují prodloužení ve směru tváření.

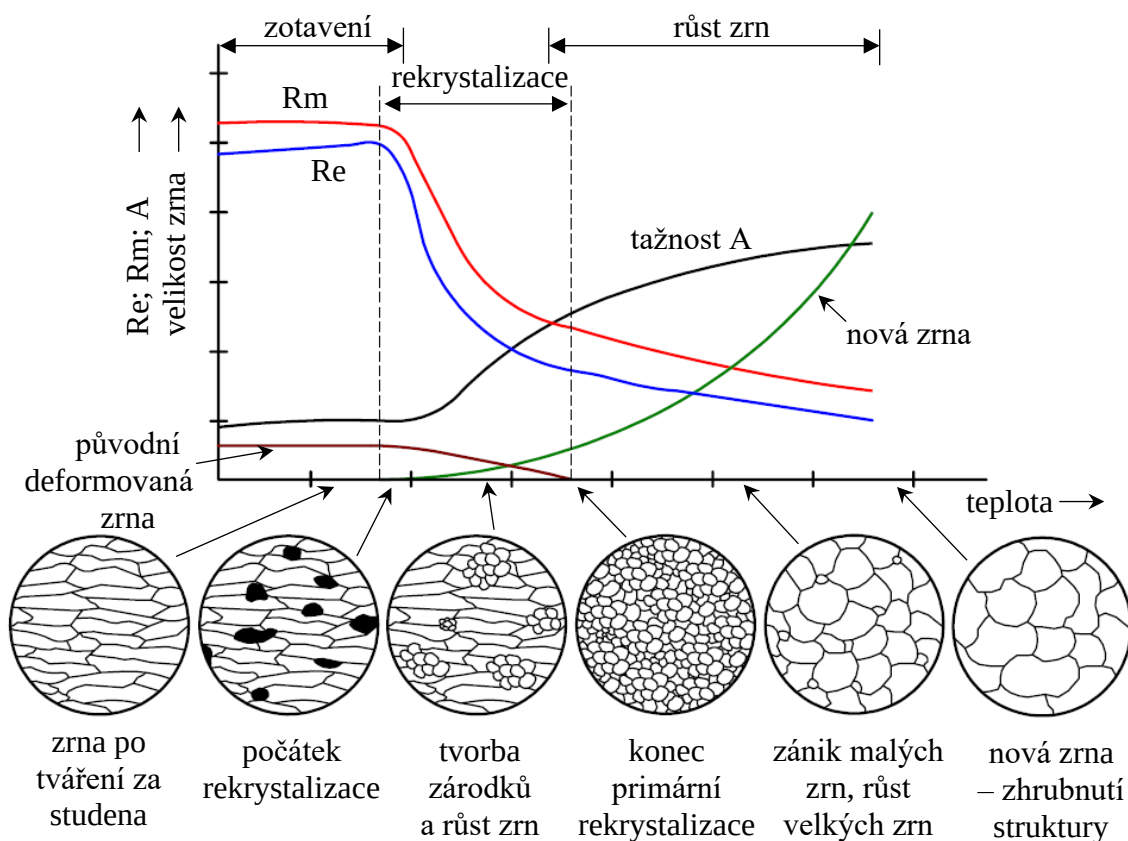
Výška rekrytalizační teploty závisí na stupni deformace, protože s rostoucí deformací roste termodynamická nestabilita kovu, a tím se rekrytalizační teplota snižuje. Taktéž chemická čistota má podstatný vliv, protože nečistoty v materiálu brzdí pohyb dislokací. Rozpětí teplot je udáváno ve vztahu k teplotě tání kovu jako $[(0,35 - 0,4) \cdot T_{\text{TAVENÍ}}]$.

S rostoucím stupněm přetvoření se aktivuje větší počet skluzových systémů, čímž se vytváří více míst vhodných pro nukleaci zárodků nových krystalů, které vznikají v místech s největší deformací. Čím větší je stupeň deformace, tím více roste počet zárodků a zmenšuje se velikost zrna – rekrytalizovaná struktura je jemnozrnější. U nízkých hodnot přetvoření je počet zárodků malý a zrna se vůči jejich výchozím velikostem zvětšují – struktura je hrubozrnější.

Proces rekrytalizace výrazně závisí na teplotě. S rostoucí teplotou se exponenciálně zvyšuje i rychlost rekrytalizace a doba potřebná k jejímu provedení klesá. Taktéž na velikost zrna má teplota podstatný vliv. Primární rekrytalizace je u konce v okamžiku, kdy všechna nová rostoucí zrna pohltila celý deformovaný materiál.

3. Sekundární rekrytalizace – růst zrn

Pokud po ukončení primární rekrytalizace zůstane materiál dále na rekrytalizační teplotě, uplatní se sekundární rekrytalizace a dochází k dalšímu růstu zrn. Hranice zrn se napřimují a malá zrna se zmenšují, zatímco větší rostou. Celkový povrch zrn se smršťuje, a tak dochází ke snižování energie kovu. Některé kovy mají v případě velkých přetvoření a za vyšších rekrytalizačních teplot sklon k abnormálnímu růstu zrn, která mohou narůstat různými způsoby. Zrna mohou srůstat například větším posuvem svých hranic nebo sjednocením orientace jejich krystalových mřížek. Takto dochází ke zhrubnutí struktury, čímž se můžou výrazně zhoršit mechanické vlastnosti materiálu. Průběh odpevňovacích procesů a jejich vliv na deformovaný materiál zobrazuje obr. 13.



Obr. 13 Schematické znázornění průběhu odpevňovacích procesů [15]

2.5 Stárnutí kovů [11], [18]

Ocelové výrobky tvářené za studena postupem času podléhají určitým změnám mechanických a fyzikálních vlastností, ke kterým dochází v průběhu doby uložení či skladování materiálu při teplotě pokojové nebo vyšší. Roste zejména tvrdost materiálu a snižuje se vrubová houževnatost, ocel se zpevní a zkřehne. Tento jev je označován jako tzv. stárnutí materiálu.

V krystalové mřížce dochází k interakci dislokací s intersticiálně uloženými cizími atomy, především dusíku a při zvýšené teplotě i uhlíku, velmi nepatrně také vodíku a kyslíku. Atomy dusíku se snaží přesunout do energeticky nejvýhodnějších poloh a přemísťují se do okolí dislokací, kde se hromadí a zabraňují jejich pohybu.

Vliv stárnutí na vlastnosti materiálu je velice nežádoucí a lze jej odstranit snížením obsahu dusíku v oceli, a to tak, že je dusík chemicky vázán na prvky s vyšší afinitou, což jsou například hliník, zirkon, vanad nebo titan. Také je možné realizovat malé plastické přetvoření, čímž dojde k uvolnění dislokací a renovaci materiálu z hlediska schopnosti tváření. To se provádí například válcováním za studena s malým úběrem (cca 1 %). Také snížením doby skladování lze předejít stárnutí, případně je nutné materiál poslat na tepelné zpracování, kde se vliv stárnutí eliminuje například normalizačním žíháním.

2.6 Odpory při tváření [1], [19]

Důležitou mechanickou vlastností materiálu je jeho odpor proti vzniku a rozvoji plastických deformací, který roste při procesu tváření v průběhu uskutečňování jednotlivých mechanismů za přítomnosti smykových napětí. Při tváření kovů je nutné tento odpor překonat, aby mohlo dojít k požadované změně tvaru tvářeného tělesa. Tento odpor se nazývá deformační odpor a vyjadřuje se velikostí napětí vyvolaných vnějšími silami, která jsou potřebná ke vzniku trvalých deformací. Současně má i stejný rozměr jako napětí.

Deformační odpor kovů je závislý na velkém množství činitelů. Celkový technologický deformační odpor představuje součet přirozeného přetvárného odporu a odporu, jenž vyjadřuje vliv pasivních technologických odporů.

Přirozený přetvárný odpor je vnitřní odpor kovu proti působení vnějších sil, při kterém nastane počátek plastické deformace. Obecně charakterizuje fyzikální povahu materiálu jako jeho vlastnost, závisující na teplotě tváření, chemickém složení materiálu, velikosti deformace a rychlosti deformace, mezi kluzu a mezi pevnosti.

Chemické složení materiálu má značný vliv na přirozený přetvárný odpor, jelikož chemicky čisté kovy kladou nižší odpor než tuhé kovové roztoky a slitiny. Výška teploty podstatně ovlivňuje hodnotu přirozeného přetvárného odporu, s rostoucí teplotou se jeho velikost výrazně snižuje. Naopak s rostoucí rychlostí deformace, například rázovým působením vnějších sil, velikost přirozeného přetvárného odporu vzrůstá v porovnání se statickým účinkem těchto sil a materiál se zpevňuje.

Pasivní technologické odpory charakterizují vnější vlivy přítomné v průběhu procesu tváření:

- vliv vnějšího tření na stykové ploše nástroje a tvářeného materiálu,
- vliv změn teplotních podmínek,
- vliv změny geometrie – změna tvaru průřezu, výšky atd.,
- vliv lokálních změn rychlosti deformace při tečení kovu,
- vliv stupně zaplnění tvářecího nástroje,
- vliv nerovnoměrné napjatosti,
- tvar pásma deformace.

2.7 Přetvárná síla a práce [1], [19]

Aby mohla požadovaná tvářecí operace proběhnout, je třeba určité tvářecí síly, která nesmí přesáhnout hodnotu jmenovité tvářecí síly použitého stroje. Tvářecí síla je určena deformačním odporem působícím na čelní průmět plochy tělesa v dotyku s nástrojem:

$$F = \sigma_d \cdot S \text{ [N]} \quad (2.1)$$

kde:

F [N] – tvářecí síla

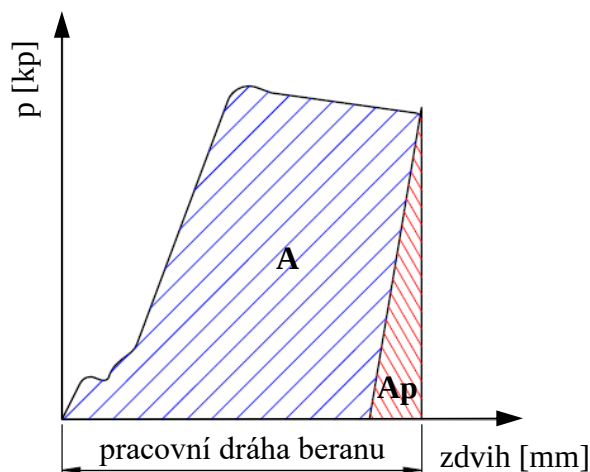
σ_d [MPa] – deformační odpor

S [mm²] – průřez činné části nástroje

Vzhledem k pevnosti tvářecích nástrojů nesmí hodnota maximálního deformačního odporu překročit dovolené tlakové namáhání příslušných částí nástrojů.

Tvářecí sílu je nutné znát z hlediska dimenzování nástrojů a zejména pro správnou volbu vhodného tvářecího stroje. Z tohoto hlediska je důležitý především její průběh v závislosti na pracovní dráze. Tento je porovnáván s pracovním diagramem příslušného stroje, který udává přípustné síly na beran lisu. Tímto postupem se kontroluje dovolené zatížení stroje, čímž se předchází případnému přetížení stroje nepřipustným kroutícím momentem.

Tvářecí síla má při jednotlivých metodách objemového tváření za studena různý průběh. Například dle obr. 14 při dopředném protlačování je její průběh po celé pracovní dráze konstantní, s výjimkou počátečního náběhu. Charakteristika náběhu je ovlivněna zejména geometrií čela průtláčnicku a způsobem protlačování.



Obr. 14 Závislost průběhu tvářecí síly na pracovní dráze při protlačování [19]

Výpočet a kontrola maximální tvářecí síly vede k výběru vhodného stroje z hlediska jeho přípustného silového zatížení. Z hlediska zatížitelnosti pohonu stroje neboli setrvačnicku a hnacího elektromotoru, je nutné provést a ověřit výpočet hodnoty tvářecí práce. Práce tvářecí síly je dána vztahem:

$$A_s = F \cdot h = \int_0^h \sigma_d \cdot S \cdot dh = \int_0^h \sigma_d \cdot \frac{V}{h} \cdot dh = V \cdot \int_0^\varphi \sigma_d \cdot d\varphi = A_j \cdot V \text{ [J]} \quad (2.2)$$

kde:

A_s [J] – práce tvářecí síly

h [m] – výška výlisku

V [m³] – objem součásti

A_j [J.mm⁻³] – měrná přetvárná práce

Měrná přetvárná práce A_j je udávána v deformačních diagramech a vyjadřuje plochu pod křivkou zpevnění vyjádřenou deformačním odporem.

2.8 Tvařitelnost kovů a charakteristiky deformace – přetvoření [1], [14]

Při působení síly na těleso je celková poměrná deformace tělesa tvořena dvěma složkami, elastickou a plastickou složkou deformace.

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl} [\%] \quad (2.3)$$

Změny tvaru těles jsou pozorovány především až po odlehčení působící síly, jedná se tedy o poměrné deformace plastické a v teorii tváření nesou název poměrná přetvoření.

- Poměrné přetvoření v tahu a tlaku:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \pm \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.4)$$

- Logaritmické přetvoření pro stlačení:

$$\varphi = \int_{L_0}^L -\frac{dL}{L} = -(\ln L - \ln L_0) = \ln \frac{L_0}{L} \quad (2.5)$$

Logaritmické přetvoření, a především jeho hlavní složky, slouží k vyjádření přetvoření tělesa ve směrech hlavních os souřadného systému. Vychází se ze zákona o konstantním objemu.

Tvařitelnost kovových materiálů a jejich slitin je schopnost trvale měnit tvar bez porušení tvářeného tělesa v daných technologických podmínkách, za kterých je možné vyrobit součást s požadovanými rozměry a vlastnostmi. Tvařitelnost je ovlivněna deformačním odporem materiálu. Základní vlastností materiálu z hlediska uskutečnění tvářecího procesu je plasticita, jež je definována velikostí plastické deformace do porušení součásti za konkrétních termodynamických podmínek – teplota, napjatost, rychlost plastické deformace.

Technologické zkoušky tvařitelnosti se provádí v podmínkách blízkých skutečným tvářecím operacím. Slouží k přesnějšímu určení, zdali je materiál vhodný k danému přetvoření na navrhovaný tvar součásti.

Objemová tvařitelnost za studena je posuzována zejména pēchovací zkouškou, která slouží ke zjišťování důležitých charakteristik materiálu jako jsou například přirozený přetvárný odpor, technologický přetvárný odpor, pēchovatelnost atd.

Cílem pēchovací zkoušky je získat a stanovit funkci $\sigma_d(\varphi)$, neboli křivku zpevnění, což je závislost přirozeného přetvárného odporu na logaritmickém přetvoření. Pēchovací zkouška slouží k určení mechanických vlastností a jejím výsledkem je pracovní diagram, který udává:

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

2.9 Zákony tváření [1]

Procesy tváření se řídí řadou zákonitostí, které tvoří nezbytný teoretický základ pro rozbor tvářecích technologií.

- Zákon stálosti objemu

Jedná se o jeden z nejdůležitějších zákonů tvářecího procesu, jehož podstatou je princip zachování objemu – objem tvářeného tělesa před přetvořením je roven objemu po přetvoření. Podstatná nehomogenní přetvoření v hlavních směrech souřadného systému [x; y; z] jsou definována hodnotami skutečných – logaritmických přetvoření, jejichž součet je roven nule.

Libovolné těleso, například elementární hranol, má rozměry před přetvořením x_0, y_0, z_0 a objem V_0 . Tento výchozí objem V_0 je roven konečnému objemu V_1 tělesa o rozměrech x_1, y_1, z_1 , které dostaneme po přetvoření.

$$\begin{aligned} V_0 &= V_1 \\ x_0 \cdot y_0 \cdot z_0 &= x_1 \cdot y_1 \cdot z_1 \\ \frac{x_1 \cdot y_1 \cdot z_1}{x_0 \cdot y_0 \cdot z_0} &= 1 \end{aligned} \quad (2.6)$$

Dále je rovnice logaritmována a úpravou jsou vyjádřeny hlavní směry přetvoření v osách, čímž je stanovena matematická formulace tohoto základního zákona.

$$\begin{aligned} \ln \frac{x_1}{x_0} + \ln \frac{y_1}{y_0} + \ln \frac{z_1}{z_0} &= 0 \\ \varphi_x + \varphi_y + \varphi_z &= 0 \end{aligned} \quad (2.7)$$

- **Zákon nejmenšího odporu**
Pohyb částic uvnitř materiálu při procesu tváření se může uskutečňovat v různých směrech po různých drahách. Směr nejmenšího odporu proti pohybu částic ve tvářené součásti bude ze všech možných směrů ten nejvíce převládající. Velikost odporu proti změně tvaru je přímo závislá na délce dráhy, kterou musí částice při přetváření urazit. Tento zákon má svůj význam v praxi především při tváření v uzavřených nástrojích.
- **Zákon tření**
Tření mezi tvářenou součástí a nástroji je jedním ze základních jevů objemového tváření doprovázející každý tvářecí proces. Obecně je tření definováno jako odpor proti relativnímu pohybu dvou nebo více těles, které jsou v těsném kontaktu a jejich povrchy se dotýkají. Existuje několik druhů tření jako je suché tření, mezní, hydrodynamické a smíšené. Vzniklý třecí odpor je nutné eliminovat.
- **Zákon přídavných napětí**
V reálném procesu tváření vznikají v materiálu lokální nerovnoměrné napjatosti, a tím i nerovnoměrné deformace. Toto může být způsobeno třením mezi povrchem tvářené součásti a nástroji, nerovnoměrným rozložením teplot uvnitř součásti, složitým tvarem součásti a nástroje, chemickou nestejnorodostí nebo nerovnoměrnými mechanickými vlastnostmi tvářeného kovu.
Takto vznikají v materiálu vnitřní přídavná napětí, která se vzájemně vyrovnávají. S ohledem na vnější podmínky rovnováhy nemohou být tato napětí zahrnuta do schématu napjatosti tělesa, avšak trvale doprovází každý tvářecí proces a způsobují napětí uvnitř tělesa, která snižují chemickou odolnost materiálu a zmenšují tvárnost, přičemž mohou způsobit i dodatečné deformace v podobě nežádoucího zborcení tvaru a ploch. Za účelem jejich eliminace nebo úplného odstranění se provádí žíhání na odstranění napětí.

Jako další zákony tváření lze uvést:

- zákon stálosti potenciální energie změny tvaru,
- zákon maximálních smykových napětí a zákon zpevnění,
- zákon odpružení po trvalé plastické deformaci,
- zákon podobnosti.

3 OBJEMOVÉ TVÁŘENÍ ZA STUDENA [19], [20], [21]

Kovové polotovary jsou plasticky deformovány specifickými nástroji ve tvářecích strojích s cílem dosáhnout požadovaného tvaru součásti, která má zároveň i lepší konečné mechanické a fyzikální vlastnosti.

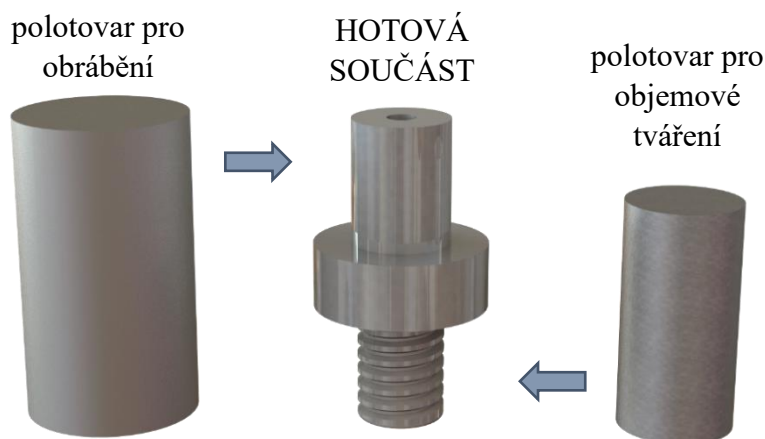
Při technologii objemového tváření kovů dochází k podstatné změně tvaru v celém objemu výchozího polotovaru. Jedná se o vysoce produktivní a hospodárnou metodu, která je aplikována při výrobě součástí různých tvarů a velikostí, počínaje spojovacími součástmi v podobě šroubů a matic, dále například ozubená kola, části převodovek a diferenciálů v automobilovém průmyslu viz obr. 15, až po velké hřídele průmyslových strojů nebo zaoceánských lodí.

Objemové tváření za studena se provádí za výrazně nižších teplot, než je teplota rekrystalizace, často za pokojové teploty kovu. V materiálu vzniká a působí všestranná prostorová napjatost, která umožňuje velké plastické deformace bez porušení jeho soudržnosti. Na základě tohoto jevu je dosaženo maximálního využití hmoty výchozího polotovaru a zlepšení jeho mechanických vlastností, což jsou důležité výhody této technologie v porovnání s jinými výrobními metodami.

Vysoká produktivita objemového tváření stojí za rozšířením této technologie nejen v hromadné, ale i velkosériové a sériové výrobě. V porovnání s třískovým obráběním, při kterém dochází k vysokým ztrátám materiálu a nevhodnosti procesu, se při tváření dosahuje



Obr. 15 Polotovar pro pastorek do převodovky automobilu



Obr. 16 Srovnání využití materiálu vstupního polotovaru

tvaru a rozměrů součásti v průběhu nízkého počtu operací, případně jedním úderem tvářecího stroje. Tímto se oproti obrábění dosahuje výrazně kratších výrobních časů, úspory materiálu a snižují se náklady a pracnost výroby.

Srovnání využití materiálu vstupního polotovaru výrobou součásti třískovým obráběním a objemovým tvářením za studena je obr. 16.

Nevýhodou objemového tváření za studena je potřeba velkých tvářecích sil, od čehož se odvíjí i vysoká cena strojů a nástrojů. Dále také omezená tvárnost materiálu v důsledku zpevňování, a s tím související nutné zařazení průběžných úprav materiálu a tepelného zpracování do výrobního postupu.

Mezi základní metody technologie objemového tváření za studena patří:

- protlačování,
- pěchování,
- vtlačování,
- ražení,
- válcování závitů a drážek,
- tažení drátů.

3.1 Protlačování [19], [20], [22], [23]

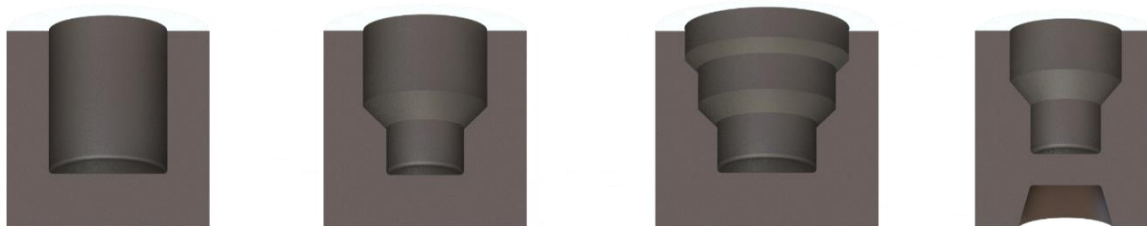
Protlačování kovových polotovarů je jedna ze základních a nejvýznamnějších metod objemového tváření za studena. Jedná se o velmi efektivní, produktivní a hospodárnou metodu, při níž dochází k minimální ztrátě výchozího materiálu – bývá využito i 100 % materiálu polotovaru. Jelikož protlačování probíhá pod teplotou rekrystalizace a kov se přetváří za studena, materiál se zpevňuje a zlepšují se mechanické vlastnosti výrobků. Významné změny mechanických vlastností jsou především zvýšení pevnosti a tvrdosti výrobku, zvýšení meze únavy materiálu, tvoří se usměrněná struktura a nepřerušená vlákna uvnitř výrobku, který má kvalitní zpevněný povrch bez okujů a vysoce přesné geometrické rozměry. Hotové součásti se vyznačují velmi vysokou kvalitou povrchu a vysokou přesností, přičemž je možné dosáhnout hodnoty drsnosti povrchu až $Ra\ 0,8$ a výrobních tolerancí IT6 až IT8. Mezi další charakteristické výhody technologie protlačování se řadí vysoká produktivita výroby, snížení výrobních časů, výrobních nákladů a vysoká kvalita výrobků. Protlačování se používá především v sériové a hromadné výrobě.

Hlavní funkční nástroje v technologii protlačování se nazývají průtlačnice a průtlačník. Principem protlačování je vložení studeného polotovaru o pokojové teplotě do nástroje – průtlačnice, kde je vystaven tlakům působením síly stroje prostřednictvím průtlačníku a po překročení dané hodnoty přetvárného odporu mění svůj tvar plastickým tečením dle konstrukce nástrojů navržených na základě požadavků na konečný tvar součásti.

Polotovarem pro protlačování je ve většině případů tyč, případně trubka. Součásti mohou být tvaru kalíšků, pouzder, prstenců, čepů, nábojů atd. Výrobky mohou být nesymetrické, avšak většinou jde o symetrické součásti, jejichž tvary mohou být členité, mohou mít stupňovitý povrch, různé příruby či proměnnou tloušťku materiálu. V případě složitějších tvarů mají součásti navíc boční výstupky, hranaté obrysy atd. Hmotnost výrobků se pohybuje od několika gramů až do desítek kilogramů.

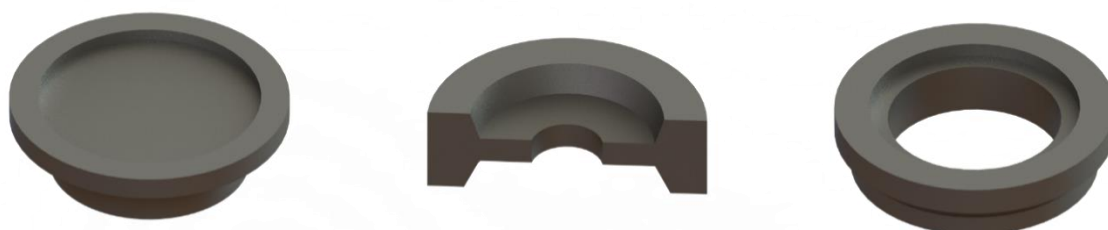
Podle směru a způsobu pohybu tvářeného materiálu vůči průtlačníku se protlačování dělí na dopředné, zpětné, kombinované, stranové.

- Základní druhy součástí vyráběné protlačováním dle charakteristických tvarových znaků:
 - a) součásti kalíškového tvaru



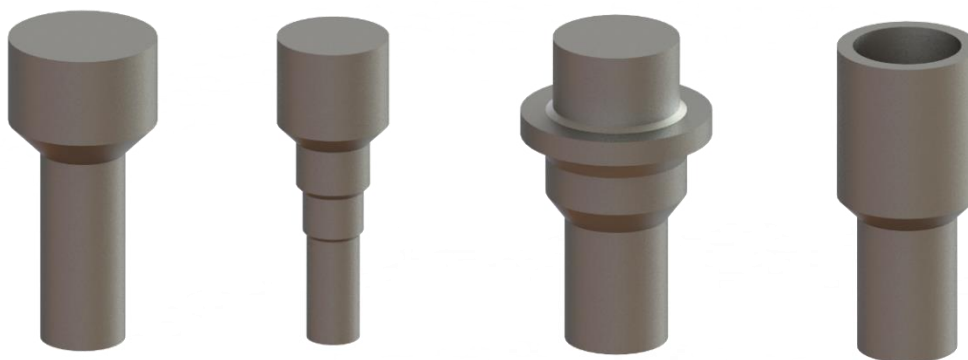
Obr. 17 Příklady tvaru výrobků protlačováním [19]

- b) nízké rotační součásti



Obr. 18 Příklady tvaru výrobků protlačování [19]

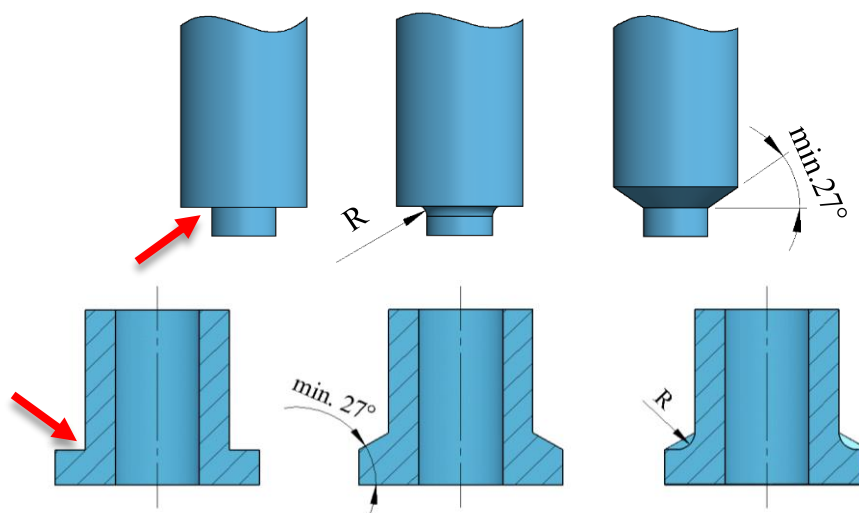
c) součásti čepového tvaru



Obr. 19 Příklady tvaru výrobků protlačováním [19]

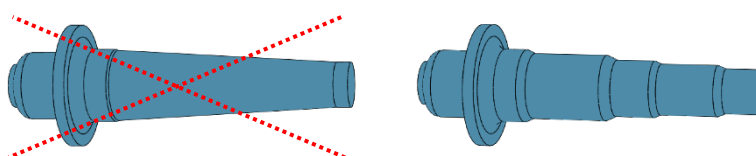
▪ Technologičnost součástí

Při návrhu součásti zhotovené protlačováním je nutné dodržení určitých technologických zásad. Je zapotřebí se vždy vyhnout náhlým přechodům a náhlým změnám příčného průřezu, tvorbě ostrých hran a rohů. Ostré hrany brzdí a zabraňují toku materiálu, čímž se výrazně zvyšuje přetvárný odpor, tudíž i tvářecí síla a namáhání nástrojů a stroje. Pokud z konstrukčních důvodů není možné se vyhnout těmto tvarovým prvkům, lze jejich negativní vliv eliminovat navržením náběhového kužele s úhlem nejméně 27° nebo vhodným zaoblením rohu dle obr. 20, v tomto případě je ovšem následně zapotřebí další tvářecí operace.



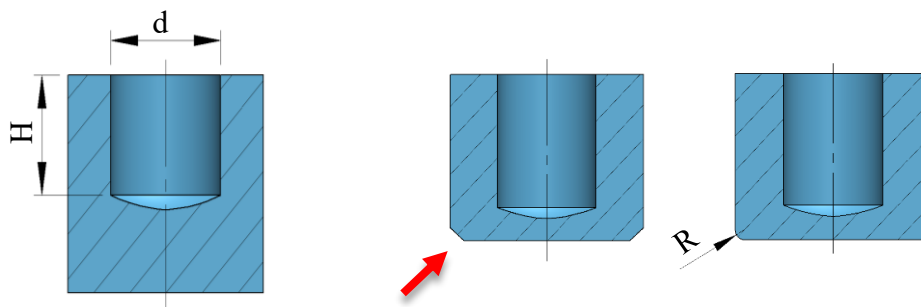
Obr. 20 Řešení eliminace ostrých rohů a hran [19]

Pokud je nutné vyrobit součást s vnějším nebo vnitřním kuzelem, je to velmi obtížné a kužele se takto vyrábí pouze v případech menších rozměrů. Při výrobě kuželových ploch vzniká velmi velké tření o stěny nástroje, tvářený materiál působí jako klín, a proto je výhodnější a ekonomičtější kuželové části dokončit obráběním. Jako alternativní řešení a náhrada kuželových ploch se pro tváření volí odstupňování vnějšího průměru viz obr. 21.



Obr. 21 Kuželové plocha nahrazena odstupňováním [19]

U součástí tvaru kalíšku, u nichž je tloušťka dna větší než tloušťka stěny, lze ostré hrany tolerovat. Avšak pokud je tloušťka dna menší nebo stejná jako tloušťka stěny, dochází k porušování materiálu v rozích, které plně nezatečou. Hloubka dutiny může být nejvýše dvojnásobek jejího průměru, jinak dochází k pěchování a ohýbání průtláčníků. Tyto zásady jsou znázorněny pomocí obr. 22.



Obr. 22 Řešení technologičnosti součásti [19]

3.2 Materiály pro protlačování a jejich příprava

3.2.1 Vlastnosti materiálů vhodných k protlačování [14], [19], [20], [21], [24]

Technologií objemového tváření za studena se zpracovávají neželezné kovy i ocel. Z neželezných kovů se nejlépe protlačují čisté kovy, které dosahují dobré jakosti s čistým povrchem. Nejvíce využívaným neželezným kovem k protlačování je hliník. Neželezné kovy lze protlačovat snadněji než oceli, avšak ocelové výrobky tvoří většinu protlačovaných součástí.

Ocel je nejrozšířenějším a nejčastěji využívaným materiálem ve strojírenském průmyslu. Oceli ke tváření jsou materiály, jejichž hmotnostní podíl železa je značně větší než podíl kteréhokoliv jiného prvku, všeobecně vykazují méně než 2 % uhlíku a obsahují i další množství prvků. Větší množství uhlíku a legur v oceli zvyšuje přetvárný odpor, materiál pak špatně zaplňuje dutinu tvářecího nástroje. Nejvhodnější jsou oceli s obsahem uhlíku do 0,2 %, s jemnozrnnou strukturou a s minimálním množstvím vměstků a vad.

Mezi požadované vlastnosti materiálů vhodných k protlačování patří nízká mez kluzu, malý sklon ke zpevnění a dobrá tvárnost, která je dána krystalovou strukturou. Oceli s dobrou tvárností za studena mají strukturu umožňující kluzu při překročení kritického napětí v určitých směrech, aniž by se narušila soudržnost vrstev, které se po sobě pohybují. Tvárnost oceli za studena se v technické praxi posuzuje na základě chemického složení, mechanických vlastností, nejvyššího stupně deformace a deformačních křivek. Nejvhodnější jsou oceli s velmi plochou deformační křivkou, vysokou tažností a kontrakcí a nejnižší mezí kluzu.

Volba materiálu pro objemové tváření za studena musí uvažovat zpracovatelské vlastnosti oceli s ohledem na druh vyráběné součásti a typ její výroby. Například v případě výroby velkosériové s využitím automatických strojů je vhodné zvolit materiál s velkou tvárností, aby dobře zaplňoval tvar dutiny nástroje a aby k dosažení požadovaných vlastností nebylo zapotřebí komplikovaného tepelného zpracování. Stejně jako technologické vlastnosti použitého materiálu je neméně důležitý i druh vyráběné součásti a její požadované vlastnosti, které je samozřejmě nutno při výběru zohlednit.

Množství jednotlivých prvků obsažených v oceli ovlivňuje především její tvárnost.

Uhlík i křemík způsobují svým rostoucím množstvím pokles tvárnosti oceli, zmenšují tažnost a kontrakci materiálu, přičemž současně roste hodnota meze pevnosti, meze kluzu a zvyšuje se tvrdost. Při vyšším obsahu uhlíku než 0,25 % je zapotřebí materiál tepelně upravit k dosažení struktury zrnitého perlitu, která je charakteristická největší tvárností. U ocelí s vyšším obsahem uhlíku (> 0,45 % C) je nutné před tvářením zařadit předehřev.

Síra a fosfor jsou škodlivou příměsí v materiálu. Jejich množství v oceli by nemělo překročit více než 0,035 %. Snižují houževnatost oceli a slučují se se železem na sulfid železnatý, který se v železe nerozpouští. Negativní vliv síry se eliminuje přidáním manganu, který se slučuje se sírou snadněji než železo a tvoří sulfid manganatý, jež v oceli není tak škodlivý jako sulfid železnatý. Fosfor v oceli způsobuje při tváření za studena křehkost a vznik rádkovité struktury.

Mangan snižuje tvárnost materiálu, a proto by neměl být v oceli obsažen více, než je zapotřebí ke kompenzaci negativního vlivu síry. Doporučené množství je nejvýše 0,5 %.

Kyslík je v oceli přimíslený nežádoucí prvek a jeho obsah se snižuje přísadou prvků, které mají vyšší afinitu ke kyslíku než železo, jako například mangan, křemík, hliník, což se nazývá dezoxidace. Podle rozsahu provedené dezoxidace jsou oceli děleny na dva druhy, uklidněné a neuklidněné.

Dusík zapříčiňuje stárnutí oceli a má nežádoucí účinek na mez únavy.

Níkl, vanad a hliník zlepšují tvárnost materiálu.

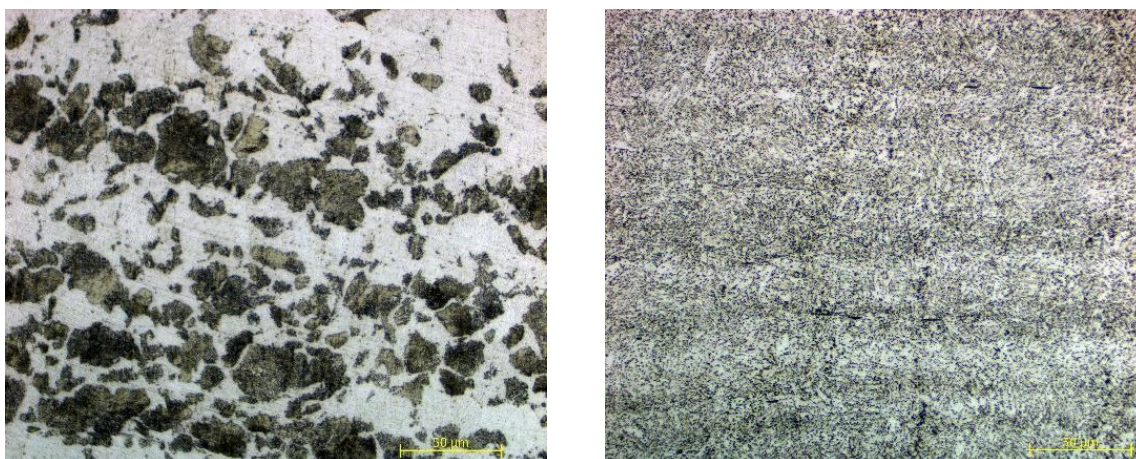
Chrom v uhlíkových ocelích by měl být obsažen v množství maximálně 0,15 %. Svým vyšším obsahem (> 1 % Cr) zvětšuje tvrdost a zmenšuje tvárnost oceli.

Základní druhy ocelí používané k objemovému tváření viz tab. 1.

Tab. 1 Základní druhy ocelí pro produkty objemového tváření za studena [19]

Oceli dle ČSN		Chemické složení								
		C	Mn	Si	Cr	V	Ni	Cu	P	S
Oceli běžné výroby	11 341	0,10							0,05	0,05
	11 426	0,15							0,05	0,05
	11 523	0,20	1,5	0,55					0,05	0,05
Uhlíkové ušlechtilé oceli	12 013	0,07	0,30						0,03	0,03
	12 010	0,13	0,60	0,35					0,04	0,04
	12 020	0,20	0,90	0,35					0,04	0,04
	12 024	0,25	0,65	0,37	0,30		0,30		0,05	0,05
	12 031	0,35	0,80	0,37	0,30		0,30		0,04	0,04
	12 040	0,40	0,80	0,35					0,04	0,04
	12 050	0,50	0,80	0,35					0,04	0,04
Ušlechtilé nízkolegované oceli	13 240	0,40	1,40	1,40					0,04	0,04
	14 120	0,18	0,60	0,35	0,90				0,04	0,04
	14 220	0,19	1,40	0,35	1,10				0,04	0,04
	14 221	0,22	1,30	0,35	1,30				0,04	0,04
	14 331	0,35	1,10	1,20	1,10		0,40	0,25	0,03	0,03
	15 230	0,34	0,80	0,40	2,50	0,20			0,04	0,04
	15 260	0,55	1,00	0,40	1,20	0,20			0,04	0,04
	16 220	0,19	1,00	0,25	1,20	0,15	1,60		0,04	0,04

Mikrostrukturu ocelí vhodných ke tváření za studena tvoří směs feritu a perlitu. Čím větší je v oceli obsah uhlíku, tím více se v ní vyskytuje perlit, přičemž nejlepší tvárnosti dosahují oceli, jejichž mikrostrukturu tvoří perlit globulární. Tato struktura zajišťuje největší měkkost a houževnatost. Rostoucí obsah perlitu ovšem snižuje tvárnost materiálu, která se naopak s rostoucím množstvím feritu zvyšuje, a proto je nejvhodnější dosáhnout optimální mikrostruktury feritické, feriticko-perlitické ideálně s globulárním perlitem. V případě nerovnoměrného uspořádání struktury, ve které se tvoří perlitové shluky, se materiál stává náchylný na tvorbu prasklin. Na obr. 23 jsou znázorněny zmíněné druhy mikrostruktur materiálů určených k objemovému tváření za studena.



Obr. 23 Vlevo struktura feriticko-perlitická, vpravo s globulárním perlitem

3.2.2 Příprava polotovaru [16], [17], [18], [19], [22], [25], [26], [27], [28], [29]

1. *Mechanická povrchová úprava a dělení polotovaru*

Nejčastěji se jako výchozí polotovar pro technologii protlačování za studena volí tyč, případně trubka. Materiál nesmí obsahovat vady jako jsou vměstky, bubliny, trhliny, okuje, rýhy, segregace atd., v případě jejich přítomnosti hrozí riziko nevyhovující jakosti konečného výrobku. Tyčové polotovary, jakožto produkty hutního průmyslu, přichází do výrobního závodu z oceláren v délkách většinou několika metrů a v průměrech daných buď normou, nebo v některých případech dle konkrétního specifického požadavku zákazníka ocelárny. Tyto délky a surový stav tyčových polotovarů nevyhovují výrobě, proto je nutné provést před samotným tvářením patřičné úpravy a polotovar na výrobu připravit. Stejně tak po dlouhodobém skladování již připraveného materiálu je zapotřebí věnovat přípravě polotovaru patřičnou pozornost z důvodu oxidace povrchu a stárnutí oceli.

Před samotným zpracováním a úpravou tyčí může dojít k jejich ohnutí a pokrivení vlivem dlouhodobého skladování, transportu, manipulace atd. V takovém případě je nutné do předvýroby zařadit rovnání tyčových polotovarů.

Následuje dělení tyčového materiálu na špalíky (v případě zpětného protlačování na kaloty – průměr je větší než výška polotovaru). Dělení lze provádět různými způsoby jako lámáním, sekáním, řezáním laserem či vodním paprskem, stříháním nebo třískovým dělením – řezáním na pile. Řezání na pásových či kotoučových pilách je nejrozšířenější metoda dělení tyčových polotovarů pro protlačování.

Pokud povrch materiálu obsahuje vady jako jsou povrchové vrstvy oxidů, okuje, naválcované nečistoty, rýhy, trhliny a otřepy vznikající při výrobě polotovaru za tepla kovááním či válcováním, je nutné provést mechanické čištění povrchu ještě před uskutečněním chemického čištění na lince povrchových úprav. Jedním z možných řešení je použití loupací linky či peelingového CNC stroje k loupání tyčových polotovarů před jejich dělením. Další z nejvyužívanějších řešení mechanického čištění je tryskací zařízení na otryskání povrchu již nařezaných polotovarů, což je progresivní a efektivní způsob sloužící k odstranění daných povrchových vad a nečistot. Otryskávání se uskutečňuje tlakem proudu jemných abrazivních částic a zajišťuje povrch materiálu, který má lepší přilnavost rovnoměrně strukturovaných fosfátovaných povlaků a mazacích vrstev. Pro tryskání se používají kovové nebo nekovové tryskací prostředky. Nejlepších výsledků úpravy povrchu a přilnavosti povlaku dosahuje ostrohranný drcený korund, který má ovšem velmi vysokou cenu. Nejčastěji se jako abrazivum používají ocelové broky a ocelový granulát, dále lze použít křemičitý písek, keramické mikrokuličky nebo sekaný drát. Čistící účinek abraziva se zvyšuje se snižující se velikostí použitých částic, avšak tímto se zase zvyšuje riziko, že velmi malé částice mohou zůstat zaryté v povrchu kovu. Běžná velikost abrazivních částic je kolem 1 mm.

2. Tepelné zpracování

Účelem tepelného zpracování před tvářením je snížení pevnosti a zvýšení tvárnosti materiálu. U ocelí s obsahem uhlíku vyšším než 0,2 % je nutné přihlížet i k tvaru a rozložení perlitu ve struktuře. Tepelné zpracování by mělo především zajistit odstranění shluků páskového perlitu a sferoidizaci cementitu. Druh tepelného zpracování se volí dle jakosti zpracovávaného materiálu a protlačovací operaci. Provádí se nejčastěji v rotačních, hlubinných nebo průběžných pecích.

Nejčastějšími druhy tepelného zpracování před tvářením za studena jsou:

- **Žihání na měkko**

Tato metoda tepelného zpracování se provádí za účelem snížení tvrdosti a získání vhodných mechanických a fyzikálních vlastností pro následující tvářením za studena. Základním postupem žihání na měkko je ohřev na teplotu blízkou teplotě A_{c1} a několikahodinová výdrž na této teplotě. Požadované změny nastávají sferoidizací perlitického cementitu. Podeutektoidní oceli jsou žhány v teplotním intervalu 600 až 700 °C po dobu čtyř i více hodin, následuje pomalé ochlazování v peci. Při tomto žhacím režimu dochází ke změně lamelárního perlitu na perlit globulární.

- **Normalizační žihání**

Normalizační žihání se provádí za účelem zjemnění a homogenizace hrubozrnné struktury, která v oceli vzniká při lití, tvářením za vysokých teplot nebo dlouhodobým žháním za vysoké teploty. U podeutektoidních ocelí se provádí ohřevem na teplotu o 30 až 50 °C nad bodem přeměny A_{c3} a následně buď volným ochlazováním na vzduchu nebo pozvolným ochlazováním v peci. Tímto způsobem vzniká jemné, stejnoměrně velké zrna.

- **Rekrystalizační žihání**

Někdy je prováděno i před samotným tvářením pro zlepšení tvárnosti především povrchu polotovaru po válcování, případně otlučení při transportu a manipulaci s materiálem, převážně v případě dopředného protlačování o značném přetvoření, kde dochází k deformaci částečně zpevněného povrchu. Rekrystalizační žihání spočívá v ohřevu na teplotu v oblasti rekrystalizace, výdrži na této teplotě a následném ochlazení. Tento druh tepelného zpracování zajišťuje odpevnění materiálu po tvářením za studena, kdy obnovuje deformovanou strukturu a dochází i k obnově původních vlastností materiálu, v některých případech dochází díky rovnoměrnější struktuře po tvářením dokonce ke zlepšení vlastností vůči původním. Rekrystalizačním žháním se mění mechanické charakteristiky kovu, snižuje se pevnost a tvrdost, zvyšuje se tvárnost a nárazová práce materiálu. Proto bývá tento žhací režim využíván jako mezioperační žihání při výrobě součástí na větší počet operací, kde je po určitém stupni přetvoření a zpevnění materiálu nutné obnovit tvárnost k uskutečnění dalších kroků výrobního postupu.

3. Povrchové úpravy polotovaru

Hlavním účelem povrchových úprav polotovarů před protlačováním je vytvoření příznivých podmínek pro vlastní operaci tvářením, především snížení tření, deformační síly a práce, počtu výrobních operací, zlepšení kvality povrchu výrobků a zvýšení životnosti nástrojů.

Pro čištění povrchů kovů před tvářením za studena je v rámci povrchových úprav široce využíváno chemických procesů, které se uskutečňují v daných procedurách probíhajících na pracovišti mechanizovaných a automatizovaných linek povrchových úprav (LPÚ).

Polotovary jsou nasypány do košů, které se ponořují do van s danými lázněmi a v nich se koše pomalu otáčejí kolem vlastní osy, čímž je zajištěno řádné propírání kusů uvnitř a zvyšuje se kvalita provedených operací. Mezi jednotlivými lázněmi dle postupu na LPÚ musí být zařazen násobný oplach sloužící k neutralizaci pH po vyjmutí kusů z lázně. Postup pro povrchovou úpravu polotovaru z nízkouhlíkové oceli na LPÚ zobrazuje tab. 2.

Tab. 2 Postup operací na LPÚ

Typ operace	Teplota lázně [°C]	Doba operace [min]
Čištění		
Odmaštění v horkém alkalickém roztoku	60 ÷ 95	5 ÷ 15
Oplach studenou vodou	-	-
Moření v kyselině sírové (alternativou je tryskání)	40 ÷ 70	5 ÷ 20
Oplach studenou vodou a neutralizace po moření	-	-
Aktivační oplach	40 ÷ 55	-
Fosfátování		
Ponor ve fosfátovací lázni	55 ÷ 95	5 ÷ 10
Oplach studenou vodou a neutralizace	-	-
Mazání		
Mazání použitím mýdla, MoS ₂ atd.	dle druhu maziva	
Sušení	-	-

Operace povrchové úpravy polotovaru:

- **Odmaštění** povrchů polotovarů se běžně provádí v horké alkalické lázni použitím ve vodě rozpustných solí s koncentrací 5 ÷ 10 % podpořených komplexními přísadami, deoxidačními činidly a tenzidy. Běžně používaným alkalickým rozpouštědlem je například hydroxid sodný neboli louh, dále silikáty a fosfáty. Tyto roztoky, pracující za teplot vyšších než 50 °C, tvoří hydrofilní povrchy (dobře smáčené povrchy). Účelem této operace je dosažení čistého, smáčivého povrchu součástí, odstranění nečistot, tekutých a tuhých mazacích tuků, prachových částic, mýdlových a jiných mazacích prostředků. Operace je prováděna ve dvou stupních, hrubé odmaštění a čisté odmaštění probíhající ve dvou různých vanách. Hladina lázně by měla zůstat čistá, aby nedocházelo k opětovnému znečištění kusů při jejich vynoření a vyjmutí. Nepřetržité čištění lázně násobí její životnost.
- **Oplach po odmašťování**
Probíhá průtočný oplach užitkovou vodou ve vaně. K oplachu se používá vratná voda z neutralizační stanice, která zajišťuje ekologickou likvidaci nebezpečných látek a chemikálií odcházejících z linky povrchových úprav. Odpadní voda je alkalická a odvádí se do sběrné nádrže alkalických oplachových vod.
- **Moření** je velice efektivní a nejrozšířenější způsob chemického čištění oceli sloužící k odstranění vrstev anorganických oxidických sloučenin z povrchu kovu pomocí kapaliny, která tyto vrstvy chemicky narušuje a podpoří jejich odstranění. Tyto vrstvy se tvoří oxidací za vysokých teplot (tvorba okují) a korozí. Moření zajišťuje odstranění koroze, okují a lze jím snížit i vysokou hodnotu drsnosti surového povrchu materiálu. Dále lze mořením odstranit i různé nanesené povlaky (pozinkování, pochromování atd.) či naleptané plochy. Výstupem moření je hladký, kovově čistý povrch materiálu bez nečistot. Jedná se o složitý proces zahrnující řadu fyzikálních, chemických a elektrochemických dějů. Moření se provádí ponorem koše s polotovary do vany s roztokem vybrané anorganické kyseliny, nejčastěji kyseliny sírové nebo chlorovodíkové. Je nezbytné, aby byla zasažena celá plocha polotovaru, tedy aby nebyl proces omezený jen na část povrchu.

- **Oplach po moření**

Po moření následuje průtočný oplach pro odstranění kyseliny, ke kterému je použita vyčištěná voda z neutralizační stanice. Jedná se o postupný oplach a odpadní voda je odváděna do sběrné nádrže kyselých oplachových vod.

- **Aktivace**

K zajištění kvalitního pokrytí podkladového materiálu fosfátovou vrstvou se provádí ošetření povrchu oplachem v aktivačním roztoku. Aktivační lázeň obsahuje částice speciálních solí, jež jsou rozptýleny v kapalině, usazují se na substrátu a iniciují nukleaci krystalků. Tím se tvoří více krystalizačních center a vzniká povlak s jemnější krystalovou strukturou.

- **Fosfátování**

Jedná se o povrchovou úpravu kovového materiálu, jejímž výsledkem je vznik nevodivé, nerozpustné, adherentní vrstvy zajišťující lepší přilnavost lubrikantů, což je zásadní z hlediska objemového tváření za studena. Na povrchu kovu se vylučují nerozpustné fosforečnany a tvoří póry, do kterých se následně vsakuje mazivo. Je vytvořen povlak, jenž je výborným nosičem maziv, a tím zajišťuje snížení třecích odporů při tváření, což je jedna z nejdůležitějších funkcí v technologii objemového tváření za studena.

Vlastní proces fosfátování je proveden ponorem polotovaru do kyselé fosfatizační lázně, jež zajistí tvorbu nerozpustné vrstvy amorfních solí kyseliny fosforečné, případně může být roztok nanášen postřikovou technikou, přičemž o tomto způsobu nanášení rozhoduje velikost a tvar fosfátovaného materiálu. Ponorová metoda je používanější, protože poskytuje celistvější soudržnou vrstvu na menším pracovním prostoru. V lázni je obsažena kyselina fosforečná, dihydrogenfosforečnany vhodných kovů (železnatý, zinečnatý), katalyzátory a urychlovače, které usnadňují tvorbu povlaku.

Parametry správného složení fosfátové lázně se stanoví pomocí jednoduchých titračních metod a jsou dány v bodech odpovídajících spotřebě titračního roztoku. Po fosfátování se provádí dvojitý oplach, aby nejprve došlo k odstranění zbytků kyselin a rozpustných solí. Následně je povrch opláchnut deionizovanou vodou.

Fosfátové povlaky se rozdělují dle kovového kationtu fosfatizačního roztoku na zinečnaté, manganaté, zinečnato-vápenaté a železnaté. Vzniku fosfátové vrstvy velikosti až 100 μm lze docílit převážně u železných kovů, ale i u vybraných neželezných kovů (Zn, Al, Mg). V praxi nejpoužívanějším druhem je fosfát zinečnatý.

- **Oplach** je nezbytná část celého postupu povrchových úprav a zapotřebí jej zařadit mezi jednotlivé kroky, jelikož zaručuje dekontaminovaný povrch podkladového materiálu, a tím i soudržnou vrstvu fosfátového povlaku.

- **Mazání**

Mazání se provádí ponořením a nanášením vrstvy určitého druhu maziva.

Molykování

Cílem je vytvoření vrstvy sulfidu molybdeničitého na povrchu fosfátovaného výrobku za účelem snížení tření a usnadnění tvářecího procesu. Použitý prostředek se nanáší máčením. Lázeň je třeba intenzivně míchat, aby nemohlo docházet k usazování. Doplnění lázně je třeba provádět demineralizovanou vodou.

Mýdlování

Cílem tohoto procesu je vytvoření vrstvy mýdla na povrchu fosfátovaných polotovarů. Dochází k sycení fosfátové vrstvy stearátem sodným, který je ve formě teplého roztoku a hlavním cílem této operace je reakce s terciárním fosforečnanem zinečnatým, při níž vzniká stearát zinečnatý, jenž má výborné mazací vlastnosti. Mazací prostředek se nanáší ponorem. Lázeň musí být udržována na pracovní teplotě a stále míchána. Využitá lázeň se převáží do nádrže pro rozrážení mýdla v neutralizační stanici.

3.3 Nástroje pro objemové tváření za studena

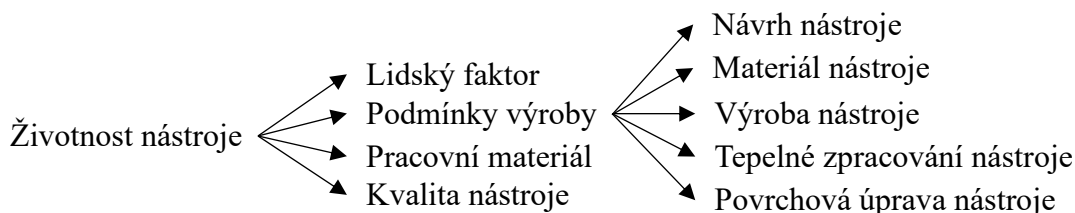
3.3.1 Konstrukční požadavky a řešení [2], [17], [19], [30], [31], [32], [33]

Z technického hlediska návrhu tvářecích nástrojů je nutné brát v potaz především technické podmínky s ohledem na ekonomické zásady. Jako technické podmínky lze označit vyrobiteľnost tvářecích nástrojů a jejich částí, pořizovací cena za materiál a výrobní náklady, trvanlivost, smontovatelnost a vyměnitelnost funkčních částí tvářecího nástroje a bezpečnost jeho konstrukce.

Vyrobiteľnost nástroje je závislá na řadě různých vlivů. Především druh použitého materiálu a jeho mechanické vlastnosti, obrobiteľnost a způsob tepelného zpracování, požadovaná přesnost a stav výrobních zařízení, na kterých se nástroj zhotovuje.

Smontovatelnost a *vyměnitelnost* jednotlivých částí nástroje je dána především technickou kvalitou konstrukčního návrhu, vhodné volby materiálu a jeho zpracování. Je nutné, aby jednotlivé části byly vhodně vzájemně umístěny, aby byla dodržena jakost opracování ploch a kvalita montážní práce.

Životnost nástroje je podmíněna vyměnitelností a tuhostí jednotlivých konstrukčních částí nástroje, kvalitou vodičích elementů, statickými a dynamickými silami, které v procesu působí, stavem výrobního zařízení, skladováním a údržbou. Životnost funkčních částí lze zvýšit, pokud nebudou překračovány doporučené nejvyšší stupně deformace. V případě vysokého stupně deformace, který překračuje toto doporučení, je vhodnější přidat tvářecí operaci a prodloužit tím životnost nástrojů. Základní faktory ovlivňující životnost nástroje znázorňuje obr. 24.



Obr. 24 Faktory ovlivňující životnost nástrojů [17]

Náklady na nástroj tvoří především náklady na použitý materiál, výrobní čas a tvářecí stroj, množství vyráběných kusů, výrobní práci – mzdy a odvody, složitost nástroje a zvolený technologický postup.

Protlačovací nástroje musí splňovat obvyklé požadavky jako jednoduchost, snadná údržba a obsluha, stálost, přiměřené pořizovací náklady. Při výrobě tvářecího nástroje záleží na druhu tvářeného materiálu, rozměrech a přesnosti výrobku, velikosti deformace při operaci, volbě tvářecího procesu, povrchové úpravě a mazání. Při objemovém tváření za studena vzniká v materiálu velký deformační odpor, který způsobuje deformaci a praskání nástrojů.

Při konstrukci tvářecích nástrojů je nutné dodržovat základní zásady:

- Je nutné zajistit dostatečnou tuhost nástroje, čímž se zamezí pružení funkčních částí nástroje, což by mohlo vést k nedodržení požadované přesnosti výrobku a současně snižovat životnost funkčních částí nástroje. Pro dosažení dostatečné tuhosti se volí masivní upínací tělesa a dosedací plochy funkčních částí se opatřují kalenými opěrnými vložkami. U těchto funkčních částí je potřeba zajistit jejich vyměnitelnost. Z hlediska životnosti nástroje je stěžejní životnost průtláčnicku, který musí odolávat vysokým tlakům. U těchto částí nástrojů je nutné vhodně navrhnout poloměry zaoblení, přechody, požadované tolerance a jakosti povrchů, protože je nutné zajistit plynulý tok materiálu bez překážek a brzdění, které zvyšují přetvárnou sílu. Také je vhodné navrhovat průtláčnicku a vyhazovače co nejkratší a dobře vedené. Při návrhu průtláčnic se musí zajistit dostatečné předpětí podle potřebné tvářecí síly a bandážování nástroje.

- Nástrojová sestava musí obsahovat spolehlivý vyhazovací systém, pro odstranění výrobku z průtlačnice a někdy také sčerač, který výrobek odstraní z průtlačníku. V případě absence těchto částí může dojít k velmi závažným problémům, které vznikají neodstraněním výrobku z funkčního prostoru.
- Montáž nástrojové sestavy musí být jednoduše navržena a snadno proveditelná, aby výměna funkčních částí nástroje proběhla rychle a nedocházelo k prostojům a časovým ztrátám. Proto je vhodné navrhovat nástrojovou sestavu tak, aby její sestavení bylo možné provést mimo pracovní prostor lisu, a tím urychlit přechod na výrobu jiného artiklu. Sestava je do stroje vložena a musí být zajištěno její rychlé a bezpečné upnutí. Při upínání je nutné dbát na to, aby se nekřížily dosedací plochy a byla dodržena přesná soustřednost nástrojů, přičemž je nutné zamezit uvolňování upínacích elementů v důsledku otřesů stroje a vibrací při jeho provozu.
- U nástrojové sestavy musí být přesně dodržena sousost. Aby byla zajištěna, je nutné volit dokonalé vedení funkčních částí.

Při konstrukci protlačovacího nástroje se vychází z výkresu konkrétní požadované součásti. Je nutné uvažovat sériovost, jakost materiálu a technologický postup výroby dané součásti. Tvar tvářecí dutiny je dán požadovaným konečným tvarem protlačku.

V nástrojové sestavě pro protlačování za studena jsou nejdůležitějšími elementy funkční části, které čelí největšímu namáhání a opotřebení.

Jedná se o průtlačníky, průtlačnice a vyhazovače:

- **Průtlačníky**

Je nutné dbát na to, aby délka průtlačníku byla co nejkratší z důvodu vysokých měrných tlaků působících na čelo, čímž dochází k velkému namáhání tlakem na ohyb. O této délce rozhoduje umístění sčeračů. Je nutné se také vyvarovat velkým změnám průřezu a navrhnout rovnoměrné a co nejmenší přechody mezi nimi viz obr. 25. Nástroj musí být rychle a snadno vyměnitelný, vyroben z vhodného materiálu, tepelně zpracován a upraven, aby splňoval žádanou jakost povrchu.



Obr. 25 Průtlačník pro dopředné protlačování dutých součástí

- **Průtlačnice**

Jedná se o jednu z nejdůležitějších částí nástrojové sestavy, jež je vystavena vysokému namáhání. Při řešení konstrukčního návrhu se řeší především tvar pracovní dutiny, celkové provedení a uložení průtlačnice. Tvar pracovní dutiny je dán především požadovaným tvarem výrobku a vybranou metodou objemového tváření. Podle geometrie pracovní dutiny a metody protlačování se průtlačnice dělí na průtlačnice pro dopředné protlačování a průtlačnice pro zpětné protlačování.



Obr. 26 Průtlačnice pro zpětné protlačování

Průtlačnice mají podobnou konstrukci a materiál obou druhů je vystaven tlakovému namáhání. Tento tlak vyvolává práce průtlačníku v průtlačnici a je uvažován jako tlak hydrostatický – radiální tlačná síla působí na obvod průtlačnice a namáhá ji na roztažení. Tato síla tedy v průtlačnici vyvolává obvodové namáhání tahem, které může dosahovat vysokých hodnot. Průtlačnice je takto značně namáhána a podle toho musí být navržena, aby

dokázala odolat těmto tlakům a byla zajištěna její požadovaná životnost. Z tohoto důvodu se volí konstrukce průtlačnic jako masivní tlustostěnná nádoba a je nutné vhodně navrhnout a zajistit dostatečné bandážování.

- **Vyhazovače**

Vyhazovače jsou vysoce namáhané součásti nástrojové sestavy. Nejjednodušším typem je vyhazovač tyčkový, který je zobrazen na obr. 27 a který je často užíván při dopředném protlačování a u víceoperačních postupových lisů. Pokud délka vyhazovače přesáhne šesti až osmi násobek velikosti jeho průměru, je nutné opatřit vyhazovač vodícími křídélky.

U zpětného protlačování mají vyhazovače rozšířenou spodní opěrnou plochu, která se opírá o kalenou podložku. Funkční čelo vyhazovače je dáno tvarem protlačku a může mít kuželový nebo rovný tvar. Často používaným typem je trubkový vyhazovač, který může sloužit jak k odstranění průtlačku z průtlačnice, tak k setření průtlačku ze spodního průtlačníku. Životnost vyhazovače vychází z přesnosti vedení, kolmosti a rovnoběžnosti opěrné plochy.



Obr. 27 Vyhazovač a sestava tlakových desek

Tvářecí nástroje jsou nejčastěji vyráběny obráběním. Velmi důležité je navrhnout optimální počet výrobních operací výrobku, a tím zajistit životnost nástrojů. Dále záleží také na správném tepelném zpracování a jakosti nástrojových ocelí jednotlivých částí nástrojové sestavy. Správné tepelné zpracování snižuje riziko vyštípnutí a prasknutí nástrojů a zvyšuje oteruvzdornost. Také je nutné zajistit vhodné dokončovací operace jako broušení, leštění a lapování funkčních ploch nástroje.

Při řešení pevnostního návrhu funkčních částí nástrojů je nutno vycházet z deformačního odporu a ze zatížení pracovního povrchu dutiny lisovnice radiálním tlakem a třecím napětím. Deformační odpor je dán záporně vzatým měrným tlakem na čele lisovníku. Při návrhu průtlačníku je zapotřebí dbát na štíhlostní poměr, průtlačník musí být z hlediska štíhlosti a upnutí kontrolován na vzpěrnou stabilitu. Průtlačnice a objímky jsou namáhány především vnějším a vnitřním radiálním tlakem. Řešení velikosti radiálního tlaku na průtlačnici lze provést na základě znalosti měrného tvářecího tlaku působícího na čelo průtlačníku a největší uskutečněné poměrné deformace. Při návrhu musí být zajištěna určitá životnost nástrojů a prevence proti jejich porušení přetížením, a proto je nutné správné dimenzování nástrojů a volba vhodných nástrojových materiálů.

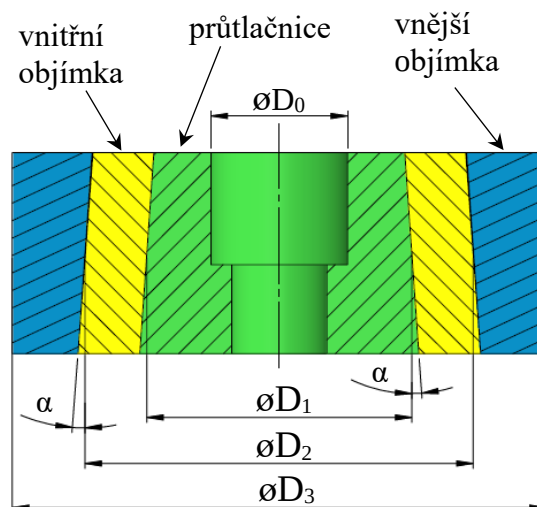
3.3.2 Bandážování průtlačnic – armování [19], [23], [30]

Při protlačování ocelí za studena je vzhledem k vysokým radiálním tlakům na průtlačnici nutné vždy použít objímky – bandážování průtlačnice. Průtlačnice se bandážuje jednou nebo více objímkami. Jedna objímka se používá v případě použití průtlačnice z nástrojové oceli s tvrdostí po tepelném zpracování do 55 HRC. Průtlačnice z ocelí s tvrdostí vyšší než 55 HRC je většinou opatřena dvěma či více bandážemi. Instalací jedné nebo více bandáží se zvyšuje únosnost průtlačnice.

Montáž sestavy lze uskutečnit buď zalisováním průtlačnice na kuželovou plochu, nebo ohřevem objímek a zapouzdrěním na válcovou plochu, případně podchlazením průtlačnice například tekutým dusíkem, kdy dojde k jejímu smrštění. Zalisování na kužel je dražší z důvodu náročnosti výroby přesných kuželových ploch, avšak samotná montáž je snadnější a lze opakovaně využívat stejnou objímku pro zalisování nových průtlačnic, což může vyvážit vyšší pořizovací náklady.

Při bandážování se používají doporučené poměry průtlačnic a objímek:

$$\begin{aligned}\frac{D_0}{D_1} &= 0,6 \div 0,4 \\ \frac{D_1}{D_2} &= 0,6 \div 0,4 \\ \frac{D_2}{D_3} &= 0,6 \div 0,4 \\ \frac{D_0}{D_3} &= 0,2 \div 0,125\end{aligned}\quad (3.1)$$



Obr. 28 Armovaná průtlačnice objímkami [30]

Přičemž platí:

$$\frac{D_0}{D_1} \cdot \frac{D_1}{D_2} \cdot \frac{D_2}{D_3} = \frac{D_0}{D_3} \quad (3.2)$$

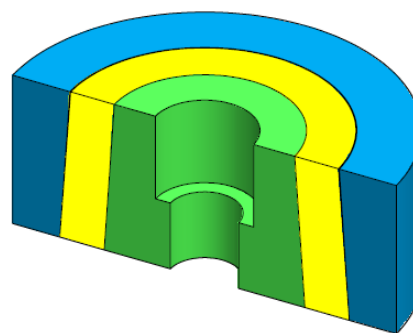
kde:

D_1, D_2, D_3 – střední vnější průměry průtlačnice a objímek

úhel α = kuželovitost průtlačnice; se volí v rozsahu $\alpha = 1^\circ \div 3^\circ$

Velikost doporučeného zatížení průtlačnic:

bez objímky	$p \leq 1000 \text{ MPa}$
s jednou objímkou	$p = (1000 \div 1600) \text{ MPa}$
se dvěma objímkami	$p = (1600 \div 2000) \text{ MPa}$



Obr. 29 Průtlačnice s bandážemi [29]

Při bandážování je zapotřebí vytvořit předpětí průtlačnice pro snížení účinku osového zatížení průtlačnice od třecích sil.

Aby došlo k předpětí průtlačnice použitím bandáží, musí být dodrženy doporučené přesahy:

- přesah mezi průtlačnicí a první objímkou je $\Delta D_1 = (0,0045 \div 0,003) \cdot D_1$
- přesah mezi první a druhou objímkou je $\Delta D_2 = (0,0045 \div 0,003) \cdot D_2$

3.4 Materiály pro nástroje [19], [20], [34]

Vzhledem k podmínkám panujícím v nástroji při technologii objemového tváření za studena musí materiál nástroje splňovat náročné požadavky. Je vyžadována především vysoká pevnost, tvrdost, hladkost a odolnost proti opotřebení. Při volbě materiálu je nutná snaha zajistit velkou trvanlivost nástrojů, která má podstatný vliv na výkonnost a přesnost výroby. Z tohoto důvodu je velmi důležitá správná volba složení nástrojové oceli a její zpracování, přičemž je vhodné vycházet z praktických zkušeností a přihlížet na výsledky experimentálního ověření.

Základní druhy nástrojových ocelí pro technologii objemového tváření za studena viz tab. 3.

Tab. 3 Základní druhy nástrojových ocelí pro objemové tváření za studena [34]

Značka ČSN		Přibližné procentuální chemické složení								
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	V	W
Průtlačníky	19 436	1,95	0,30	0,30	0,03	0,03	12,0	0,5	0,15	
	19 437	1,95	0,3	0,3	0,03	0,03	12,0	0,5	0,21	0,75
	19 820	0,8	0,2	0,25			4,15		1,35	17,5
	19 824	0,7	0,2	0,25			4,15		1,30	17,5
	19 733	0,56	0,22	1,02	0,03	0,03	1,10	0,35		1,90
	19 423	0,85	0,40	0,35	0,03	0,03	0,7		0,12	1,95
Průtlačnice	19 721	0,30	0,35	0,32	0,03	0,03	2,35		0,20	9,25
	19 733	0,56	0,22	1,02	0,03	0,03	1,10	0,35		1,90
	19 614	0,55	0,45	0,45	0,03	0,03	0,75	2,55	0,10	
	19 436	1,95	0,30	0,30	0,03	0,03	12,0	0,5	0,15	
	19 437	1,95	0,3	0,3	0,03	0,03	12,0	0,5	0,21	0,75
	19 826	0,80	0,20	0,25	0,03	0,03	4,15		1,30	17,5
	19 191	1,25	0,27	0,30	0,25	0,30	0,15	0,20		
	19 423	0,85	0,40	0,35	0,03	0,03	0,7		0,12	1,95
Vyhazovače	19 420	1,35	0,35	0,35	0,03	0,03	0,7	0,3		
	19 710	0,23	1,40	0,50	0,03	0,03	0,30	0,30		1,20
	19 820	0,8	0,2	0,25			4,15		1,35	17,5
Vodicí pouzdra průtlačnice	19 436	1,95	0,30	0,30	0,03	0,03	12,0	0,5	0,15	
	19 423	0,85	0,40	0,35	0,03	0,03	0,7		0,12	1,95

Pro nástrojové oceli je důležitá především vysoká jakost a martenzitická struktura. Nesmí obsahovat velké množství fosforu a síry a musí být dezoxidované. Legující prvky jako chrom, nikl, molybden, vanad, wolfram vážou určité množství uhlíku v oceli ve formě karbidů. Ocel musí být vhodně tepelně zpracována, aby bylo dosaženo správného uspořádání karbidů v martenzitické struktuře.

Druh oceli na výrobu nástrojů se volí s ohledem na druh nástroje, použitou technologii, složení a stav tvářeného materiálu, tvar a velikost výrobku, velikost deformace a typ a velikost výrobní série.

Nástroje musí být při výrobě a přípravě na provoz vhodně tepelně zpracovány. Nástroje je vhodné nejprve vyžít, a tak upravit výchozí strukturu. Dále je nutné ocel zakalit, čímž se dosáhne vysoké tvrdosti materiálu s martenzitickou strukturou. Kalicí teplota závisí zejména na množství uhlíku v oceli a jejím kompletním chemickém složením. Kalením materiál získá vysokou tvrdost, je křehký a náchylný k praskání a objevuje se v něm vnitřní napětí, což jsou nepříznivé vlastnosti. Proto musí být ocel po kalení popuštěna, aby se dosáhlo zvýšení její houževnatosti a došlo k odstranění vnitřního napětí. Výška popouštěcí teploty je volena na základě požadovaných mechanických vlastností nástroje jako je pevnost a tvrdost.

3.5 Stroje pro technologii protlačování [30], [35]

Tvářecí stroje musí vyhovovat náročným požadavkům na svou funkci a provoz. Kromě technických hledisek je však nutné zohlednit i ergonomii stroje, především uživatelskou přívětivost, komfort obslužného personálu a přizpůsobení snadnému čištění a udržování pořádku. Dále je důležité hledět na ekologii, na rizika ohrožení životního prostředí, využití recyklovaných materiálů a na materiálovou a energetickou náročnost. Je taktéž na místě dodržet základní estetická a ekonomická pravidla, která by měl stroj splňovat.

Spolehlivost stroje patří v neposlední řadě k zásadním požadavkům kladeným na výrobní zařízení, které zajišťují plnění předepsaných funkcí. Spolehlivost stroje závisí na jeho životnosti, bezporuchovosti, udržitelnosti a trvanlivosti.

Stroj musí být zajištěn z hlediska bezpečnosti obsluhy a dalšího personálu, a proto musí obsahovat předepsané ochranné prvky jako optické závory, ochranná plexiskla, pevné a pohyblivé ochranné kryty, senzory a čidla zajišťující okamžité zastavení lisu při otevření zadních nebo bočních dveří a jiných vstupů do pracovního prostoru stroje a k pohyblivým mechanismům. Každé nebezpečné místo na zařízení, kterým může být obsluha při práci ohrožena je nutné zabezpečit proti potenciálnímu úrazu. Pro bezpečnost práce je vyžadováno, aby byl stroj opatřen elektrickou pojistkou proti přetížení a nezávisle na ní ještě záložní mechanickou pojistkou a indikátorem tvářecí síly. Práce na lisech musí být specifikována potřebnými směrnici BOZP, s kterými je obsluha seznámena a je povinna je striktně dodržovat.

Pro tváření z hlediska tvářecího zařízení jsou charakteristické některé základní veličiny, které se v tvářecím procesu vyskytují a popisují práci stroje:

- jmenovitá síla lisu F_j [N] – nejvyšší dovolená síla, kterou může být tvářecí stroj zatěžován,
- pracovní dráha [mm nebo °] – vzdálenost beranu před dolní úvratí, v jejímž rozsahu může být dosaženo jmenovité síly,
- zdvih Z [mm] – dráha beranu mezi jeho úvratěmi,
- počet zdvihů – počet průběhů dráhy beranu za minutu mezi jeho dolní a horní úvratí při nepřerušovaném chodu naprázdno,
- síla pohonu F_p [N] – síla, kterou vyvolává příslušný pohonný mechanismus,
- dále hmotnost lisu [kg], rozměry lisu, přestavitelnost, rychlosti jednotlivých částí stroje, objem olejové nádrže, parametry hydraulického rozvodu, elektrické vybavení lisu atd.

Z technických požadavků je důležité, aby bylo zajištěno kvalitní chlazení a mazání, dostatečný zdvih beranu, přesné a dlouhé vedení beranu, možnost přestavby beranu a stolu, přesně seřiditelné vyhazovací zařízení, a především dostatečná tuhost lisu, jež je definována jako odolnost proti elastické deformaci vyvolané vnějším zatížením. S rostoucí tuhostí pracovního prostoru stroje dochází k nárůstu technologické mechanické účinnosti. Tuhost má významný vliv na efektivitu tváření, přesnost výrobků, a na životnost nástrojů i celého stroje.

Stroje pro objemové tváření za studena jsou běžně rozdělovány na dva druhy – hydraulické lisy a mechanické lisy.

▪ *Hydraulické lisy*

Hydraulické lisy reprezentují jeden ze základních druhů tvářecích strojů. Síla hydraulického lisu je vyvozena na základě Pascalova zákona o rovnoměrném šíření tlaku v kapalinách ve všech směrech. Tyto stroje mohou být zatíženy jmenovitou silou po celé dráze zdvihu a tuto sílu je možné regulovat během zdvihu v závislosti na požadovaném charakteru průběhu tváření, což je základní rozdíl oproti mechanickým lisům. Hydraulické lisy jsou náročnější na výrobu a tím je dána i vyšší pořizovací cena.

Výhody hydraulických lisů:

- pracovní zdvih o požadované velikosti lze nastavit v libovolném místě celkového zdvihu smýkadla lisu,
- umožňuje plynule regulovat rychlost pohybu smýkadla,
- rychlost smýkadla lze dosáhnout v rozmezí hodnot od 0,1 až do 3000 mm/s,
- mohou být konstruovány na dosažení velkých tvářecích sil,
- lze regulovat tlak hydraulického oleje a tím plynule regulovat tvářecí sílu během pracovního zdvihu stroje,
- umožňují mechanizaci a automatizaci pracovního cyklu.

Nevýhody:

- složitá konstrukce pohonu, hydrauliky a nutná instalace systému potrubí pro vedení kapaliny,
- vyšší pravděpodobnost poruchy (například únik oleje) a náročné hledání příčin poruch,
- menší počet zdvihů a poměrně nízká pracovní rychlost v porovnání s mechanickými lisy – nižší účinnost,
- vysoké výrobní náklady a tím i pořizovací cena stroje (cca 20 ÷ 30 % vyšší oproti mechanickým lisům).

▪ **Mechanické lisy**

Charakteristickým znakem tohoto typu strojů je mechanismus, nejčastěji je pro přenos síly na smýkadlo lisu použit mechanismus klikový. Dále existuje kolenový mechanismus, vačka nebo vřetenový mechanismus. Konstrukce mechanických lisů je jednodušší než hydraulických. Pracovní zdvih určuje kliková hřídel. Mechanické lisy se dělí na několik druhů:

- **Klikové lisy**
Přenos síly klikového lisu je uskutečňován pomocí klikového mechanismu. Elektromotor prostřednictvím klínových řemenů pohání setrvačnický, jehož součástí je spojka a dále ozubenými převody je do pohybu uvedena kliková hřídel, základní prvek klikového mechanismu. Kliková hřídel koná pohyb, který je pomocí ojnice přenesen na smýkadlo, pohybující se ve vedení. Klikový mechanismus transformuje rotační pohyb klikové hřídele na přímočarý pohyb smýkadla ve vedení.
Tento typ strojů je charakteristický poměrně velkým pracovním zdvihem s konstantní velikostí, což je výhodné pro technologii protlačování, pro níž je také často využíván v případě, že splňuje dostatečnou tuhost a dlouhé vedení beranu s potřebnou pracovní dráhou.
- **Kolenové lisy**
Kolenové lisy jsou vhodné především pro výrobky vyžadující krátkou pracovní dráhu z důvodu malého zdvihu a schopnosti malé tvářecí práce. Výhoda tohoto typu lisů je jejich velká tuhost. Přenos síly je proveden oboustrannou klikou.
- **Výstředníkové lisy**
Tyto stroje patří do skupiny mechanických lisů pro tváření a v ojedinělých případech mohou najít svoje využití, často se však z důvodu velmi malé tuhosti pro technologii objemového tváření za studena nepoužívají. Častěji jsou využívány k jiným technologiím, většinou pro plošné tváření, jako například k mělkému tažení, ohýbání nebo stříhání. Přenos síly probíhá prostřednictvím výstředníkového mechanismu – výstředníková hřídel, ojnice a beran.

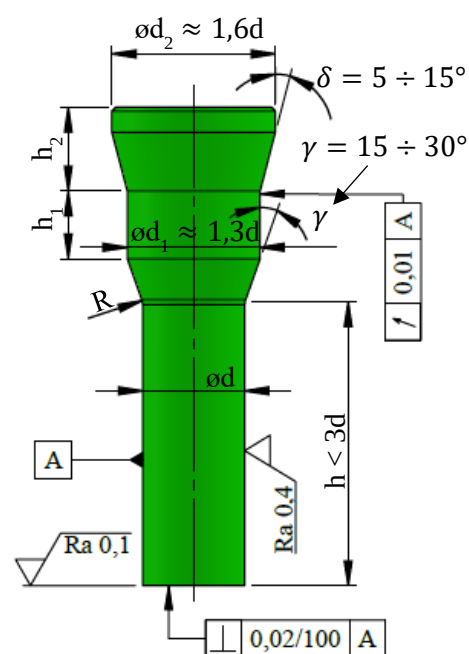
povrchovém zpracování a konečném tvaru výrobku. Nejčastěji se velikost redukčního úhlu volí v rozsahu 15° až 126° . Pokud se zvětšuje redukční úhel, zvětšuje se deformační odpor. Pro snadné zavádění polotovarů je válcová dutina průtlačnice konstruována s náběhovým kuzelem, případně je na ní zhotoven rádius. Výška redukčního oka, odlehčení na průměr po výstupu z oka a další parametry jsou voleny v závislosti na teplotě. Doporučené konstrukční parametry udává tab. 4.

Tab. 4 Geometrické parametry průtlačnic pro dopředné protlačování [2]:

Parametry	Teplota tváření		
	20 °C	200 ÷ 400 °C	400 ÷ 700 °C
D_4 [mm]	$D_3 + (0,1 \div 0,2)$	$D_3 + (0,2 \div 0,4)$	$D_3 + (0,4 \div 0,6)$
h [mm]	$0,5\sqrt{D_3}$	$2 \div 3$	$3 \div 5$
2α [°]	$30^\circ \div 90^\circ$	$60^\circ \div 120^\circ$	$90^\circ \div 120^\circ$
R_1 [mm]	$\frac{D_1 - D_3}{2}$	$\frac{D_1 - D_3}{2}$	$\frac{D_1 - D_3}{2}$
R_2 [mm]	$(0,05 \div 0,1)D_3$	$1 \div 2$	$2 \div 4$
R_3 [mm]	přibližně $0,15 \cdot D_1$		
H_2 [mm]	min $0,7 \cdot D_1$		
γ [°]	$1^\circ \div 2^\circ$		
β [°]	$5^\circ \div 10^\circ$		

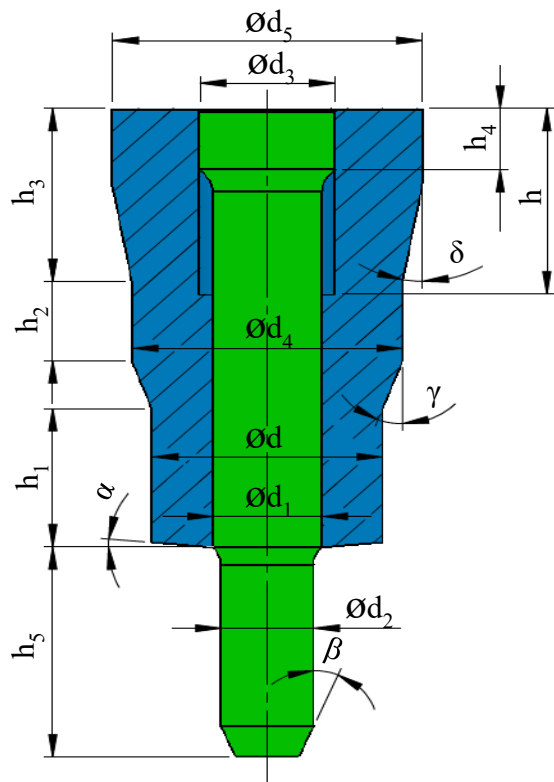
Jsou známy různé druhy řešení průtlačnic. Průtlačnici lze například navrhnout s příčným dělením v rovině přechodu válcové části na kuželovou, čímž se sníží vrubový účinek. Rozdělením však hrozí riziko zabíhání materiálu do dělicí roviny, čemuž je nutné zabránit těsným stykem obou částí průtlačnice. Dělené průtlačnice bývají axiálně předepnuté. Další variantou je návrh průtlačnice s vyměnitelnou vložkou, která je zalisována s přesahem a umožňuje snadnou výměnu v případě opotřebení. Pro dosažení vysoké únosnosti průtlačnice je nutné používat bandáže – objímky, do nichž je průtlačnice zapouzdřena – zalisována.

Průtlačníky pro dopředné protlačování jsou zhotoveny z jednoho kusu a sestávají z upínací části – kuželové nebo válcové hlavy, dříku a čela. Část nástroje mezi hlavou a dříkem, kde velký průměr přechází na menší, musí být navržena s postupnou změnou průměru viz obr. 32, bez náhlých změn, díky čemuž se zabrání koncentraci napětí. Je nutné zajistit požadovanou kolmost, rovnoběžnost a házivost průtlačníku. Také konečné opracování je zvláště důležité a funkční broušená plocha by měla být lapována. Průtlačník může být vyroben z jednoho kusu, avšak tento typ je náchylný na porušení v kritické oblasti přechodu z malého průměru. Vhodnější je volit dělený průtlačník s upínacím pouzdem. Zvětšení dosedací plochy kuzelem snižuje měrný tlak na podložku a kužel zajišťuje rychlé středění při výměně nástroje. Upnutí průtlačníku musí zaručovat přesnou sousost s průtlačnicí.



Obr. 32 Průtlačník pro dopředné protlačování tyčí [23]

V případě dopředného protlačování dutých součástí je průtlačník řešen viz obr. 33.



Parametry:

d, d_1 jsou dány rozměry výrobku $d \geq 1,4d_2$

$d_1 \approx 1,2d_2$

$d_3 \approx 1,3d_1$ nebo $\approx 1,3d_2$

$d_4 \approx 1,3d$

$d_5 \approx 1,6d$

$h_1 \leq 6d$

$h_2 \approx d_4/2$

$h_3 \geq d_5$

$h_4 \approx (0,7 \text{ až } 1)d_3$

$h_5 \approx 8d_2$

$\alpha \leq 5^\circ$

$\beta = 5^\circ \text{ až } 10^\circ$

$\gamma = 15^\circ \text{ až } 30^\circ$

$\delta = 5^\circ \text{ až } 15^\circ$

$R \geq d_2$

$R_1 = (0,2 \text{ až } 0,4)d$

$R_2 \geq 0,2d_2$

Uložení trnu v duté části o průměru d_1 :

H7/f7; H7/e8

Obr. 33 Průtlačník pro dopředné protlačování dutých součástí [23]

Základní vztahy pro technologii dopředného protlačování:

- Logaritmické přetvoření

- a) plné těleso:

$$\varphi = \ln \frac{S_0}{S_1} = \ln \frac{D_0^2}{D_1^2} [-] \quad (3.3)$$

- b) duté těleso:

$$\varphi = \ln \frac{S_0 - S_2}{S_1 - S_2} = \ln \frac{D_0^2 - D_2^2}{D_1^2 - D_2^2} [-] \quad (3.4)$$

- Stupeň přetvoření

- a) plné těleso:

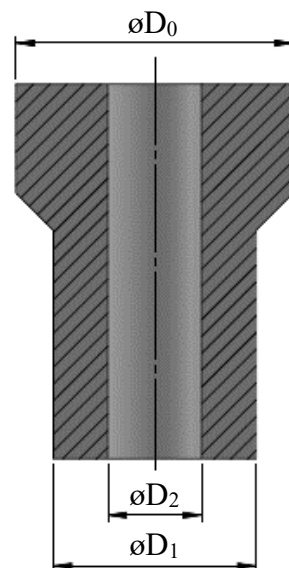
$$\varepsilon = \left(\frac{S_0 - S_1}{S_0} \right) = \frac{D_0^2 - D_1^2}{D_0^2} [\%] \quad (3.5)$$

- b) duté těleso:

$$\varepsilon = \left(\frac{S_0 - S_1}{S_0 - S_2} \right) = \frac{D_0^2 - D_1^2}{D_0^2 - D_2^2} [\%] \quad (3.6)$$

- Deformační odpor (vztah podle Feldmanna):

$$\sigma_d = \sigma_{ps} \cdot \left[\ln \frac{S_0}{S_1} \left(1 + \frac{\mu_R}{\alpha} \right) + \frac{2}{3} \alpha + \frac{4D_1\mu_R l'}{D_0^2} + \frac{4\mu_Z h_a}{D_0} \cdot \frac{Re}{\sigma_{ps}} \right] \text{ MPa} \quad (3.7)$$



Obr. 34 Parametry protlačky [23]

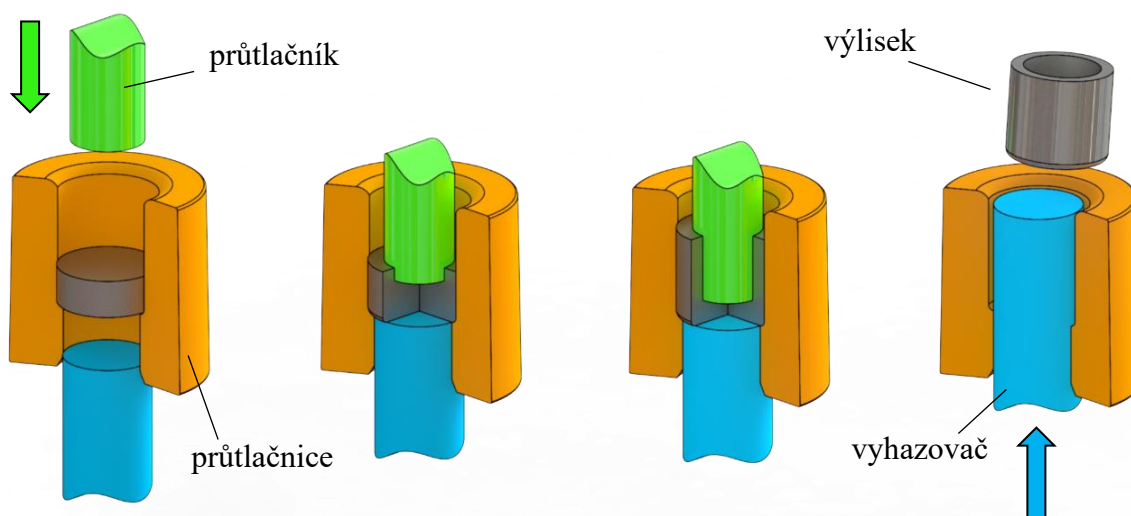
kde:

- σ_{ps} [MPa] – střední přirozený deformační odpor
- S_0 [mm²] – plocha průřezu výchozího polotovaru
- S_1 [mm²] – plocha průřezu tvářené části protlačku
- D_0 [mm] – průměr výchozího polotovaru
- D_1 [mm] – průměr tvářené části protlačku
- μ_R [-] – koeficient tření v redukční části průtlačnice
- μ_Z [-] – koeficient tření v zaváděcí části průtlačnice
(pro fosfátovaný a mazaný povrch: $\mu_R = 0,05, \mu_Z = 0,01$)
- α [rad] – redukční úhel
- l' [mm] – výška redukčního oka
- h_a [mm] – aktivní výška polotovaru v zaváděcí části průtlačnice (výška zaváděcí části průtlačnice, ve které je polotovar ve styku s průtlačnicí)
- Re [MPa] – mez kluzu tvářeného materiálu

- Protlačovací síla viz vztah 2.1, kapitola 2.7.

3.6.2 Technologie zpětného protlačování [2], [19], [20], [22], [23]

Při zpětném protlačování se materiál přemísťuje proti směru pohybu průtlačníku a teče mezerou mezi stěnou průtlačníku a stěnou průtlačnice, čímž vytváří typický tvar součásti pro tuto metodu – kalíšek, jak je patrné z obr. 35.



Obr. 35 Princip technologie zpětného protlačování

Součásti mohou být zhotoveny s průchozím otvorem nebo se dnem v závislosti na druhu vstupního polotovaru, kterým může být buď kalota kruhového průřezu nebo prstenec. Výrobky mohou mít různou tloušťku dna a stěn a mohou být různě tvarované. Lze ale vyrábět i složitější součásti pravidelného i nepravidelného tvaru. Konečné součásti se využívají v různých oblastech průmyslu jako pouzdra, víčka, kryty či hydraulické a pneumatické válce, písty, nábojnice atd.

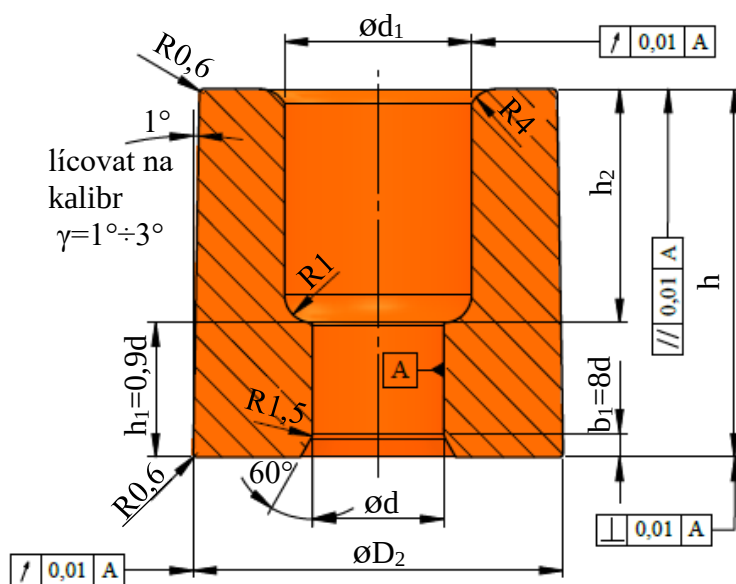
Nevýhoda této metody protlačování je vznik velkého deformačního odporu, který omezuje funkční délku průtlačníku. Maximální doporučený poměr délky k průměru je 3:1. Nejvyšší doporučená hodnota redukce vycházející ze závislosti deformačního odporu je 65 %. Vyšší deformace výrazně snižují životnost pracovních částí nástroje. Z hlediska hospodárnosti je proto zpětné protlačování vhodné pro tlustostěnné protlačky o malé výšce.

V praxi bylo zjištěno, že v případě zpětného protlačování je při stejné velikosti stupně deformace dosaženo vyšších deformačních odporů než při metodě dopředného protlačování.

Průtlačnice pro zpětné protlačování má pracovní dutinu danou konečným tvarem protlačku. Hrana vstupu do dutiny je buď zaoblená, nebo je vytvořen kuželový náběh pro snadnější zakládání polotovaru. Dutina může být vyrobena s mírnou kuželovitostí, což řeší zabránění osových tahů při vyhazování výrobků. Vnitřní pracovní povrch dutiny je broušen a lapován. Tloušťka stěny je dána poměrem $D_2/D_1 = 2$ dle obr. 36. Při návrhu nástroje je možné zvolit složenou nebo příčně dělenou průtlačnici. V případě dělené je však nutné zajistit osové předeptnutí průtlačnice.

Průtlačnice musí být z důvodu vysokých radiálních napětí instalována do vhodně zvolených bandáží pro zajištění únosnosti.

Doporučené geometrické parametry průtlačnic udává tab. 5.

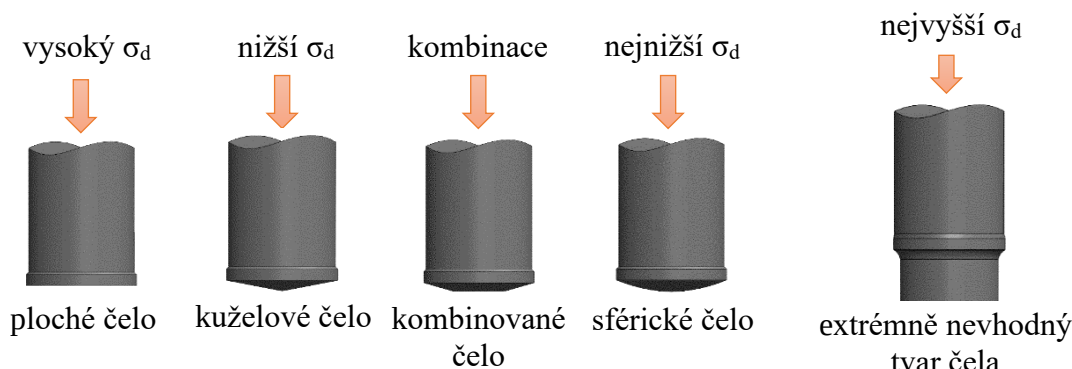


Obr. 36 Průtlačnice pro zpětné protlačování [2]

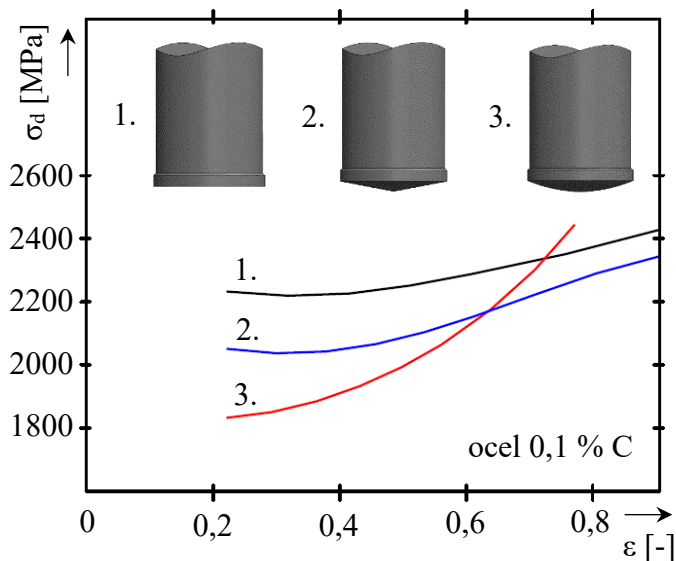
Tab. 5 Geometrické parametry průtlačnic pro zpětné protlačování [2]

Parametry	Průtlačnice	
	s jednou objímkou	se dvěma objímkami
Radiální tlak [MPa]	1000 ÷ 1600	1600 ÷ 2000
Poměrné průměry [mm]	$D_2/D_1 = 2 \div 2,2$	$D_2/D_1 = 1,6 \div 1,8$
	$D_3/D_2 = 2 \div 2,3$	$D_3/D_1 = 2,2 \div 3,2$
	$D_3/D_1 = 4 \div 5,5$	$D_4/D_1 = 4 \div 6$
Stykový průměr [mm]	$D_2 = \sqrt{D_3 D_1}$	-
Přesah [mm] D_2	$(0,0055 \div 0,0075) D_2$	$(0,004 \div 0,005) D_2$
Přesah [mm] D_3	-	$(0,003 \div 0,004) D_3$

Průtlačník je při zpětném protlačování vtlačován do hmoty polotovaru. Nejdůležitější částí průtlačníku je jeho čelo, jehož tvar má významný vliv na deformační odpor σ_d , tudíž i na velikost a průběh protlačovací síly. Tvary čel průtlačníků a jejich vliv jsou na obr. 37 a obr. 38.



Obr. 37 Druhy průtlačníků dle tvaru čela [19]



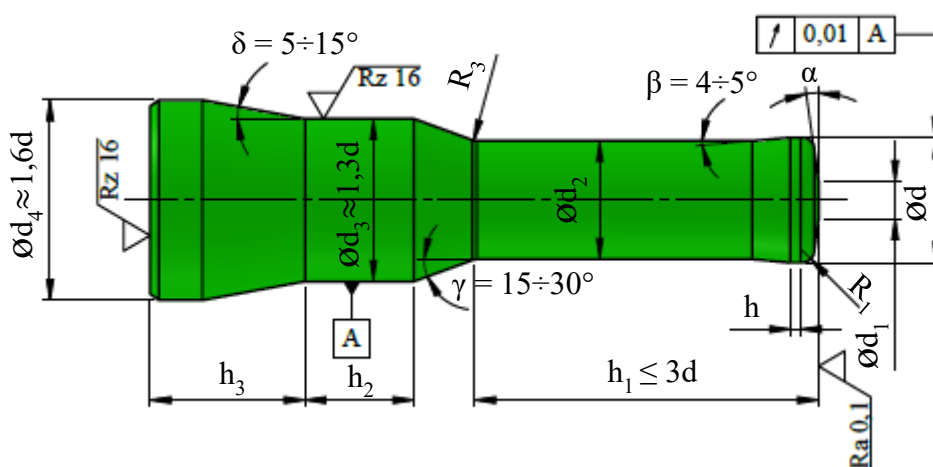
Obr. 38 Vliv tvaru čela průtlačníku na deformační odpor [2]

základě požadovaného tvaru výrobku a s ohledem na teplotu tváření.

Doporučené geometrické parametry průtlačníků udává tab. 6 a znázorňuje obr. 39 a obr. 40.

Tab. 6 Geometrické parametry průtlačníků pro zpětné protlačování [2]

Parametry	Teplota zpětného protlačování		
	20 °C	200 ÷ 400 °C	400 ÷ 700 °C
$\varnothing d$ [mm]	$d - (0,1 \div 0,2)$	$d - (0,2 \div 0,5)$	$d - (0,3 \div 0,6)$
h [mm]	$0,5\sqrt{d}$	$2 \div 3$ mm	$3 \div 5$ mm
α [°]	$5 \div 8^\circ$	$5 \div 15^\circ$	$5 \div 15^\circ$
R_1 [mm]	$(0,05 \div 0,1)d$	$1 \div 3$ mm	$1 \div 4$ mm
d_1 [mm]	$d - (2R_1 + 0,2d) \approx 0,7d$		



Obr. 40 Schéma průtlačníku pro zpětné protlačování [23]



Obr. 39 Průtlačník pro zpětné protlačování

Nejvhodnějším a nejčastějším tvarem čela je kužel. Úhel α se volí v rozsahu 4 až 10° a plní důležitou funkci, protože umožňuje pravidelné roztažení mazací vrstvy po stěně otvoru. Zaoblení hrany čela R_1 je se volí co nejmenší.

Čelo nástroje má kuželovitý tvar s úhlem α a zaoblením hran. Při vniku nástroje do materiálu polotovaru vzniká mezi povrchem průtlačníku a stěnou tvořícího se kalíšku značný třecí odpor. Toto tření lze výrazně snížit malým zmenšením průměru dříku za čelní fazetkou – odlehčením, což vede k současnému snížení deformačního odporu.

Parametry průtlačníku se volí na

Základní vztahy pro technologii zpětného protlačování:

- Logaritmické přetvoření:

$$\varphi = \ln \frac{S_0}{S_0 - S_1} = \ln \frac{D_0^2}{D_0^2 - D_1^2} [-] \quad (3.8)$$

- Stupeň přetvoření:

$$\varepsilon = \frac{S_1}{S_0} = \frac{D_1^2}{D_0^2} \quad (3.9)$$

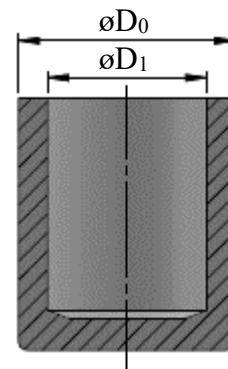
kde:

D_0 [mm] – průměr výchozího polotovaru

D_1 [mm] – průměr průtlačníku

S_0 [mm²] – plocha průřezu výchozího polotovaru

S_1 [mm²] – plocha průřezu průtlačníku



Obr. 41
Parametry
protlačku [23]

- Deformační odpor (vztah podle Siebela):

$$\sigma_d = 1,152 \cdot \sigma_p \cdot \frac{S_0}{S_1} \left(\log \frac{S_0}{S_0 - S_1} + \frac{S_0}{S_0 - S_1} \cdot \log \frac{S_0}{S_1} + \log \frac{S_1}{S_0 - S_1} \right) \quad (3.10)$$

kde:

σ_p [MPa] – celkový přirozený přetvárný odpor

- Protlačovací síla viz vztah 2.1, kapitola 2.7.

3.6.3 Technologie kombinovaného protlačování [19], [20]

Jedná se o výrobní metodu, která kombinuje zpětné a dopředné protlačování. Materiál se přemísťuje ve směru a zároveň i v protisměru pohybu průtlačníku. V horní části tedy vzniká kalíšek, většinou tvořící dutou hlavu součásti, a ve spodní části dochází k redukci průřezu, při níž se vytváří dřík.

Výchozím polotovarem pro kombinované protlačování je stejně jako u technologií, z nichž tato metoda vychází, většinou špalík, kalota či prstenec.

Při technologických výpočtech jsou jednotlivé části průtlačku počítány samostatně a pro volbu tvářecího stroje je využita vyšší hodnota deformačního odporu, tudíž i tvářecí síly. Možné varianty výrobků zhotovených tímto způsobem představuje obr. 42.



Obr. 42 Možnosti a tvary výrobků technologie kombinovaného protlačování

3.7 Defekty při protlačování [19], [22]

a) Defekty polotovarů

Polotovarem pro objemové tváření za studena je nejčastěji tyč, dodaná z ocelárny v surovém stavu nebo již tepelně zpracovaná dle požadavků zákazníka. Výchozí materiál musí mít čistý povrch bez vad vzniklých zaválcováním a nesmí obsahovat povrchové nebo vnitřní trhliny. Při zpracování v ocelárnách ovšem dochází ke vzniku různých vnitřních a povrchových defektů, které mají vliv na konečnou kvalitu výrobku.

Bubliny – jejich vznik v oceli je ovlivněn způsobem dezoxidace, přičemž lze snížit jejich výskyt použitím dezoxidačních prostředků. Bubliny způsobují defekty materiálu pouze při jejich výskytu těsně pod povrchem, pokud dochází k jejich oksylování. Tato vada polotovaru způsobuje při protlačování na povrchu tvářené součásti trhliny, proto musí být zajištěna eliminace vzniku bublin.

Vměstky tvoří převážně oxidy a sulfidy vyskytující se v každé oceli. Vměstky narušují soudržnost kovů a ovlivňují jejich vlastnosti především na základě množství, druhu a rozmístění vměstků. Velké nebo hustě koncentrované vměstky zapříčiňují na tvářených součástech trhliny, proto musí oceli pro protlačování mít určitý stupeň čistoty.

Převalky způsobují ve tvářeném materiálu trhliny. Vznikají při plnění kalibru, kdy se vytvoří výronek, který se následně zaválcuje a nesvaří.

Zaválcované okraje způsobují vznik závažných povrchových vad a je nutné je před válcováním z oceli zcela odstranit.

Mezi další defekty polotovarů vyskytující se ve výrobě objemového tváření za studena patří různé trhlinky a rýhy, oduhličení povrchu a další.

b) Defekty výrobků

Při protlačování může dojít ke vzniku různých defektů tvářeného tělesa. Tyto defekty mohou být zaviněny opotřebením a porušením nástroje, selháním materiálu výrobku, chybou zapříčiněnou lidským faktorem při přípravě polotovaru či seřizování stroje pro výrobní sérii.

Dochází ke vzniku naražených částí povrchu materiálu, vzniku vnitřních či vnějších trhlin, rýh (obr. 43a) a prasklin, nedolísovaných hran (obr. 43b) a dalších defektů.

Praskliny při vyčerpání plasticity materiálu vznikají při překročení povoleného stupně přetvoření. Vnější praskliny a trhliny povrchu se tvoří v důsledku špatně zvoleného typu mazání. V důsledku výskytu bublin v polotovaru mohou vznikat skryté trhlinky pod povrchem a k jejich odhalení dojde pouze při obrobení vrstvy materiálu (obr. 43c).



Obr. 43 Defekty výrobků zhotovených protlačováním

c) Defekty protlačovacích nástrojů

Vznikají především přetížením a únavou materiálu. Dochází ke vzniku různých prasklin, trhlin, odštěpených či deformovaných částí nástrojů, jak je zobrazeno na obr. 44. Ke zničení nástroje může dojít i lidskou chybou, například když operátor lisu neodstraní hotový výlisek

a do dutiny průtlačnice vloží další polotovár. Poté dochází k velkému namáhání stroje a totální destrukci nástroje (obr. 45).



Obr. 44 Odštěpené části a praskliny nástrojů



Obr. 45 Destrukce průtlačníku pro dopředné protlačování dutých těles

3.8 Tření [1], [17], [33], [36], [37]

Velmi důležitou roli hraje v technologii objemového tváření za studena tření mezi povrchem součásti a stěnou nástroje, jedná se o jeden ze základních jevů doprovázejících výrobní proces této technologie. Třecí podmínky významně ovlivňují charakter tečení kovu, možnosti vzniku vnitřních defektů materiálu, průběh napětí, velikost zatížení a energetickou náročnost procesu.

Tření lze obecně definovat jako kluzný odpor proti relativnímu pohybu dvou stýkajících se těles, respektive jejich vzájemně tangenciálně pohybujících se ploch. Tento třecí odpor vyvolává v tvářecím procesu sekundární síly, které se mohou uplatňovat buď pasivním, nebo aktivním způsobem dle toho, zda působí proti či po směru tvářecí síly. Častěji má tření ve tváření roli pasivního činitele, který působí proti tvářecí síle a zvyšuje přetvárnou práci, komplikuje rozvoj plastické deformace a urychluje opotřebení nástrojů.

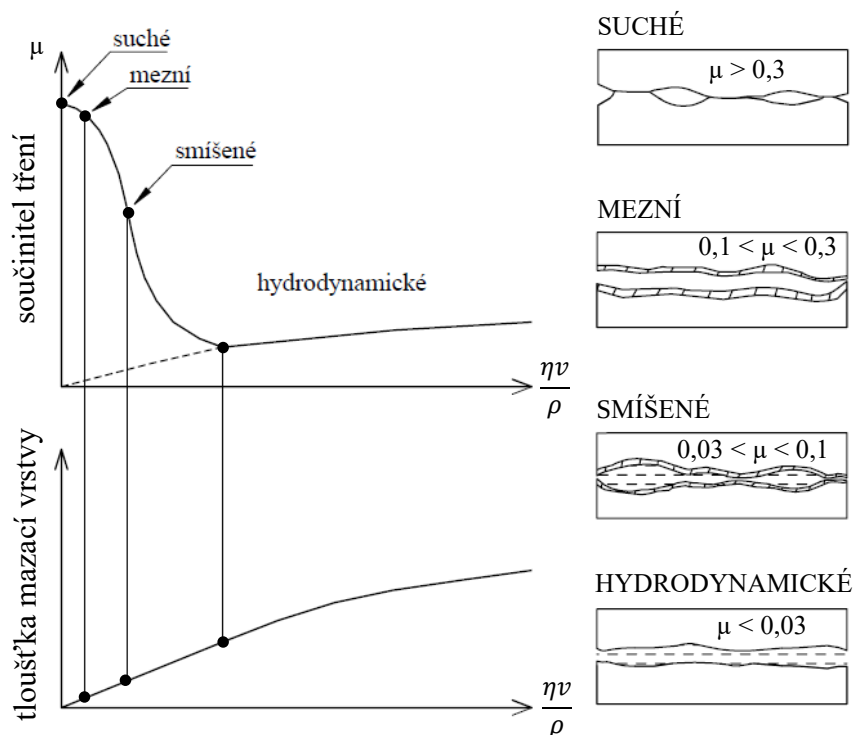
Třecí odpor lze částečně eliminovat, a tím snížit energetickou náročnost technologie a ztráty způsobené třením. Snížení tření lze dosáhnout použitím maziv, vhodnou volbou dokončovací technologie funkčních ploch nástrojů, správným tepelným zpracováním, povrchovou úpravou polotovaru a zajištěním vhodného povrchu vstupního materiálu.

Znalost velikosti tření ve tvářecím procesu je velmi důležitá z důvodu správného provedení technologických a numerických výpočtů. Přesnost výpočtů závisí na správné volbě součinitele tření, jehož skutečná hodnota je však ve většině případů neznámá. Tato hodnota závisí na materiálu třecí dvojice, geometrii třecí plochy a na podmínkách v mezeře mezi třecími plochami – tlak, kluzná rychlost a teplota. V případě nevhodně zvolené hodnoty třecího součinitele dojde k poddimenzování či naddimenzování tvářecích nástrojů i strojů, a tím mohou vznikat ve výrobě značné finanční ztráty.

Nejčastěji se rozlišují čtyři základní druhy tření:

- **Suché tření** – vzniká v případě přímého dotyku povrchových nerovností dvou těles bez použití maziva. Jedinou vrstvou, která může v tomto případě oddělovat povrchy nástroje a součásti je vrstva oxidů.
- **Mezní tření** – tento druh tření vzniká mezi nerovnostmi povrchů těles v přítomnosti velmi tenké vrstvy maziva o tloušťce přibližně 1 μm . Tloušťka mazacího filmu je tenká, ovlivňována pouze malými mezimolekulárními silami a neřídí se zákony hydrodynamiky. Dochází už však ke snížení tření a zamezuje vzniku svarů.
- **Hydrodynamické tření** – je charakterizováno přítomností silnější vrstvy maziva, která zajistí dokonalé oddělení ploch obou povrchů a podléhá již zákonům hydrodynamiky. V tomto případě jsou třecí podmínky dány viskozitou maziva a relativní rychlostí mezi nástrojem a součástí. Viskozita většiny druhů maziv se výrazně snižuje s rostoucí teplotou.
- **Smišené tření** – ve tvářecích operacích je nejvyskytovanějším druhem. Jedná se o sdružení mezního a hydrodynamického tření. Tento druh byl prokázán ve všech metodách technologie objemového tváření za studena. Velikost třecího součinitele může být různá v širokém rozpětí. Pro objemové tváření za studena se hodnota třecího součinitele pohybuje v rozsahu 0,2 až 0,04 v závislosti na druhu maziva a kvalitě třecích ploch v kontaktu. Na velikost třecího součinitele mají z technologického hlediska nejvýznamnější vliv rychlost deformace, teplota tváření a měrný kontaktní tlak.

Při mazání třecích ploch může kontakt ploch na rozhraní přecházet mezi několika mazacími režimy. Jedná se o mezní, smíšený a hydrodynamický režim, označované dle druhů tření. Jak režimy mazání reagují na tření je popsáno pomocí Stribeckovy křivky znázorněné na obr. 46.



Obr. 46 Znázornění mazacích režimů pomocí Stribeckovy křivky [17]

3.9 Maziva [26], [36], [38]

Mazání je činnost, při níž jsou aplikována speciální maziva s cílem vytvoření nosných mazacích vrstev pro libovolnou tvářecí operaci. Nejdůležitější funkcí maziv je snížení třecích ztrát. Mazivo slouží k vytvoření mezivrstvy a zabránění přímému kovovému styku mezi nástrojem a polotovarem. Současně napomáhá k ochraně povrchu polotovaru a nástroje před otěrem a opotřebením, snižuje poruchovost a tím počet přerušení výroby, čímž zvyšuje ekonomičnost výroby a také zajišťuje rovnoměrnou kvalitu výrobků. Druh maziva je zvolen na základě různých kritérií závisících na tvářecím postupu nebo na použití výrobku po tváření.

Za základní kritéria pro výběr maziv se považuje ovlivnění toku materiálu při tváření, obtížnost tváření, spojení mazacího a chladicího účinku, ochranný vliv maziva vůči korozi, jednoduchost nanášení a následného odstranění maziva, požadavky na BOZP a hygienu práce a vhodnost maziva s ohledem na druh dalšího zpracování polotovaru.

Druhy maziv a jejich rozdělení:

1. Pevná maziva

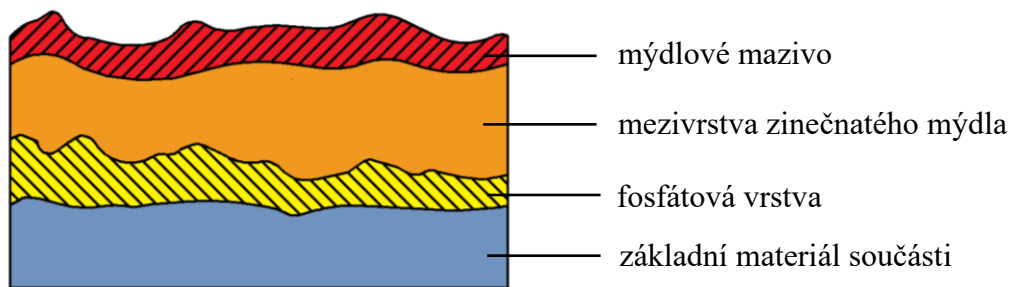
Nejdůležitějším typem jsou pevná maziva s vrstvenou mřížkovou strukturou. Zástupcem tohoto druhu je například grafit, který je nejvíce používán v disperzi s vodou a olejem a může být užíván až do teploty 800 °C. Dalším zástupcem je sulfid molybdeničitý, tuhý jemnozrnný prášek šedočerné barvy, jenž je získáván drcením z horniny molybdenitu. MoS_2 má díky své vrstevnaté struktuře výborné mazací vlastnosti a je velmi odolný proti vysokým tlakům. Je považován za jedno z nejlepších pevných maziv, splňuje nejvyšší požadavky na vlastnosti maziv a je hojně využíván v technologii objemového tváření za studena

2. Oleje

Využívá se různých druhů olejů. Oleje mohou být minerální nebo syntetické, které se používají častěji a jsou obohacovány o různé přísady kvůli zlepšení jejich dělicí schopnosti. Přidávají se přísady jako kovová mýdla, pevná maziva, aditiva na bázi síry a fosforu, případně chloru, avšak omezeně z důvodu náročnosti ekologické likvidace.

3. Maziva na bázi mýdel

Jejich vznik je způsoben reakcí s oxidy kovů na povrchu materiálu a vyznačují se velkou odolností vůči vysokým tlakům. Nejpoužívanějším mýdlem je stearát sodný, jenž je aplikován po fosfátování ponorem polotovaru v horkém mýdlovém roztoku. Když dojde ke sloučení stearátu sodného s vrstvou zinečnatého fosfátu, nastane chemická reakce, jejímž výsledkem je vznik nové mezivrstvy ve vodě nerozpustného zinečnatého mýdla, které se pevně váže na fosfátovou vrstvu viz obr. 47. Nad touto mezivrstvou se nachází zbytková vrstva sodného mýdla, jež se nepřeměnilo. Výsledkem je směs maziv, která efektivně snižuje tření v tvářecím procesu. Z důvodů fyzikálních a chemických změn je možné mýdlová maziva používat pro tváření za studena do teplot okolo 250 °C.



Obr. 47 Vznik vrstev maziva při mýdlování [17]

4. Vodní emulze

Tento typ maziv nachází svoje uplatnění ve tvářecích operacích charakteristických vysokou rychlostí a malým stupněm deformace. Vodní emulze jsou používány v případě menších nároků na mazání s větším důrazem na chlazení.

4 PLOŠNÉ TVÁŘENÍ [12], [14], [21], [39]

Plošným tvářením se vyrábí různorodé druhy součástí. Podle jednotlivých druhů práce při dané technologii je možné procesy plošného tváření rozdělit základním způsobem dle ČSN 22 6001 na stříhání, ohýbání, tažení, tlačení.

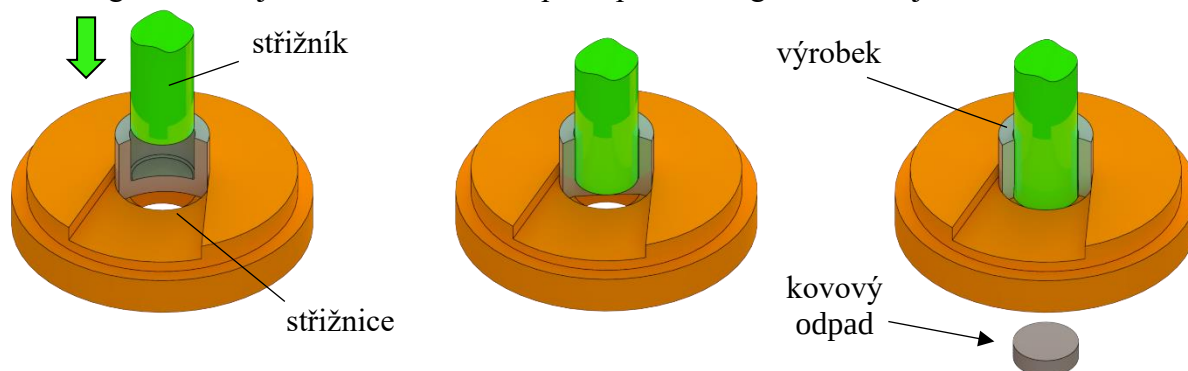
Základním výchozím polotovarem pro plošné tváření jsou plechy, dodávané nejčastěji ve svitcích nebo tabulích. Výrobky mohou být určeny k přímému využití nebo pokračují ve výrobním procesu – pro svařování, pájení či do složitějších výrobních systémů, např. výroba karoserie automobilu viz obr. 48.



Obr. 48 Karoserie automobilu zhotovená technologiemi plošného tváření [39]

4.1 Stříhání [2], [12]

Jedná se o základní technologii dělení materiálu, jejímž cílem je vyvolat porušení v podobě lomu v ohnisku deformace. Princip je založen na relativním pohybu dvou břitů podél křivky stříhu, tyto břity vytvářejí smykové (střížné) napětí, čímž dochází k oddělování materiálu. Proces stříhání doprovází plastická deformace, která je zde však nežádoucím jevem. Hlavními nástroji technologie stříhání je střížník a střížnice, princip technologie znázorňuje obr. 49.



Obr. 49 Princip technologie stříhání

Proces stříhání se skládá ze tří fází. V první fázi dosedá střížník na polotovar a dochází k pružnému vníkaní střížníku do povrchu polotovaru. Dvojice sil mezi hranami střížnice a střížníku vyvolává nežádoucí ohyb. Ve druhé fázi roste napětí ve směru vníkaní a překračuje hodnotu meze kluzu materiálu, čímž dochází k trvalé plastické deformaci. Ve třetí fázi dosahuje napětí meze pevnosti ve stříhu a začínají vznikat trhlinky, jejichž tvorba je podpořena tahovým normálovým napětím ve směru vláken. Následně probíhá rozšiřování oblasti trhlín, dokud nedojde k oddělení výstřížku.

Střížná síla:

$$F_s = n \cdot S_{stř} \cdot \tau_s = (1,0 \div 1,3) \cdot t \cdot L_s \cdot 0,77 \cdot R_m \quad (4.1)$$

kde:

F_s – střížná síla [N]

$n = 1,0$ až $1,3$ – koeficient zahrnující vliv vnějších podmínek při stříhání [-]

$S_{stř}$ – střížná plocha [mm²]; $S = L \cdot t$

L_s – délka křivky stříhu (obvod střížníku) [mm]; t – tloušťka plechu [mm]

τ_s – pevnost ve stříhu [MPa]

5 NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY

Vyráběnou součástí je drážkový náboj (viz obr. 50) využívaný v sestavě kloubového hřídele v automobilovém průmyslu, sloužící k zajištění přenosu kroutícího momentu a výkonu na zadní nápravu vozidla. Pro výrobu zadaného dílece byla zvolena technologie objemového tváření za studena, konkrétně technologie protlačování.

Z hlediska návrhu a výroby musí být splněny základní požadavky zákazníka jako jsou stanovené hodnoty pevnosti součásti v oblasti hlavy a dřívku s ozubením. Dalším důležitým bodem je dodržení vztažné měřicí kružnice, sloužící k zajištění kontroly rozměrů a kvality výrobků přímo na pracovišti za použití jednoduchých měřidel.

Drážky jsou vytvořeny protlačováním, s přesností dle možností technologie. Jejich přesnost se může pohybovat v širším tolerančním poli, jelikož budou dále pomocí speciálního povlaku zpracovány u zákazníka.

Součást bude vyrobena z materiálu splňujícího vysoké požadavky pro objemové tváření za studena a současně vhodného ke svařování, aby byla zajištěna dobrá svařitelnost a kvalitní svarový spoj drážkového náboje v sestavě kardanu.

Požadovaná výrobní série je 20 000 ks/rok.



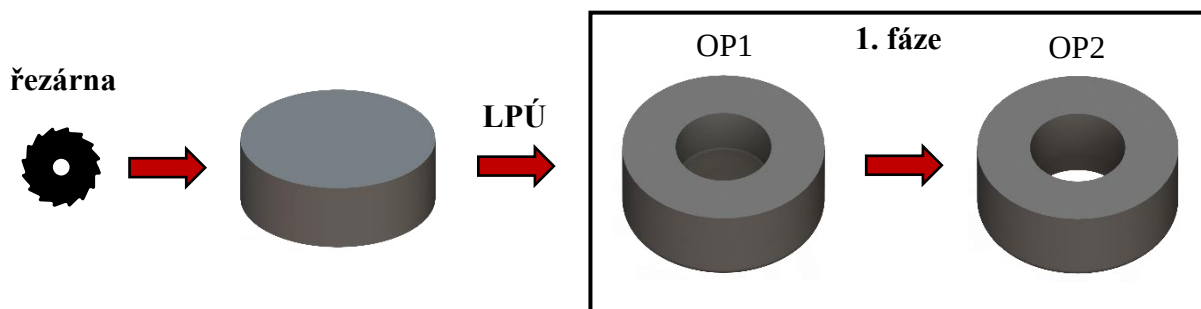
Obr. 50 Zadaný dílec

5.1 Návrhy variant výroby protlačováním

Při řešení výroby drážkového náboje objemovým tvářením za studena se nabízí různé varianty, jak řešenou součást zhotovit. Konečný postup musí být vybrán dle uvážení požadavků, rozměrů, počtu operací a materiálu charakteristických pro konkrétní navrhovaný dílec s ohledem na dostupné tvářecí zařízení, které je součástí strojního parku podniku. Důležitým kritériem je také ekonomické hledisko výroby součásti, při němž musí být zohledněna cena a náklady všech vstupů do výrobního procesu.

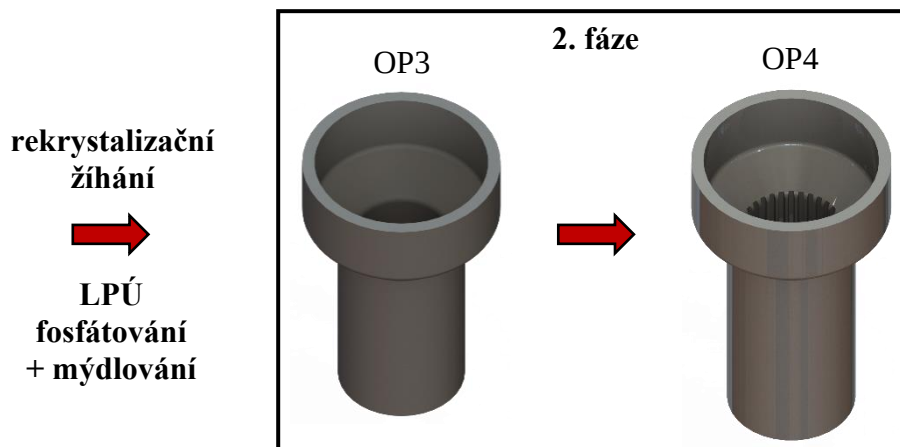
1) Varianta 1

První varianta výroby drážkového náboje je navržena na čtyři tvářecí operace. K tomu je využit postupový automatický lis. Z důvodu rozsáhlé deformace a velkého přetvoření, ke kterému by došlo by při výrobě součásti, není možné provést kompletní výrobu v rámci jednoho výrobního cyklu. Po provedení druhé operace je nutné do výrobního postupu zařadit mezioperační rekrytalizační žíhání pro umožnění dalšího tváření s následnou povrchovou úpravou, čímž dojde k přerušení procesu. Postup proto musí být rozvržen na dvě fáze po dvou operacích. V první fázi nejprve v první operaci dojde k vytvoření kalíšku a ve druhé operaci k prostřížení dna viz obr. 51.



Obr. 51 První výrobní fáze

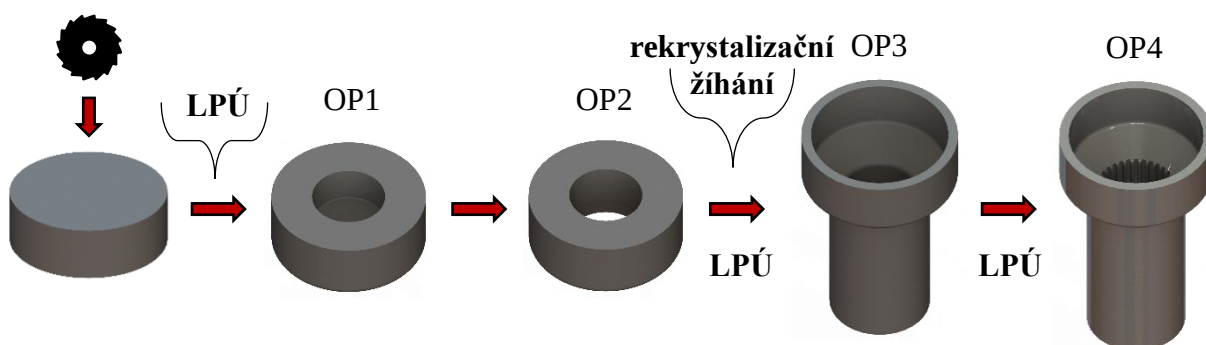
Následuje rekrytalizační žihání a fosfátování s následným mýdlováním. Poté je z regenerovaného materiálu ve třetí operaci kombinovaným protlačováním vytvořen tvar náboje, charakteristický hlavou a dříkem. Ve čtvrté operaci jsou na vnitřním průměru vylisovány drážky. Druhou fázi znázorňuje obr. 52.



Obr. 52 Druhá výrobní fáze

2) Varianta 2

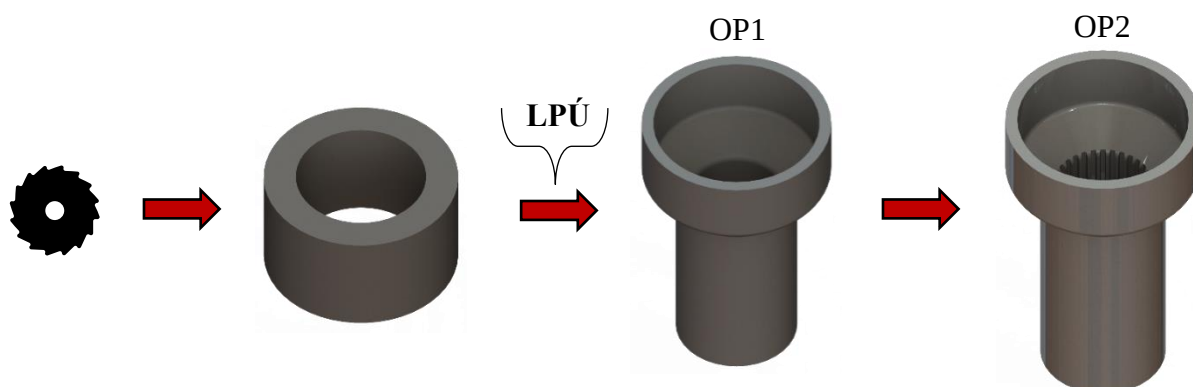
Tento způsob výroby uvažuje stejný postup jako předchozí varianta, avšak s rozdílem, že každá operace bude provedena samostatně na jednooperačních lisech dle schématu na obr. 53 a povrchová úprava s mazáním následuje i po třetí operaci.



Obr. 53 Výrobní postup druhé varianty

3) Varianta 3

V této variantě výroby je uvažován jako výchozí polotovár přířez z tlustostěnné bezešvé trubky. Trubka je nejprve dělena na prstence dané výšky, čímž by se vytvořil polotovár pro první operaci. Následuje povrchová úprava a mazání polotovarů před započítím výroby. První operace je navržena jako kombinované protlačování ke zhotovení náboje. Následuje druhá operace, při níž by byly vytvořeny drážky. Výrobní postup je přiblížen pomocí obr. 54.



Obr. 54 Výrobní postup třetí varianty

Zhodnocení variant:

1) Varianta 1

 Z hlediska produktivity, hospodárnosti a časového plánu výroby se použití víceoperačního postupového automatu jeví jako nejvhodnější způsob. V takovém případě je výroba součásti soustředěná na jeden stroj a tím sjednocená, nedochází k roztržštění výrobního procesu na několik pracovišť a podstatně se snižuje výrobní čas ve srovnání s výrobou na jednooperačních lisech.

 Při zohlednění zadané součásti a navrženého postupu, při němž by došlo k přerušení výrobního cyklu z důvodu provedení mezioperačního žihání, nelze plně využít potenciál konstrukce víceoperačního automatu. Vzhledem k rozměrům náboje a potřebným tvářecím silám na jeho zhotovení se také ve strojním parku závodu nenachází takový stroj, na kterém by daný výrobek bylo možné vyrobit. Ze zmíněných důvodů je tato varianta výroby zamítnuta.

2) Varianta 2

 Součástí strojního parku závodu jsou jednooperační lisy s potřebnou jmenovitou tvářecí silou a dostatečnými rozměry a parametry, které celkově splňují náročné požadavky na výrobu zadané součásti. Oproti první variantě je možné zařadit povrchovou úpravu a mazání i po třetí operaci, čímž se výrazně zvýší životnost nástrojů a sníží se náročnost podmínek tváření v poslední operaci.

 Nevýhodou této varianty je ovšem roztržštěnost výrobního procesu při výrobě na samostatných jednooperačních lisech a tím mnohem delší celkový výrobní čas, nutnost manipulace a transportu mezi jednotlivými operacemi a náročnější plnění časového plánu výroby.

3) Varianta 3

 Výhodou výroby drážkového náboje z bezešvé trubky je nízký počet výrobních operací, čímž dojde k podstatné úspoře nákladů na nástroje, na mezioperační žihání a další povrchovou úpravu jako je tomu u předchozích variant. Toto je ovšem uvažováno pro případ, že je využit polotovár s nejvhodnějším požadovaným průměrem pro výrobu zadaného dílce, tudíž 121 mm.

Ačkoliv se tato varianta jeví jako vhodná a úspornější, ze zkušeností výroby a praxe podniku není doporučeno využívat bezešvou trubku jako výchozí polotovár pro protlačování za studena podobných dílců. Materiál bezešvých trubek obsahuje různé vady, které spolu s jeho tepelným zpracováním vede k rozdílnému chování oproti zpracované tyči. Proto nelze zajistit požadovanou jakost výrobků.

 Dalším negativem je nákup bezešvých trubek konkrétních požadovaných rozměrů. Bezešvé trubky splňující parametry pro výrobu zadaného dílce jsou podstatně dražší než tyčové polotovary. Normované rozměry dle ČSN 4200 jsou navíc pouze průměry 127 mm nebo 114 mm. Polotovár těchto průměrů by tedy musel být předupraven k získání požadovaného průměru hlavy 121 mm, což vyžaduje další operace a tím se výrazně zvyšují náklady. Případně by materiál musel být objedнан na zakázku s konkrétním požadavkem na průměr a tloušťku stěny, což by proti tyči v násobcích zvýšilo cenu polotovarů. Tato varianta je ze zmíněných důvodů zamítnuta.

Vzhledem k výše uvedenému zhodnocení variant je zvolena druhá navrhovaná varianta výroby.

5.2 Volba materiálu [40]

Na základě souhrnu všech požadavků na řešenou součást a po schválení zákazníkem, byla zvolena pro výrobu drážkového náboje ocel S355J0 dle EN 10025-2, jejímž ekvivalentem na našem trhu je ocel ČSN 11 523, která bude na výrobu zadané součásti použita.

Jedná se o nelegovanou konstrukční jemnozrnnou ocel s nízkým obsahem uhlíku. Materiál vykazuje poměrně nízkou mez kluzu a vysokou pevnost v tahu, je vhodný k protlačování za studena, zároveň i pro svařování všemi obvykle používanými způsoby. Tento materiál nachází své uplatnění pro výrobu mostních a jiných svařovaných konstrukcí, ohýbaných profilů, svařované konstrukce z dutých profilů a součásti strojů, součásti osobních i nákladních automobilů, motocyklů a jízdních kol, součásti jeřábů, buldozerů, traktorů a další stavební i zemědělské techniky. Dále se využívá také pro součásti tepelných energetických zařízení a součásti tlakových nádob.

Chemické složení materiálu i velikost meze kluzu a meze pevnosti odpovídá potřebám kladeným na danou součást. Chemické složení a mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tab. 7.

Tab. 7 Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli S355J0 [40]

Přehled vlastností oceli S355J0					
Chemické složení [%]					
C max. pro tloušťku v mm	Mn	Si	P	S	N
> 40	max.	max.	max.	max.	max.
0,22	1,6	0,55	0,03	0,03	0,012
Mechanické vlastnosti					
Minimální mez kluzu [MPa]	295				
Pevnost v tahu Rm [MPa]	450 ÷ 600				
Minimální tažnost [%]	18				
Minimální nárazová práce KV [J] při 0 °C	27				

Na obr. 55 je zobrazena feriticko-perlitická struktura vzorku polotovaru, který byl odebrán před započatím výroby pro ověření struktury a složení dodaného materiálu.



Obr. 55 Feriticko-perlitická struktura vzorku z tyče oceli 11 523

5.3 Technologické výpočty a návrh výrobního postupu

5.3.1 Výpočet objemu součástí

Navrhovanou součást je nutné rozdělit na více dílčích geometrických těles a pro každé těleso jednotlivě stanovit jeho objem. Výpočtu konečného celkového objemu dílce je dosaženo součtem objemů všech jeho dílčích částí. Na základě konečné hodnoty objemu je následně výpočtem získána hmotnost hotového výrobku.

Výrobek lze rozdělit na tři základní geometrická tělesa, jak je znázorněno na obr. 56, jimiž jsou horní část duté válcové hlavy náboje, přechodná kuželová část a spodní část válcového dřívku náboje.

Výsledky následujících výpočtů byly ověřeny pomocí CAD systému Solidworks, v němž jsou taktéž zhotoveny modely a výkresy.

Výpočty objemů vychází ze základních matematických vztahů pro prostorová tělesa:

Objem rotačního válce:

$$V_{VÁLEC} = \frac{\pi \cdot d_v^2}{4} \cdot h_v [mm^3] \quad (5.1)$$

kde:

d_v – průměr válce [mm]

h_v – výška válce [mm]

Objem komolého kužele:

$$V_{KUŽEL} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot h_K \cdot (R^2 + R \cdot r + r^2) [mm^3] \quad (5.2)$$

kde:

R – poloměr spodní podstavy [mm]

r – poloměr horní podstavy [mm]

h_K – výška kužele [mm]

Hmotnost tělesa:

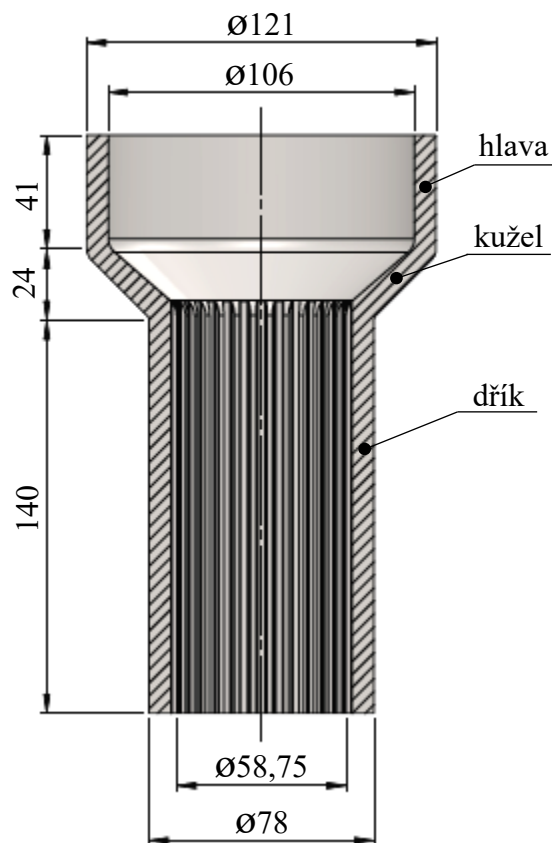
$$m = \rho \cdot V \quad (5.3)$$

kde:

ρ – hustota materiálu [kg/m^3]; uvažovaná hodnota hustoty oceli $\rho = 7850 kg/m^3$

- Výpočet objemu V_H a hmotnosti m_H válcové hlavy náboje:

$$V_H = \frac{\pi \cdot 121^2}{4} \cdot 41 - \frac{\pi \cdot 106^2}{4} \cdot 41 = 471\,459 - 361\,814 = 109\,645 mm^3$$



Obr. 56 Schematické rozdělení tělesa pro výpočet objemu

$$m_H = \rho \cdot V_H = 7850 \cdot 109\,645 = 0,86 \text{ kg}$$

- Výpočet objemu V_K a hmotnosti m_K kuželové části:

- a) výpočet vnějšího kužele V_{K1} :

$$V_{K1} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot 24 \cdot (60,5^2 + 60,5 \cdot 39 + 39^2) = 189\,520 \text{ mm}^3$$

- b) výpočet vnitřního kužele V_{K2} :

$$V_{K2} = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot 24 \cdot (53^2 + 53 \cdot 29,4 + 29,4^2) = 131\,483 \text{ mm}^3$$

- c) výpočet celkového objemu kužele:

$$V_K = V_{K1} - V_{K2} = 189\,520 - 130\,363 = 58\,037 \text{ mm}^3$$

$$m_K = \rho \cdot V_K = 7850 \cdot 58\,037 = 0,456 \text{ kg}$$

- Výpočet objemu V_D válcového dříku náboje:

$$V_{Dp} = \frac{\pi \cdot 78^2}{4} \cdot 140 - \frac{\pi \cdot 58,75^2}{4} \cdot 140 = 668\,970 - 379\,519 = 289\,451 \text{ mm}^3$$

Je nutné taktéž spočítat na základě zadaného výkresu a parametrů objem ozubení náboje, jelikož vnitřní průměr válcového dříku, viz výpočet výše, je hodnota hlavové kružnice zadaného ozubení, tudíž je zapotřebí vypočtený objem drážek odečíst od pracovní hodnoty objemu dříku V_{Dp} , čímž se získá skutečná hodnota objemu dříku V_D zadaného náboje dle zákaznické výkresové dokumentace.

Výpočet objemu ozubení vychází z úvahy plochy jednoho zubu, jejíž parametry jsou dány interní normou zákazníka. Objem drážek je spočítán vzhledem k délce ozubeného dříku součásti a zadaného počtu zubů. Objem drážek byl vypočten $V_{DRÁŽKY} = 26\,183 \text{ mm}^3$.

Potom konečná hodnota objemu dříku je:

$$V_D = V_{Dp} - V_{DRÁŽKY} = 289\,451 - 26\,183 = 263\,268 \text{ mm}^3$$

$$m_D = \rho \cdot V_D = 7850 \cdot 263\,268 = 2,06 \text{ kg}$$

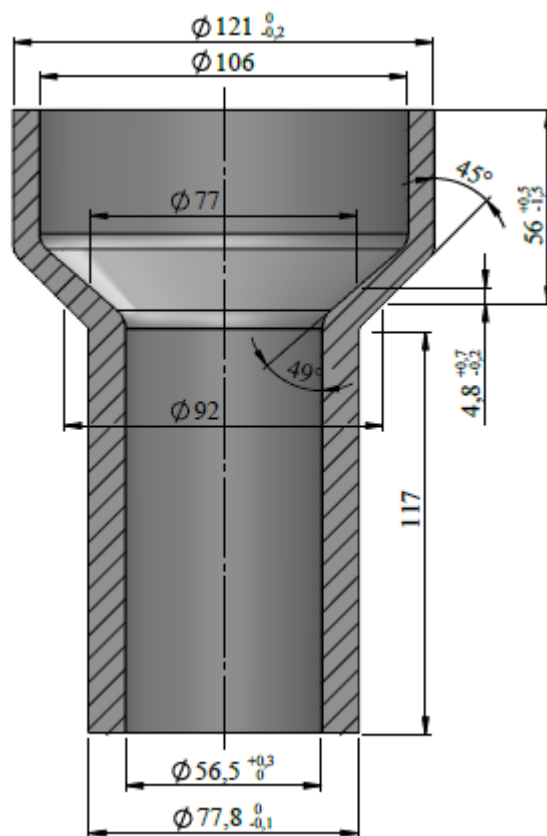
- Výpočet celkového objemu drážkového náboje $V_{NÁBOJ}$ a hmotnosti $m_{NÁBOJ}$:

$$V_{NÁBOJ} = \sum V_i = V_H + V_K + V_D = 109\,645 + 58\,037 + 263\,268 = 430\,950 \text{ mm}^3$$

$$m_{NÁBOJ} = \sum m_i = m_H + m_K + m_D = 0,86 + 0,456 + 2,06 = 3,38 \text{ kg}$$

válcového dříku V_D vypočtena výše. Na základě této hodnoty lze matematickou úpravou a výpočtem stanovit výšku dříku h_D v předposlední operaci:

$$V_D = \frac{\pi \cdot 77,8^2}{4} \cdot h_D - \frac{\pi \cdot 56,5^2}{4} \cdot h_D \rightarrow h_D = \frac{4 \cdot V_D}{\pi \cdot (77,8^2 - 56,5^2)} \cong 117 \text{ mm}$$



Obr. 58 Schéma náboje před poslední operací

S ohledem na tvar dílce se nabízí jako vhodná technologie výroby dopředné protlačování. Ovšem nyní je nutné provést úvahu o průběhu této operace. Poté, co dojde ke kontaktu nástroje s materiálem prstence, začne se materiál nejprve pohybovat po směru i proti směru pohybu nástroje, dokud nedojde k vyplnění mezery mezi stěnou průtlačníku a stěnou průtlačnice materiálem, čímž se tvoří hlava dílce. Teprve poté je materiál protlačován dále sousledně s pohybem průtlačníku a je dokončen tvar dříku. Tvorbu hlavy je tudíž nutné uvažovat zpětným protlačováním, pro které je charakteristický právě protiběžný pohyb materiálu vůči pohybu průtlačníku. Jelikož na základě úvahy toku materiálu dochází ke kombinaci dopředného a zpětného protlačování, je pro tuto operaci určena technologie kombinovaného protlačování.

Při vložení polotovaru do průtlačnice je vždy nutná určitá vůle, aby nedocházelo ke komplikacím při výrobě. V průtlačnici může být usazená vrstva starých maziv či nečistot, případně může mít polotovar nehladký povrch z důvodu defektů jako například naražených částí a od nich vytlačeného materiálu. Všechny tyto faktory mohou zmenšit vůli a zabraňují hladkému vložení do dutiny průtlačnice. Z důvodu zajištění dostatečné vůle v průtlačnici je vhodné vnější průměry součásti vždy nepatrně upravit.

Jako polotovar pro operaci vedoucí ke zhotovení tvaru náboje kombinovaným protlačováním je zvolen prstenec s vnějším průměrem 120 mm a vnitřním průměrem 56,8 mm. Tento vnitřní průměr prstencového polotovaru se volí s ohledem na velikost vnitřního průměru náboje zhotoveného touto operací. Důvodem je, že při kombinovaném protlačování vnikne do dutiny prstence nejprve trn, pro který je nutné zajistit dostatečnou vůli. Tento trn o průměru

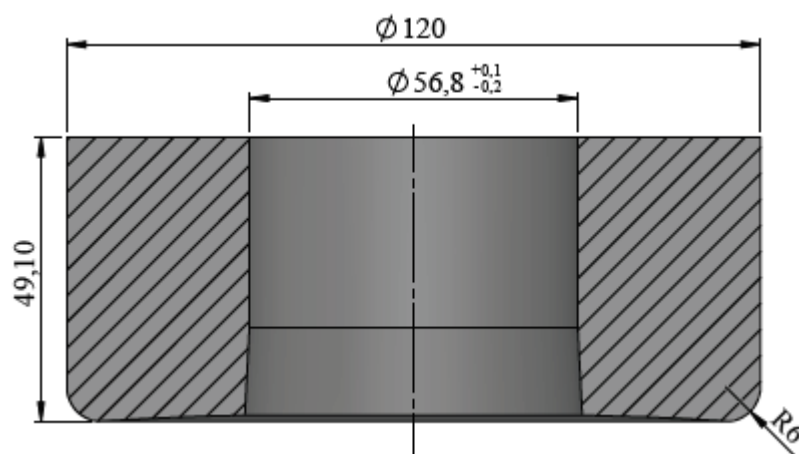
56,5 mm udává vnitřní průměr součásti, jejíž materiál trn obtéká, když teče mezi stěnou trnu a stěnou průtlachnice.

Objem prstence V_P je roven objemu konečného výlisku $V_{NÁBOJ}$ vypočtenému výše, vzhledem k zákonu zachování objemu.

$$V_{NÁBOJ} = V_P = 430\,950\,mm^3$$

Z této hodnoty je opět stanovena výška prstencového polotovaru h_P (zobrazeného na obr. 59) obdobným způsobem, jak bylo již počítáno výše.

$$V_P = \frac{\pi \cdot 120^2}{4} \cdot h_P - \frac{\pi \cdot 56,8^2}{4} \cdot h_P \rightarrow h_P = \frac{4 \cdot 430\,950}{\pi \cdot (120^2 - 56,8^2)} \cong 49,1\,mm$$



Obr. 59 Prstenec – polotovar pro kombinované protlačování

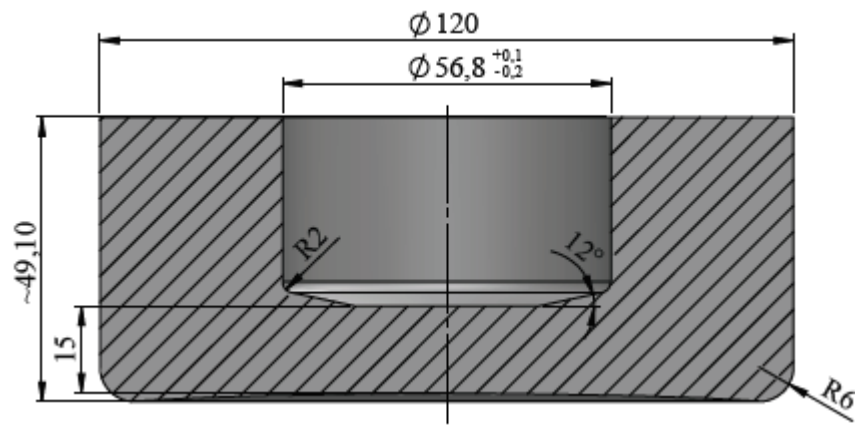
Prstenec pro výrobu náboje lze získat buď jako přířez z tlustostěnné bezešvé trubky, nebo z kalíšku, u kterého dojde k prostřížení dna. Dále se bude vycházet z druhé možnosti – prostřížení dna kalíšku. Velikost tloušťky dna je optimálně určena na 15 mm. Na základě znalosti průměru díry prstence je spočítán objem V_{DNO} neboli objem odpadu v podobě vystříženého dna. Přičtením hodnoty objemu prostříženého dna k objemu prstence je získán objem kalíšku zhotoveného přechozí operací.

- objem odpadu:

$$V_{DNO} = \frac{\pi \cdot 56,8^2}{4} \cdot 15 \cong 38\,008\,mm^3$$

- objem polotovaru pro operaci prostřížení dna:

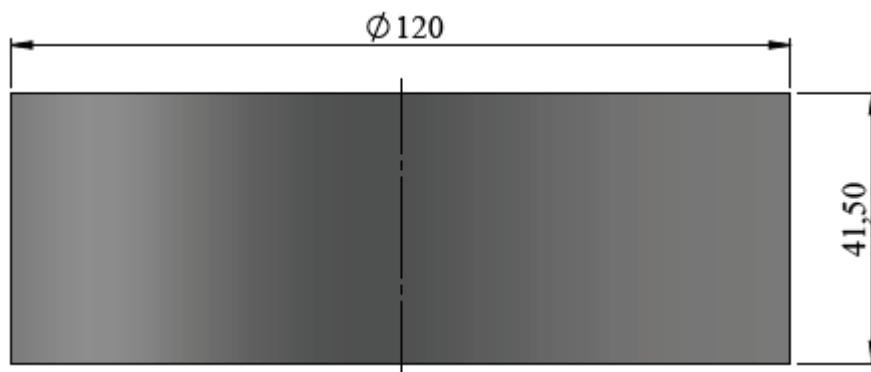
$$V_{KALÍŠEK} = V_{DNO} + V_P = 38\,008 + 430\,950 = 468\,958\,mm^3$$



Obr. 60 Kališek – polotovár pro prostřizení dna a získání prstence

Tvar kališku je charakteristický pro technologii zpětného protlačování, tudíž právě tuto technologii je nejvhodnější pro danou operaci využít. Polotovarem pro zpětné protlačování je kalota. Při přetvoření z kaloty na kališek nedochází k žádné ztrátě materiálu, tudíž kalota má stejný objem jako kališek. Na základě této znalosti lze opět spočítat výšku kaloty.

$$V_{KALÍŠEK} = V_{KALOTA} = \frac{\pi \cdot 120^2}{4} \cdot h_{KALOTA} \rightarrow h_{KALOTA} = \frac{4 \cdot V_{KALOTA}}{\pi \cdot 120^2} = 41,465 \approx 41,50 \text{ mm}$$



Obr. 61 Kalota – polotovár pro zpětné protlačování

Zde reverzní postup a analýza výroby drážkového náboje končí a je dosaženo znalosti tvaru a parametrů výchozího polotovaru pro výrobu zadaného dílce.

Parametry výchozího polotovaru:

- Objem výchozího polotovaru:

$$V_{POLOTOVAR} = \frac{\pi \cdot 120^2}{4} \cdot 41,5 = 469\,354 \text{ mm}^3$$

- Hmotnost výchozího polotovaru:

$$m_{POLOTOVAR} = 469\,354 \cdot 7850 = 3,68 \text{ kg}$$

5.3.3 Polotovar a jeho příprava [41]

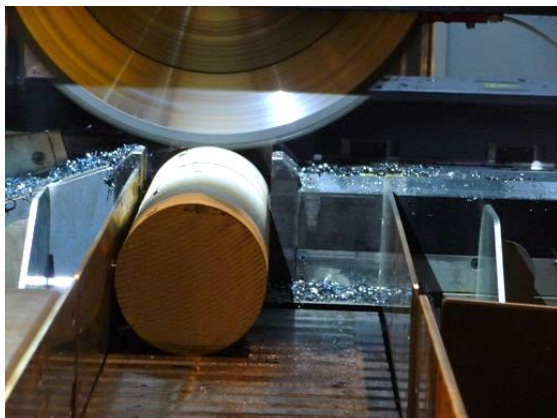
Z výše uvedených výpočtů jsou známy parametry výchozího polotovaru pro výrobu drážkového náboje. Polotovarem bude kalota o průměru 120 mm a výšce 41,5 mm. Tento tvar bude získán jako přířez dělením z tyčového polotovaru o normovaném průměru 120 mm dle ČSN 42 5510.

Tyče vyrobené válcováním za tepla jsou dodány z ocelárny do výrobního závodu ve svazcích viz obr. 62. Přichází v délkách 6 metrů a ve stavu po normalizačním žíhání, čímž jsou připraveny na výrobu objemovým tvářením za studena.

V rámci výrobního toku materiálu zadaného dílce závodem počíná výrobní proces přesunem dodaného materiálu na pracoviště řezárny. Zde budou tyčové polotovary děleny na kotoučové pile, jak zobrazuje obr. 63.



Obr. 62 Svazky tyčových polotovarů



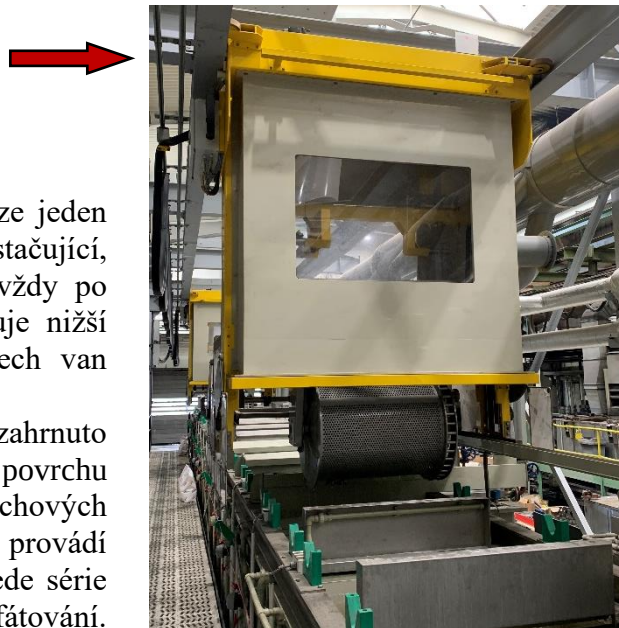
Obr. 63 Dělení polotovaru na kotoučové pile [41]

charakteru konkrétní předchozí lázně. Pouze jeden oplach není z hlediska vyrovnání pH dostačující, proto je vhodné navrhnout sérii oplachů vždy po třech kaskádovým způsobem, jenž zajišťuje nižší spotřebu vody a její stálý přítok do všech van zároveň.

Protože do výrobního postupu není zahrnuto tryskání z důvodu přijatelné kvality povrchu polotovarů, je nutné zařadit do postupu povrchových úprav moření. Moření polotovarů se provádí v kyselině sírové. Po moření se opět provede série oplachů, přičemž následuje aktivace a fosfátování. Po uskutečnění fosfátování a vzniku fosfátové vrstvy na povrchu materiálu je nutné opět provést sérii

Po dělení tyčí na kaloty je materiál přepraven na pracoviště povrchových úprav, jež je zobrazeno na obr. 64, kde je provedena příprava polotovarů na uskutečnění tvářecích procesů.

Proces přípravy materiálu na linkách povrchových úprav začíná alkalickým odmaštěním, následuje řada oplachů. Oplachy jsou prováděny studenou vodou, přičemž se vždy postupně vyrovnává pH v závislosti na



Obr. 64 Přejezd koše s polotovary mezi lázněmi na LPÚ

oplachů, následovanou neutralizací. Na závěr je provedeno mazání – mýdlování, které probíhá sycením fosfátové vrstvy mýdlovým roztokem, po čemž polotovary putují na sušení, čímž je počáteční povrchová úprava dokončena. Přesný postup jednotlivých operací na LPÚ pro ocel 11 523 včetně teplot lázní a operačních časů je uveden v tabulce 8.

Tab. 8 Postup operací na LPÚ pro ocel 11 523

Krok	Typ operace	Teplota lázně [°C]	Doba operace [min]
1	Odmaštění v horkém alkalickém roztoku	80	14
2	Odmaštění v horkém alkalickém roztoku	90	6
3	Oplach 1 studenou vodou	-	1,5
4	Oplach 2 studenou vodou	-	1
5	Oplach 3 studenou vodou	-	1,5
6	Moření v kyselině sírové	60	6
7	Oplach 1 studenou vodou	-	4
8	Oplach 2 studenou vodou	-	1
9	Oplach 3 studenou vodou	-	0,5
10	Aktivace	50	6
11	Fosfátování – ponor v zinečnatém fosfátu	70	13
12	Oplach 1 studenou vodou	-	5
13	Oplach 2 studenou vodou	-	0,5
14	Oplach 3 studenou vodou	-	2
15	Neutralizace	70	3,5
16	Mýdlování	75	6,5
17	Sušení	-	8

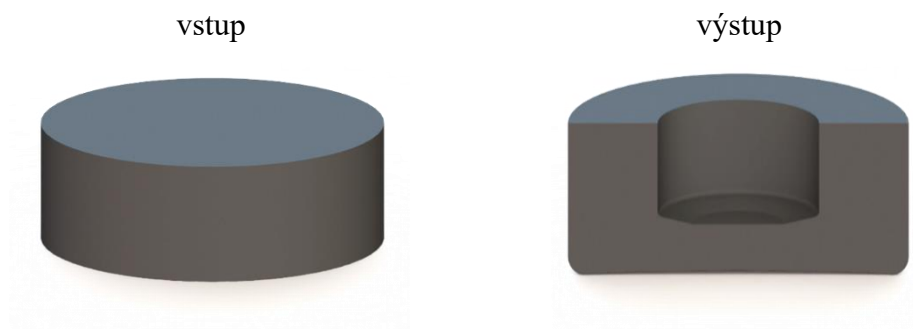
Na obr. 65 je zobrazen vstupní polotovar před první operací v podobě kaloty po provedení povrchových úprav a mýdlování.



Obr. 65 Vstupní polotovar pro výrobní proces

5.3.4 Technologické výpočty [20]

1. Operace – zpětné protlačování



Obr. 66 Operace 1

- Výpočet plochy vstupního průřezu polotovaru před 1. operací:

$$S_{0,1} = \frac{\pi \cdot 120^2}{4} = 11\,309,7 \text{ mm}^2$$

- Výpočet plochy průřezu průtlačníku pro 1. operaci:

$$S_{1,1} = \frac{\pi \cdot 56,8^2}{4} = 2533,9 \text{ mm}^2$$

a) stupeň přetvoření

$$\varepsilon_1 = \frac{D_1^2}{D_0^2} = \frac{56,8^2}{120^2} = 0,224 \sim 22,4 \%$$

b) logaritmické přetvoření

$$\varphi_1 = \ln \frac{D_0^2}{D_0^2 - D_1^2} = \frac{120^2}{120^2 - 56,8^2} = 0,254$$

c) deformační odpor

Pro logaritmické přetvoření o hodnotě 0,254 odpovídá dle křivek přetvárných odporů (příloha 1) hodnota přirozeného přetvárného odporu $\sigma_p = 770,481 \text{ MPa}$.

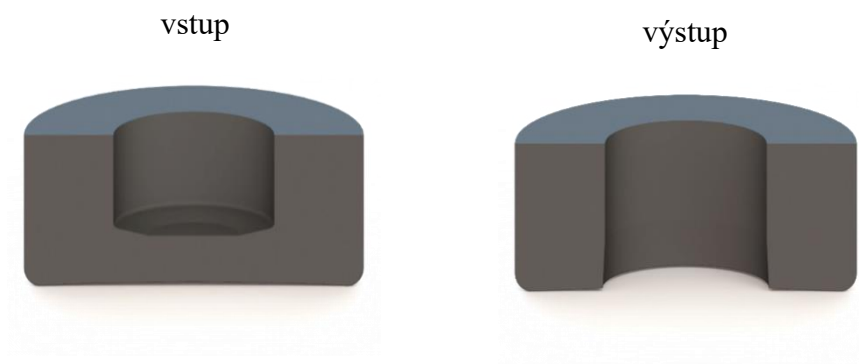
Pro výpočet je použit vztah dle Siebela (3.10):

$$\begin{aligned}\sigma_{d1} &= 1,152 \cdot \sigma_p \cdot \frac{S_{0,1}}{S_{1,1}} \left(\log \frac{S_{0,1}}{S_{0,1} - S_{1,1}} + \frac{S_{0,1}}{S_{0,1} - S_{1,1}} \cdot \log \frac{S_{0,1}}{S_{1,1}} + \log \frac{S_{1,1}}{S_{0,1} - S_{1,1}} \right) \\ \sigma_{d1} &= 1,152 \cdot 770,481 \cdot \frac{11\,309,7}{2533,9} \cdot \left(\log \frac{11\,309,7}{8775,8} + \frac{11\,309,7}{8775,8} \cdot \log \frac{11\,309,7}{2533,9} + \log \frac{2533,9}{8775,8} \right) \\ \sigma_{d1} &= 1\,616,35 \text{ MPa}\end{aligned}$$

d) protlačovací síla

$$F_1 = \sigma_{d1} \cdot S_{1,1} = 1\,616,35 \cdot 2533,9 = 4\,095\,669,265 \text{ N} = 4\,096 \text{ kN}$$

2. Operace – prostřížení dna kalíšku

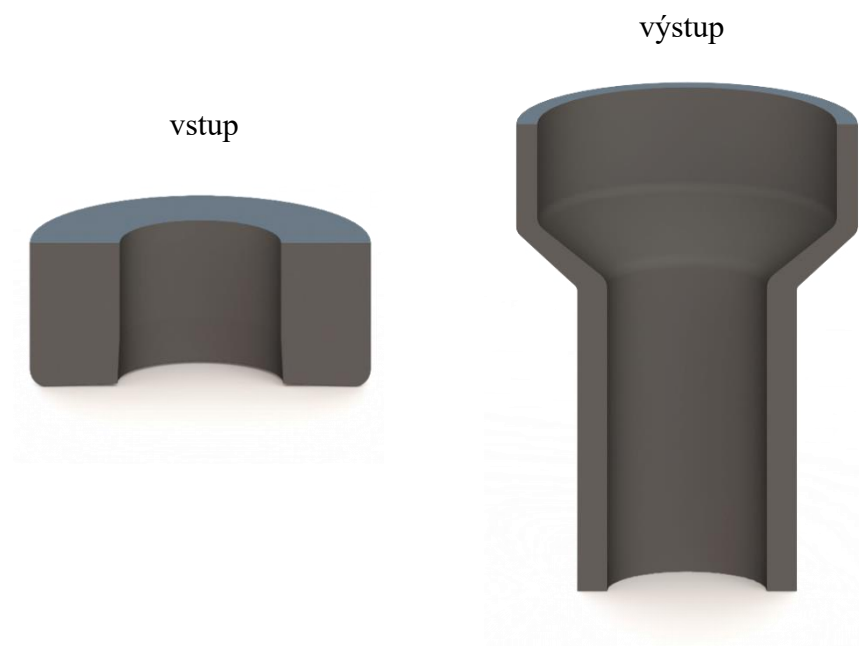


Obr. 67 Operace 2

Střížná síla:

$$F_2 = F_s = n \cdot S \cdot \tau_s = 1,2 \cdot t \cdot L \cdot 0,77 \cdot Rm = 1,2 \cdot 15 \cdot (\pi \cdot 56,6) \cdot 0,77 \cdot 550 = 1\,356\text{ kN}$$

3. Operace – kombinované protlačování



Obr. 68 Operace 3

- Výpočet plochy vstupního průřezu prstencového polotovaru před 3. operací:

$$S_{0,3} = \frac{\pi \cdot 120^2}{4} - \frac{\pi \cdot 56,8^2}{4} = 8\,775,85\text{ mm}^2$$

- Výpočet plochy výstupního průřezu hlavy po 3. operaci:

$$S_{1,3} = \frac{\pi \cdot 121^2}{4} - \frac{\pi \cdot 106^2}{4} = 2\,674,28\text{ mm}^2$$

- Výpočet plochy výstupního průřezu dříku po 3. operaci:

$$S_{2,3} = \frac{\pi \cdot 77,8^2}{4} - \frac{\pi \cdot 56,5^2}{4} = 2\,246,7\text{ mm}^2$$

a) stupeň přetvoření

- **hlava** – zpětné protlačování:

$$\varepsilon_{3H} = \frac{S_{0,3} - S_{1,3}}{S_{0,3}} = \frac{\left(\frac{\pi \cdot (120^2 - 56,8^2)}{4}\right) - \left(\frac{\pi \cdot (121^2 - 106^2)}{4}\right)}{\left(\frac{\pi \cdot (120^2 - 56,8^2)}{4}\right)}$$

$$\varepsilon_{3H} = \frac{8\,775,85 - 2\,674,28}{8\,775,85}$$

$$\varepsilon_{3H} \cong 69,6 \%$$

- **dřík** – dopředné protlačování:

$$\varepsilon_{3D} = \frac{S_{0,3} - S_{2,3}}{S_{0,3}} = \frac{\left(\frac{\pi \cdot (120^2 - 56,8^2)}{4}\right) - \left(\frac{\pi \cdot (77,8^2 - 56,5^2)}{4}\right)}{\left(\frac{\pi \cdot (120^2 - 56,8^2)}{4}\right)}$$

$$\varepsilon_{3D} = \frac{8\,775,85 - 2\,246,7}{8\,775,85}$$

$$\varepsilon_{3D} \cong 74,4 \%$$

b) logaritmické přetvoření

- **hlava:**

$$\varphi_{3H} = \ln \frac{S_{0,3}}{S_{1,3}} = \ln \frac{8\,775,85}{2\,674,28} = 1,188$$

- **dřík:**

$$\varphi_{3D} = \ln \frac{S_{0,3}}{S_{2,3}} = \ln \frac{8\,775,85}{2\,246,7} = 1,363$$

c) deformační odpor

- **hlava:**

Pro logaritmické přetvoření hlavy o hodnotě 1,188 odpovídá dle křivek přetvárných odporů (příloha 1) hodnota přirozeného přetvárného odporu $\sigma_{pH} = 1\,088,44$ MPa.

Pro výpočet je použit vztah dle Siebela (3.10):

$$\begin{aligned}\sigma_{d3H} &= 1,152 \cdot \sigma_{pH} \cdot \frac{S_{0,3}}{S_{1,3}} \cdot \left(\log \frac{S_{0,3}}{S_{0,3} - S_{1,3}} + \frac{S_{0,3}}{S_{0,3} - S_{1,3}} \cdot \log \frac{S_{0,3}}{S_{1,3}} + \log \frac{S_{1,3}}{S_{0,3} - S_{1,3}} \right) = \\ &= 1,152 \cdot 1088,44 \cdot \frac{8775,85}{2674,28} \cdot \left(\log \frac{8775,85}{6101,57} + \frac{8775,85}{6101,57} \cdot \log \frac{8775,85}{2674,28} + \log \frac{2674,28}{6101,57} \right) = \\ &= 2230,178 \text{ MPa}\end{aligned}$$

- **dřík:**

Pro logaritmické přetvoření dříku o hodnotě 1,363 odpovídá dle křivek přetvárných odporů (příloha 1) hodnota přirozeného přetvárného odporu $\sigma_{pD} = 1130,135 \text{ MPa}$.

Vztah dle Feldmanna (3.7):

$$\sigma_{d3D} = \sigma_p \cdot \left[\ln \frac{S_{0,3}}{S_{2,3}} \left(1 + \frac{\mu_R}{\alpha} \right) + \frac{2}{3} \alpha + \frac{4D_1\mu_R l'}{D_0^2} + \frac{4\mu_Z h_a}{D_0} \cdot \frac{Re}{\sigma_{ps}} \right]$$

$$\sigma_{d3D} = 1130,135 \cdot \left[\left(\ln \frac{8\,775,85}{2\,246,7} \cdot \left(1 + \frac{0,05}{0,785} \right) + \frac{2}{3} \cdot 0,785 \right) + \frac{4D_1\mu_R l'}{D_0^2} + \frac{4\mu_Z h_a}{D_0} \cdot \frac{Re}{\sigma_{ps}} \right]$$

$$\sigma_{d3D} = 1130,135 \cdot \left[2,947 + \frac{4 \cdot 77,8 \cdot 0,05 \cdot 10}{120^2} + \frac{4 \cdot 0,01 \cdot 49,1}{120} \cdot \frac{300}{1130,135} \right]$$

$$\sigma_{d3D} = 2\,249 \text{ MPa}$$

d) protlačovací síla

- **hlava:**

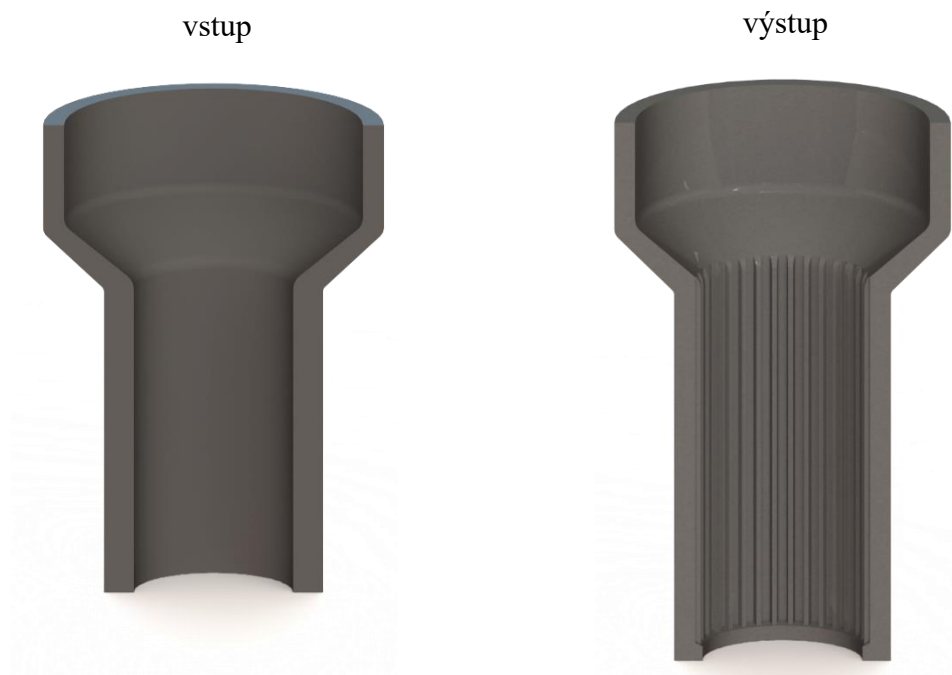
$$F_{3H} = \sigma_{dH} \cdot S_{0,3} = 2230,178 \cdot 8775,85 = 19\,571\,707,6 \text{ N} = 19\,572 \text{ kN}$$

- **dřík:**

$$F_{3D} = \sigma_{dD} \cdot S_{0,3} = 2249 \cdot 8775,85 = 19\,736\,886,65 \text{ N} = 19\,737 \text{ kN}$$

Na základě vyšší hodnoty deformačního odporu při tváření dříku náboje vychází i vyšší hodnota protlačovací síly pro tuto část, tudíž je tato hodnota použita pro zajištění správné volby vhodného tvářecího stroje.

4. Operace – protlačování drážek



Obr. 69 Operace 4

- Výpočet plochy vstupního průřezu dříku před 4. operací:

$$S_{0,4} = \frac{\pi \cdot 77,8^2}{4} - \frac{\pi \cdot 56,5^2}{4} = 2246,7 \text{ mm}^2$$

- Plocha výstupního průřezu dříku s drážkami po 4. operaci vygenerovaná pomocí Solidworks:
 - součet plošek průřezů drážek $S_{\text{drážky}} = 190,85 \text{ mm}^2$
 - plocha průřezu dříku bez drážek $S_{\text{dřík bez drážek}} = \frac{\pi \cdot 78^2}{4} - \frac{\pi \cdot 62,75^2}{4} = 1685,8 \text{ mm}^2$

$$S_{1,4} = S_{\text{drážky}} + S_{\text{dřík bez drážek}} = 190,85 + 1685,8 = 1876,65 \text{ mm}^2$$

a) stupeň přetvoření

$$\varepsilon_4 = \frac{S_{1,4}}{S_{0,4}} = 1 - \frac{1876,65}{2246,7} = 0,165 \sim 16,5 \%$$

b) logaritmické přetvoření

$$\varphi_4 = \ln \frac{S_{0,4}}{S_{1,4}} = \ln \frac{2246,7}{1876,65} = 0,179$$

c) deformační odpor

Pro logaritmické přetvoření o hodnotě 0,179 odpovídá dle křivek přetvárných odporů (příloha 1) hodnota přirozeného přetvárného odporu $\sigma_{p4} = 719,463 \text{ MPa}$.

$$\sigma_{d4} = 1,152 \cdot \sigma_{p4} \cdot \frac{S_{0,4}}{S_{1,4}} \left(\log \frac{S_{0,4}}{S_{0,4} - S_{1,4}} + \frac{S_{0,4}}{S_{0,4} - S_{1,4}} \cdot \log \frac{S_{0,4}}{S_{1,4}} + \log \frac{S_{1,4}}{S_{0,4} - S_{1,4}} \right)$$

$$\sigma_{d4} = 1,152 \cdot 719,46 \cdot \frac{2246,7}{1876,65} \left(\log \frac{2246,7}{370,05} + \frac{2246,7}{370,05} \cdot \log \frac{2246,7}{1876,65} + \log \frac{1876,65}{370,05} \right)$$

$$\sigma_{d4} = 1947,7 \text{ MPa}$$

d) protlačovací síla

$$F_4 = \sigma_{d4} \cdot S_{\text{drážky}} = 1947,7 \cdot 190,85 = 371\,719 \text{ N} = 371,7 \text{ kN}$$

Na základě doporučených přípustných hodnot deformace na jednu operaci při protlačování ocelí, které zobrazuje tab. 9, lze konstatovat, že hodnoty přetvoření vyplývající z výše uvedených technologických výpočtů a jejich výsledků nepřekračují povolené meze a jednotlivé operace protlačování mohou být provedeny.

Tab. 9 Přípustné hodnoty deformace na jednu operaci při protlačování ocelí [20]

Způsob protlačování	Změna průřezu	
	ε [%]	φ [-]
Zpětné protlačování	40 ÷ 75	0,51 ÷ 1,4
Dopředné protlačování	30 ÷ 90	0,37 ÷ 3,0

5.4 Návrh a kontrolní výpočty nástrojů [12], [19]

Z důvodu vysokých tlaků působících na průtlačnici je nutné provést výpočty, podle nichž se stanoví potřebné parametry funkčních nástrojů i celých sestav.

1. Operace – zpětné protlačování kalíšku

- Stanovení poměrného průměru průtlačnice
 - vnitřní průměr průtlačnice pro 1. operaci: $D_{0p} = 120 \text{ mm}$

$$\frac{D_1}{D_{0p}} = \frac{D_1}{120} = 1,6 \rightarrow D_1 = 120 \cdot 1,6 = 192 \text{ mm}$$

- Stanovení vnitřního přetlaku průtlačnice (podle Bosche):

$$p_1 = \sigma_d = 1\,616,35 \text{ MPa}$$

$$a = \frac{r_1}{r_0} = \frac{96}{60} = 1,6 \quad (5.4)$$

$$\sigma_r = p_1 \cdot \frac{1}{a^2 - 1} \cdot \left(1 - \frac{r_1^2}{r_0^2}\right) = \quad (5.5)$$

$$= 1\,616,35 \cdot \frac{1}{1,6^2 - 1} \cdot \left(1 - \frac{96^2}{60^2}\right) = -1\,616,35 \text{ MPa}$$

kde:

p_1 [MPa] – vnitřní tlak na funkční plochu průtlačnice

a [-] – poměr krajních poloměrů

σ_r [MPa] – radiální napětí v průtlačnici

S ohledem na doporučené zatížení průtlačnic bude provedeno armování dvěma objímkami, jelikož hodnota tlaku přesahuje doporučených 1 600 MPa.

- Stanovení lisovacího přesahu mezi průtlačnicí a první objímkou:

$$\Delta D_1 = 0,0035 \cdot D_1 = 0,0035 \cdot 192 = 0,672 \text{ mm}$$

Pro přesah průtlačnice 0,67 mm je dle diagramu závislosti hloubky vlisování na přesahu pro úhel 1° určena hloubka vlisování 18 mm.

- První objímka
 - výpočet poměrného průměru první objímky:

$$\frac{D_2}{D_{0p}} = 2,8 \rightarrow D_2 = 2,8 D_{0p} = 336 \text{ mm}$$

Vnější průměr první objímky je stanoven na 336 mm.

- Stanovení lisovacího přesahu mezi první a druhou objímkou:

$$\Delta D_2 = 0,0035 \cdot D_2 = 0,0035 \cdot 336 = 1,176 \text{ mm}$$

- Druhá objímka
 - výpočet poměrného průměru druhé objímky:

$$\frac{D_3}{D_{0p}} = 4 \rightarrow D_3 = 4D_{0p} = 4 \cdot 120 = 480 \text{ mm}$$

Vnější průměr druhé objímky je stanoven na 480 mm.



Obr. 70 Průtlačnice pro 1. operaci

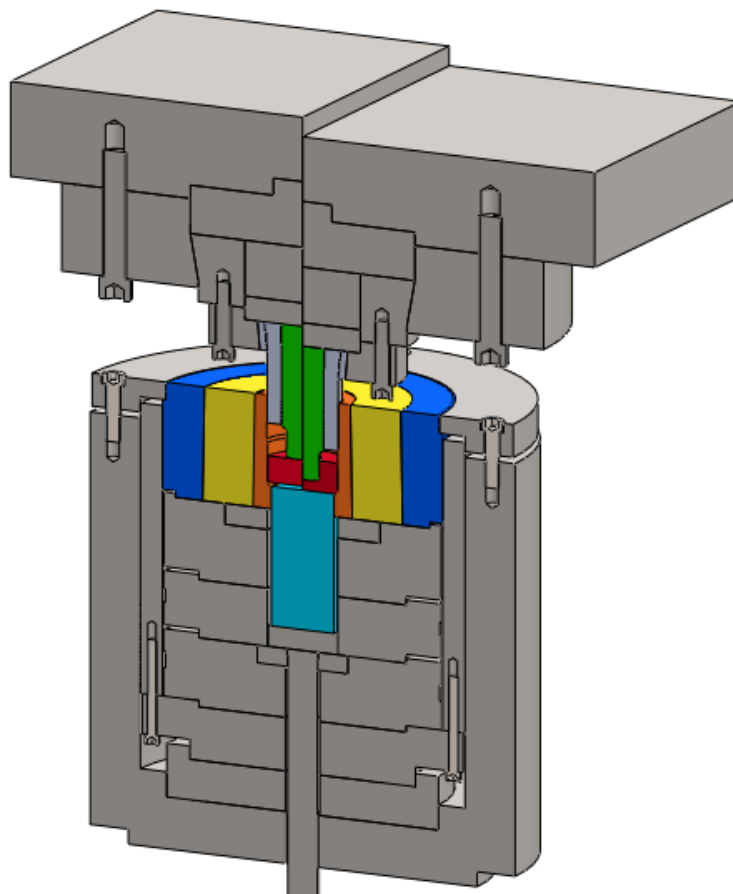
V první operaci výrobního postupu je provedeno armování průtlačnice dvěma objímkami z důvodu překročení doporučených hodnot zatížení průtlačnice.

Objímky jsou zhotoveny z oceli 19 554 a zpracovány na 44-46 HRC. Průtlačnice je vyrobena z oceli 19 655 a zušlechtěna na 52 ± 2 HRC. Funkční plocha průtlačnice je leštěna pomocí diamantové brusné pasty. Při armování průtlačnice se postupuje od vnější objímky směrem k vnitřní a dochází k zalisování jednotlivých částí na kuželové broušené plochy.

Průtlačník je navržen jako klasické řešení pro zpětné protlačování bez zvláštních specifik z oceli 19 820. Je zušlechtěn na 60-62 HRC a povlakován, aby bylo dosaženo vysoké tvrdosti. Na funkčních částech v oblasti čela je nástroj leštěn. Vyhazovač je zhotoven z oceli 19 820 a zpracován na 60 ± 2 HRC. Uložení vyhazovače v průtlačnici je H7/f7. Kompletní nástrojová sestava je zobrazena na obr. 72.



Obr. 71 Průtlačník pro 1. operaci



Obr. 72 Nástrojová sestava pro 1. operaci – tvorba kalíšku

2. Operace – prostřížení dna

Pro prostřížení dna kalíšku po první operaci je navržen průměr střížníku $d_{stř} = 56,6 \text{ mm}$

- Výpočet střížné vůle

$$\begin{aligned} v &= (1,5 \cdot c \cdot s - 0,0015) \cdot 0,32 \cdot \sqrt{\tau_s} = \\ &= (1,5 \cdot 0,015 \cdot 15 - 0,0015) \cdot 0,32 \cdot \sqrt{0,77 \cdot 550} = \\ &= 2,213 \text{ mm} \end{aligned} \quad (5.6)$$

kde:

v [mm] – střížná vůle
 c [-] – součinitel závislý na druhu stříhání
 s [mm] – tloušťka materiálu
 τ_s [MPa] – pevnost materiálu ve stříhu

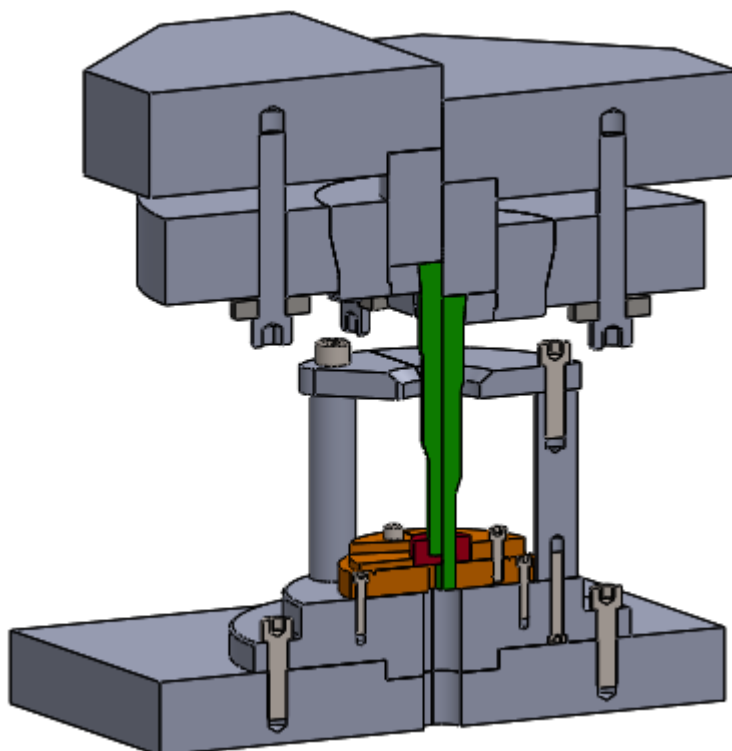
Střížná vůle pro prostřížení otvoru součásti je 2,213 mm.

Výpočet průměru střížnice:

$$D_{stř} = d_{stř} + v = 56,6 + 2,213 = 58,8 \text{ mm} \quad (5.7)$$

Pro operaci stříhání, kdy dochází k odstranění dna kalíšku je pro zhotovení střížnice i střížníku zvolena ocel 19 436. Oba nástroje jsou zušlechťeny na 60-62 HRC.

Nástrojová sestava pro tuto operaci musí být opatřena stěračem zajišťujícím setření součásti ze střížníku. Sestava je zobrazena na obr. 73.



Obr. 73 Nástrojová sestava pro 2. operaci – prostřížení dna

3. Operace – kombinované protlačování

- Stanovení poměrného průměru průtlačnice
 - vnitřní průměr průtlačnice pro 3. operaci: $D_{0p} = 121 \text{ mm}$

$$\frac{D_1}{D_{0p}} = \frac{D_1}{121} = 1,8 \rightarrow D_1 = 121 \cdot 1,8 = 217,8 \cong 218 \text{ mm}$$

- Stanovení vnitřního přetlaku průtlačnice (podle Bosche):

$$p_1 = \sigma_d = 2\,249 \text{ MPa}$$

$$a = \frac{r_1}{r_0} = \frac{109}{60,5} = 1,8$$

$$\sigma_r = p_1 \cdot \frac{1}{a^2 - 1} \cdot \left(1 - \frac{r_1^2}{r_0^2}\right) = 2\,249 \cdot \frac{1}{1,8^2 - 1} \cdot \left(1 - \frac{109^2}{60,5^2}\right) = -2\,255 \text{ MPa}$$

S ohledem na doporučené zatížení průtlačnic bude provedeno armování dvěma objímkami, jelikož hodnota tlaku přesahuje doporučených 1 600 MPa.

- Stanovení lisovacího přesahu mezi průtlačnicí a první objímkou:

$$\Delta D_1 = 0,0035 \cdot D_1 = 0,0035 \cdot 218 = 0,763 \text{ mm}$$

Pro přesah průtlačnice 0,763 mm je dle diagramu závislosti hloubky vlisování na přesahu pro úhel 1° určena hloubka vlisování 22 mm.

- První objímka
 - výpočet poměrného průměru první objímky:

$$\frac{D_2}{D_{0p}} = 2,8 \rightarrow D_2 = 2,8 D_{0p} = 339 \text{ mm}$$

Vnější průměr první objímky je stanoven na 339 mm.

- Stanovení lisovacího přesahu mezi první a druhou objímkou:

$$\Delta D_2 = 0,0035 \cdot D_2 = 0,0035 \cdot 339 = 1,187 \text{ mm}$$

- Druhá objímka

$$\frac{D_3}{D_{0p}} = 4 \rightarrow D_3 = 4 D_{0p} = 4 \cdot 121 = 484 \text{ mm}$$

Vnější průměr druhé objímky je stanoven na 480 mm.

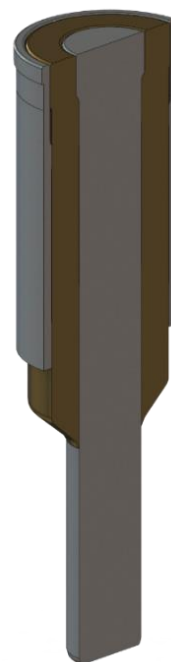
V operaci kombinovaného protlačování je opět překročena doporučená hodnota tlaku 1600 MPa, tudíž je provedeno armování průtlačnice dvěma objímkami. Výroba objímek je stanovena z oceli 19 554 a jsou zpracovány na 44-46 HRC. Průtlačnice se z důvodu vyměnitelnosti skládá ze dvou částí, kdy je vnitřní část tvořící redukční kužel zalisována na kuželovou plochu do vnější pouzdrové části. Obě jsou vyrobeny z oceli 19 655 a zušlechtěny na 52-54 HRC. Funkční plocha průtlačnice je leštěna. Průtlačnice je zobrazena na obr. 74.



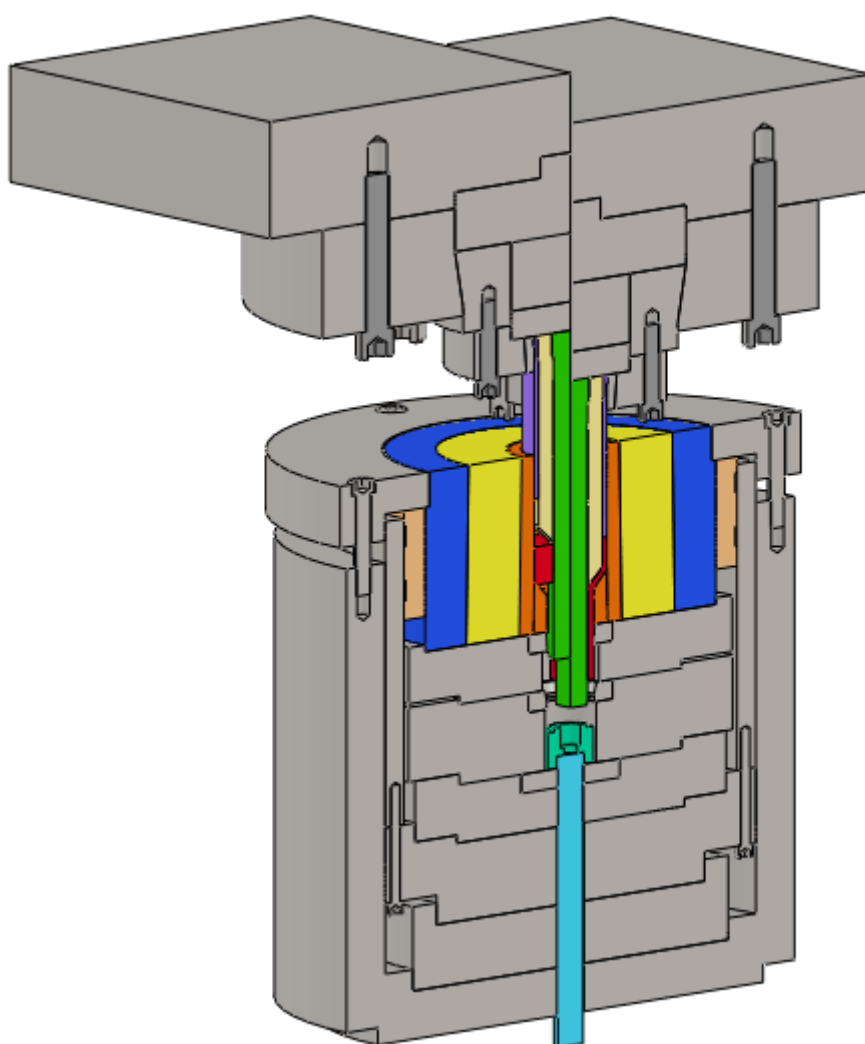
Obr. 74 Průtlačnice pro 3. operaci

Horní nástroj je navržen jako složený průtlačník. Vnitřní částí je trn, který vniká do dutiny prstencového polotovaru a následně při toku materiálu dochází k jeho obtékání, čímž vzniká stěna náboje. Tento trn je zalisován do průtlačníku, jehož funkční čelo tlačí materiál do dutiny průtlačnice. Průtlačník je obklopen pouzdrem, které zajišťuje seshora uzavření dutiny, ve které teče materiál ve zpětném směru mezi průtlačníkem a průtlačnicí. Jednotlivé části tohoto složeného průtlačníku jsou vyrobeny z oceli 19 830 a zušlechtěny na 62 ± 2 HRC, hlavní funkční části jsou také povlakovány. Složený průtlačník využitý pro třetí operaci je zobrazen na obr. 75.

Na obr. 76 je zobrazena nástrojová sestava pro kombinované protlačování ve třetí operaci.



Obr. 75 Průtlačník pro 3. operaci



Obr. 76 Nástrojová sestava pro 3. operaci – kombinované protlačování

4. Operace – protlačení drážek

- Stanovení poměrného průměru průtlačnice
 - vnitřní průměr průtlačnice pro 4. operaci: $D_{0p} = 121 \text{ mm}$

$$\frac{D_1}{D_{0p}} = \frac{D_1}{121} = 1,8 \rightarrow D_1 = 121 \cdot 1,8 = 217,8 \cong 218 \text{ mm}$$

- Stanovení vnitřního přetlaku průtlačnice (podle Bosche):

$$p_1 = \sigma_d = 1\,947,7 \text{ MPa}$$

$$a = \frac{r_1}{r_0} = \frac{109}{60,5} = 1,8$$

$$\sigma_r = p_1 \cdot \frac{1}{a^2 - 1} \cdot \left(1 - \frac{r_1^2}{r_0^2}\right) = 1\,947,7 \cdot \frac{1}{1,8^2 - 1} \cdot \left(1 - \frac{109^2}{60,5^2}\right) = -1\,953 \text{ MPa}$$

S ohledem na doporučené zatížení průtlačnic bude provedeno armování dvěma objímkami, jelikož hodnota tlaku přesahuje doporučených 1 600 MPa.

- Stanovení lisovacího přesahu mezi průtlačnicí a první objímkou:

$$\Delta D_1 = 0,0035 \cdot D_1 = 0,0035 \cdot 218 = 0,763 \text{ mm}$$

Pro přesah průtlačnice 0,763 mm je dle diagramu závislosti hloubky vlisování na přesahu pro úhel 1° určena hloubka vlisování 22 mm.

- První objímka
 - výpočet poměrného průměru první objímky:

$$\frac{D_2}{D_{0p}} = 2,8 \rightarrow D_2 = 2,8 D_0 = 339 \text{ mm}$$

Vnější průměr první objímky je stanoven na 339 mm.

- Stanovení lisovacího přesahu mezi první a druhou objímkou:

$$\Delta D_2 = 0,0035 \cdot D_2 = 0,0035 \cdot 339 = 1,187 \text{ mm}$$

- Druhá objímka

$$\frac{D_3}{D_{0p}} = 4 \rightarrow D_3 = 4 D_{0p} = 4 \cdot 121 = 484 \text{ mm}$$

Vnější průměr druhé objímky je stanoven na 480 mm.

Průtlačnice pro poslední operaci je zhotovena z oceli 19 655 a následně zušlechťena na 52-54 HRC. Na rozdíl od třetí operace se skládá pouze z jednoho kusu, protože opotřebení nástroje je rovnoměrné v rámci celého tělesa.

Objímky jsou zhotoveny z oceli 19 554 a zpracovány na 44-46 HRC.

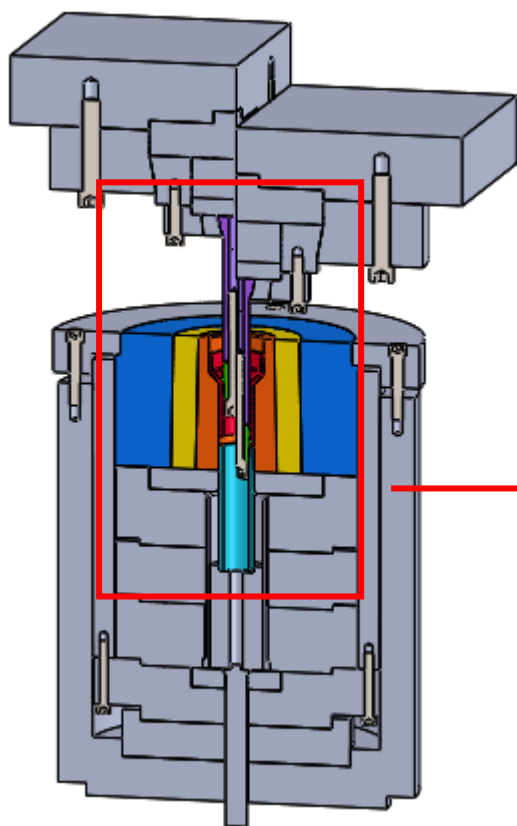
Průtlačník s drážkami viz obr. 77 je vyroben z oceli 19 820 a zpracován na tvrdost 62-64 HRC. Jeho montáž je provedena posazením na trubku z nástrojové oceli upevněnou v kuželové středící vložce horní části nástrojové sestavy, ke které je přitažen šroubem s vnitřním šestihranem.

Trubkový vyhazovač je také zhotoven z oceli 19 820.

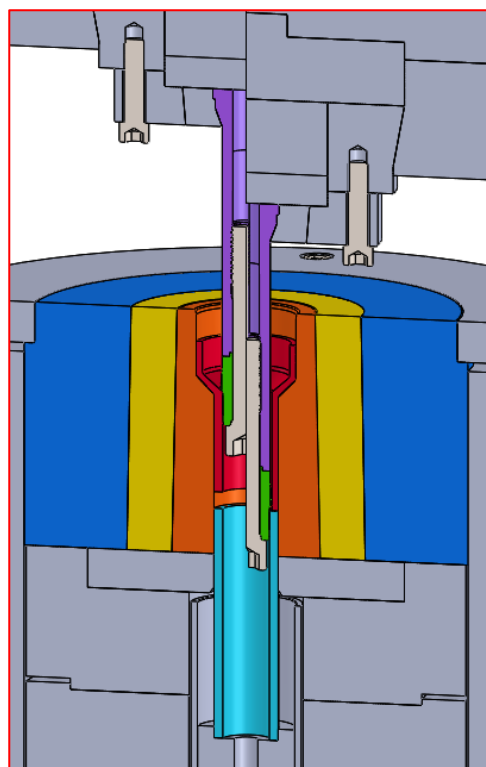
Na obr. 78 je znázorněna kompletní sestava nástrojů pro 4. operaci. Obr. 79 zobrazuje pro lepší přehlednost přiblížení funkčních částí nástrojové sestavy před započetím operace a po jejím uskutečnění.



Obr. 77 Průtlačník pro 4. operaci



Obr. 78 Nástrojová sestava pro 4. operaci – protlačení drážek



Obr. 79 Přiblížení sestavy funkčních nástrojů

5.5 Volba tvářecích strojů [30], [35]

Pro zhotovení součásti je nutné vybrat vhodný tvářecí stroj. Při výběru vhodného stroje musí být uvažovány parametry, kterými jsou největší možná tvářecí síla potřebná k úspěšné výrobě dílce, počet pracovních pozic (počet pracovních operací), pokud je výrobek zhotoven na víceoperačním stroji, velikost zdvihu, počet zdvihů a rozměry vnitřního prostoru lisu.

S ohledem na značné deformace není možné při zvoleném výrobním postupu navrhnout pro výrobu náboje automatický víceoperační lis, protože je nutné zařadit mezioperační rekrytalizační žhání a povrchové úpravy. Z tohoto důvodu jsou zvoleny pro jednotlivé operace výrobního postupu jednooperační stroje, které jsou k dispozici v rámci strojního parku závodu.

1. Operace

Výsledná protlačovací síla pro první operaci $F_1 = 4\,096\text{ kN}$.

Pro tuto operaci je zvolen lis o síle 800 t, což v přepočtu odpovídá 8 000 kN. Jmenovitá síla nebude překročena a použití daného lisu je vhodné.

2. Operace

Výsledná protlačovací síla pro druhou operaci $F_2 = 1\,356\text{ kN}$.

Pro tuto operaci je zvolen lis od společnosti ŽĐAS o síle 630 t, což v přepočtu odpovídá 6 300 N. Jmenovitá síla nebude překročena a použití daného lisu je vhodné.

3. Operace

Výsledná protlačovací síla pro třetí operaci $F_3 = 19\,737\text{ kN}$.

Pro tuto operaci je zvolen lis od společnosti Eitel o síle 2500 tun, což v přepočtu odpovídá 25 000 kN. Jmenovitá síla nebude překročena a použití daného lisu je vhodné.

4. Operace

Výsledná protlačovací síla pro čtvrtou operaci $F_4 = 371,7\text{ kN}$.

Pro tuto operaci je zvolen lis od společnosti Eitel o síle 400 tun, což v přepočtu odpovídá 4 000 kN. Jmenovitá síla nebude překročena a použití daného lisu je vhodné.



Obr. 80 Vybraný lis pro 3. operaci



Obr. 81 Vybraný lis pro 4. operaci

6 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ [19], [31], [42]

Výše v této práci byly nastíněny některé možné způsoby výroby drážkového náboje, jež nebyly příliš vhodné z hlediska hospodárnosti a ekonomického uvážení. Součást je vyrobena technologií objemového tváření za studena, jenž je proti ostatním způsobům nejproduktivnější a zároveň přidává součásti hodnotu v podobě zlepšení mechanických vlastností. Ovšem ve srovnání například s technologií třískového obrábění jsou náklady (mimo položku za materiál) na výrobu protlačováním mnohem vyšší. Pořizovací cena tvářecích zařízení často překonává i v násobcích cenu obráběcích center. Taktéž výdaje na výrobu nástrojů či celých nástrojových sestav pro protlačování jsou ve srovnání například se soustružnickými noži či frézami značné, ovšem zároveň dosahují výrazně vyšší životnosti a nižšího opotřebení. Na základě vysoké produktivity a materiálové hospodárnosti technologie protlačování se však tyto náklady snižují úměrně s počtem vyráběných kusů. Hlavním faktorem, zda se z ekonomického hlediska protlačování vyplatí, je tudíž sériovost výroby daného produktu.

Základní a nezbytnou součástí každého výrobního procesu jsou z hlediska jeho provozu náklady na jednotlivé části tohoto procesu. Ekonomické zhodnocení je zaměřeno na stanovení přibližné konečné ceny výroby daného drážkového náboje zvolenou technologií. Cílem je stanovit bod zlomu (Break-Even Point), který určuje takový objem produkce, při kterém se celkové náklady vyrovnají s celkovými zisky. V tomto bodě dochází ke zvratu a je určen okamžik, kdy výrobní série mění svůj status ze ztrátové na ziskovou, tedy začíná tvořit zisk.

Obchodní přírážka byla stanovena na 40 %, nicméně konečný výsledek je pouze orientační, protože při výpočtech nejsou brány v potaz všechny reálné vstupy jako například režie, v nichž jsou zahrnuty náklady na osvětlení, vytápění, amortizaci, řízení a správu podniku, náklady na údržbu a úklid prostor.

Nejdříve je proveden výpočet přímých nákladů, jež zahrnuje výdaje za materiál, tepelné zpracování a povrchové úpravy dílců, mzdy a energie.

▪ Stanovení nákladů za materiál:

Polotovarem pro výrobu součásti byla zvolena kalota o průměru 120 mm a výšce 41,5 mm. Tyčové polotovary jsou expedovány do závodu v délkách 6 m, pro upnutí tyče při řezání je nutná délka 80 mm. Tyčové polotovary jsou děleny na kaloty pomocí kotoučové pily, jejíž řezný kotouč má šířku 2 mm.

- Hmotnost jedné tyče:

$$\begin{aligned} m_{tyč} &= \rho \cdot V_{tyč} \\ &= \rho \cdot \frac{\pi \cdot D_0^2}{4 \cdot 10^9} \cdot L_{tyč} = 7850 \cdot \frac{\pi \cdot 120^2}{4 \cdot 10^9} \cdot 6000 = 532,688 \text{ kg} \end{aligned} \quad (6.1)$$

kde:

$m_{tyč}$ [kg] – hmotnost jedné tyče
 ρ [kg.m⁻³] – měrná hmotnost oceli
 $V_{tyč}$ [m³] – objem tyče
 D_0 [mm] – průměr polotovaru
 $L_{tyč}$ [mm] – délka tyče

- Cena jedné tyče:

Cena tyčového polotovaru Ø120x6000 z oceli S355J0 je v současnosti 600€/tuna. Při úvaze současného kurzu měn je cena jedné tyče 8 502 Kč.

- Počet přířezů z jedné tyče:

$$n_p = \frac{L_{tyč} - L_{nt}}{h_0 + š_k} = \frac{6000 - 80}{41,5 + 2} = 136,091 \rightarrow 136 \text{ ks} \quad (6.2)$$

kde:

n_p [ks] – počet přířezů z jedné tyče

L_{nt} [mm] – délka nevyužitého konce tyče

h_0 [mm] – výška vstupního polotovaru (kaloty)

$š_k$ [mm] – šířka řezného kotouče

Z jedné tyče daných rozměrů se dělením získá 136 přířezů.

- Počet tyčí pro výrobu plánované série:

$$n_t = \frac{n_r}{n_p} = \frac{20\,000}{136} = 147 \text{ ks} \quad (6.3)$$

kde:

n_r [ks] – velikost výrobní série za rok

n_t [ks] – celkový počet tyčí

Pro zajištění výroby požadované série je zapotřebí 147 tyčových polotovarů.

- Hmotnost tyčových polotovarů pro celou sérii:

$$m_{tp} = m_{tyč} \cdot n_t = 532,688 \cdot 147 = 78\,305 \text{ kg} \quad (6.4)$$

kde:

m_{tp} [kg] – hmotnost všech tyčových polotovarů pro výrobu série

- Cena materiálu na jeden kus výrobku:

$$C_{ks} = \frac{C_{tyč}}{n_p} = \frac{8\,502}{136} = 62,5 \text{ Kč/ks} \quad (6.5)$$

kde:

C_{ks} [Kč/ks] – cena materiálu jednoho výrobku

$C_{tyč}$ [Kč/ks] – cena jedné tyče

Přímé náklady na materiál roční série:

$$PN_{mat} = C_{ks} \cdot n_r = 62,5 \cdot 20\,000 = 1\,250\,000 \text{ Kč} \quad (6.6)$$

kde:

PN_{mat} [Kč] – přímé náklady na materiál

▪ **Stanovení nákladů za rekrytalizační žihání:**

- výpočet celkové hmotnosti polotovarů po 2. operaci (prostřižení dna)

$$m_{tp2} = m_{PRSTENEC} \cdot n_r = 3,38 \cdot 20\,000 = 67\,600 \text{ kg} \quad (6.7)$$

kde:

m_{tp2} [kg] – hmotnost polotovarů po 2. operaci

$m_{PRSTENEC}$ [kg] – hmotnost jednoho dílce po prostřižení dna

- počet hodin v průběžné peci:

$$n_{hod} = \frac{m_{tp2}}{P_{pec}} = \frac{67\,600}{1\,750} = 39 \text{ hodin} \quad (6.8)$$

kde:

n_{hod} [hod] – počet hodin v peci

P_{pec} [kg/hod] – kapacita pece; $P_{pec} = 1\,750$ kg/hod

- náklady na rekrytalizaci:

$$N_{rek} = N_{PR} \cdot n_{hod} = 2\,600 \cdot 39 = 101\,400 \text{ Kč} \quad (6.9)$$

kde:

N_{rek} [Kč] – náklady na rekrytalizační žihání

N_{PR} [Kč/hod] – náklady na provoz; $N_{PR} = 2\,600$ Kč/hod

▪ **Stanovení nákladů za povrchové úpravy:**

- před 1. operací

$$n_{k1} = \frac{m_{tp}}{k} = \frac{73\,600}{900} = 82 \text{ ks} \quad (6.10)$$

kde:

n_{k1} [ks] – počet košů při povrchové úpravě před první operací

k [kg] – nosnost jednoho koše; $k = 900$ kg

$$N_{PÚ1} = N_{koš} \cdot n_{k1} = 1\,040 \cdot 82 = 85\,280 \text{ Kč} \quad (6.11)$$

kde:

$N_{PÚ1}$ [Kč] – náklady na povrchovou úpravu celé série před 1. operací

$N_{koš}$ [Kč] – náklady na jeden koš; $N_{koš} = 1\,040$ Kč

- po 2. operaci (po 3. operaci stejné)

$$n_{k2} = \frac{m_{tp2}}{k} = \frac{67\,600}{900} = 76 \text{ ks}$$

kde:

n_{k2} [ks] – počet košů při povrchové úpravě po druhé operaci

$$N_{PÚ2} = N_{PÚ3} = N_{koš} \cdot n_{k2} = 1\,040 \cdot 76 = 79\,040 \text{ Kč}$$

kde:

$N_{PÚ2}$ [Kč] – náklady na povrchovou úpravu po 2. operaci

$N_{PÚ3}$ [Kč] – náklady na povrchovou úpravu po 3. operaci

Celkové náklady na povrchovou úpravu série:

$$N_{PÚ} = N_{PÚ1} + N_{PÚ2} + N_{PÚ3} = 85\,280 + 79\,040 + 79\,040 = 243\,360 \text{ Kč}$$

▪ **Stanovení návratnosti z odprodeje nevyužitého materiálu a odpadu:**

- Hmotnost kovového odpadu

$$\begin{aligned} m_{odpad} &= m_{tp} - (m_{POLOTOVAR} \cdot n_r) + (V_{DNO} \cdot \rho \cdot n_r) \\ &= 78\,305 - (3,68 \cdot 20\,000) + (38\,008 \cdot 7\,850 \cdot 10^{-9} \cdot 20\,000) \\ &= 10\,672 \text{ kg} \end{aligned} \quad (6.12)$$

kde:

m_{odpad} [kg] – hmotnost kovového odpadu

- Částka za vrácení kovového odpadu:

$$C_{odpad} = m_{odpad} \cdot C_{kg} = 10\,472 \cdot 3 = \mathbf{32\,016 \text{ Kč}} \quad (6.13)$$

kde:

C_{odpad} [Kč] – obdržená částka za vrácený kovový odpad

C_{kg} [Kč/kg] – cena za 1 kg vratného železného kovu nad 6 mm

▪ **Stanovení nákladů na mzdy:**

Do výrobních časů jednoho kusu nejsou započítány doby přípravy materiálu, doby manipulace a transportu mezi jednotlivými stroji, doby prostojů, přerušení výroby, přestávky obsluhy, montáž a demontáž nástrojů. Jedná se pouze o čistý výrobní čas.

1. Operace

- Počet zdvihů stroje: $n_{zdvih} = 6,9 \text{ min}^{-1}$
- Výrobní čas jednoho kusu:

$$t_{ks1} = \frac{60}{n_{zdvih}} = \frac{60}{6,9} = 8,7 \text{ s} = 2,42 \cdot 10^{-3} \text{ Nh} \quad (6.14)$$

kde:

t_{ks} [Nh] – výrobní čas jednoho kusu

- Přímé náklady na mzdy:

$$PN_{mzdy1} = t_{ks} \cdot n_r \cdot M_t = 0,00242 \cdot 20\,000 \cdot 230 = 11\,132 \text{ Kč} \quad (6.15)$$

kde:

PN_{mzdy} [Kč] – přímé náklady na mzdy

M_t [Kč/h] – hodinová mzda operátora lisu; hodinová sazba superhrubé

mzdy současné průměrné výše platu operátora výrobního zařízení

2. Operace

- počet zdvihů stroje: $n_{zdvih} = 5,2 \text{ min}^{-1}$
- Výrobní čas jednoho kusu:

$$t_{ks2} = \frac{60}{n_{zdvih}} = \frac{60}{5,2} = 11,5 \text{ s} = 3,22 \cdot 10^{-3} \text{ Nh}$$

- Přímé náklady na mzdy:

$$PN_{mzdy2} = t_{ks} \cdot n_r \cdot M_t = 0,00322 \cdot 20\,000 \cdot 230 = 14\,812 \text{ Kč}$$

3. Operace

- počet zdvihů stroje: $n_{zdvih} = 2,6 \text{ min}^{-1}$
- Výrobní čas jednoho kusu:
$$t_{ks3} = \frac{60}{n_{zdvih}} = \frac{60}{2,6} = 23,1 \text{ s} = 6,42 \cdot 10^{-3} \text{ Nh}$$
- Přímé náklady na mzdy:
$$PN_{mzdy3} = t_{ks} \cdot n_r \cdot M_t = 0,00642 \cdot 20\,000 \cdot 230 = 29\,532 \text{ Kč}$$

4. Operace

- počet zdvihů stroje: $n_{zdvih} = 3 \text{ min}^{-1}$
- Výrobní čas jednoho kusu:
$$t_{ks4} = \frac{60}{n_{zdvih}} = \frac{60}{3} = 20 \text{ s} = 5,56 \cdot 10^{-3} \text{ Nh}$$
- Přímé náklady na mzdy:
$$PN_{mzdy4} = t_{ks} \cdot n_r \cdot M_t = 0,00556 \cdot 20\,000 \cdot 230 = 25\,576 \text{ Kč}$$

Celý výrobní proces: $PN_{mzdy} = \sum PN_{mzdy_i} = \mathbf{81\,052 \text{ Kč}}$

▪ Stanovení nákladů na energii:

Hodnota využití stroje je zvolena s ohledem na hrubou kalkulaci poměru skutečného počtu kusů za směnu a teoretického počtu kusů za směnu, jenž počítá s výrobou po celou dobu směny bez přerušení. Zvolená hodnota využití stroje zohledňuje započtení přípravného času a půlhodinové přestávky během směny.

- 1. Operace
 - příkon stroje $P_1 = 210 \text{ kW}$; stroj se na této hodnotě příkonu pohybuje průměrně po dobu cca 0,25 doby jednoho celého pracovního cyklu při hlavním záběru nástroje při přetváření kovu
 - současná cena energie ve firmě $2,30 \text{ Kč/kWh}$

$$PN_{EN1} = P_1 \cdot \eta \cdot t_{ks1} \cdot C_e \cdot n_r \quad (6.16)$$
$$= 210 \cdot 0,25 \cdot 0,85 \cdot 2,42 \cdot 10^{-3} \cdot 2,30 \cdot 20\,000 = 4\,967 \text{ Kč}$$

kde:

PN_{EN} [Kč] – přímé náklady na energii v první operaci
 P [kW] – příkon stroje
 η [-] – využití stroje; $\eta = 0,85$
 C_e [Kč/kWh] – cena energií

- 2. Operace
 - příkon stroje $P_2 = 60 \text{ kW}$

$$PN_{EN2} = P_2 \cdot \eta \cdot t_{ks2} \cdot C_e \cdot n_r = 60 \cdot 0,25 \cdot 0,85 \cdot 3,22 \cdot 10^{-3} \cdot 2,30 \cdot 20\,000 = 1\,889 \text{ Kč}$$

- 3. Operace
 - příkon stroje $P_3 = 500 \text{ kW}$

$$PN_{EN3} = P_3 \cdot \eta \cdot t_{ks3} \cdot C_e \cdot n_r = 500 \cdot 0,25 \cdot 0,85 \cdot 6,42 \cdot 10^{-3} \cdot 2,3 \cdot 20\,000 = 31\,378 \text{ Kč}$$

- 4. Operace

- příkon stroje $P_4 = 150 \text{ kW}$

$$PN_{EN4} = P_4 \cdot \eta \cdot t_{ks4} \cdot C_e \cdot n_r = 150 \cdot 0,25 \cdot 0,85 \cdot 5,56 \cdot 10^{-3} \cdot 2,30 \cdot 20\,000 = 8\,152 \text{ Kč}$$

Energetické náklady na celý výrobní proces:

$$PN_{EN} = \sum PN_{ENi} = 4\,967 + 1\,889 + 31\,378 + 8\,152 = \mathbf{46\,386 \text{ Kč}}$$

- **Výpočet celkových přímých nákladů:**

$$PN_{CELK} = PN_{mat} + N_{rek} + N_{PÚ} + PN_{mzdy} + PN_{EN} - C_{odpad} \quad (6.17)$$

$$PN_{CELK} = 1\,250\,000 + 101\,400 + 243\,360 + 81\,052 + 46\,386 - 32\,016$$

$$PN_{CELK} = \mathbf{1\,690\,182 \text{ Kč}}$$

kde:

PN_{celk} [Kč] – celkové přímé náklady

Dále je proveden přibližný výpočet fixních nákladů.

Náklady na tvářecí nástroje

Výpočty a stanovení fixních nákladů jsou řešeny pouze ilustrativně, protože jejich přesné určení je závislé na interních informacích a postupech dané firmy. Na základě velikosti součástí a znalosti deformačních odporů a potřebných tvářecích sil lze s ohledem na podobnost k jiným stávajícím výrobkům přibližně stanovit cenový interval, ve kterém se bude cena nástrojů pohybovat. Tento interval je pro daný dílec v rozmezí od 6 000 € do 8 000 € na nástrojovou sestavu pro jednu operaci, v případě že jsou nástroje vyráběny externě. Nástrojové sestavy se skládají z mnoha různých dílů z různých materiálů a s různým tepelným zpracováním, což vede i k rozdílné životnosti jednotlivých částí. Ze zkušenosti nástrojárny a s ohledem na charakter dané technologie tváření za studena, velikost a vlastnosti součástí je zvolena průměrná hodnota životnosti sestav 80 % požadované výrobní série. Některé nástroje by měly vydržet po dobu výroby celé série, jiné jsou předpokládány k výměně v průběhu série.

- **Stanovení fixních nákladů:**

$$N_{FIX} = \frac{N_{NS} \cdot n_{op} \cdot n_r}{n_{žvt}} = \frac{186\,900 \cdot 4 \cdot 20\,000}{16\,000} = 934\,500 \text{ Kč} \quad (6.18)$$

kde:

N_{FIX} [Kč] – fixní náklady na výrobní sérii

N_{NS} [Kč] – cena nástrojové sestavy

n_{op} [-] – počet operací výrobního postupu

$n_{žvt}$ [ks] – předpokládaná průměrná životnost nástrojové sestavy

- **Výpočet celkových nákladů na výrobní sérii:**

$$N_{CELK} = PN_{CELK} + N_{FIX} = 1\,690\,182 + 934\,500 = \mathbf{2\,624\,682 \text{ Kč}} \quad (6.19)$$

kde:

N_{CELK} [Kč] – celkové náklady na výrobu drážkového náboje

- Výpočet celkových nákladů na výrobu jednoho drážkového náboje:

$$N_{NÁBOJ} = \frac{N_{CELK}}{n_r} = \frac{2\,624\,682}{20\,000} = 131 \text{ Kč} \quad (6.20)$$

kde:

$N_{NÁBOJ}$ [-] – náklady na výrobu jednoho drážkového náboje

- Cena prodeje jednoho výrobku při marži 40 %:

$$C_{prodej} = N_{NÁBOJ} \cdot 1,4 = 131 \cdot 1,4 \cong 184 \text{ Kč} \quad (6.21)$$

kde:

C_{prodej} [Kč] – cena prodeje drážkového náboje při dané marži

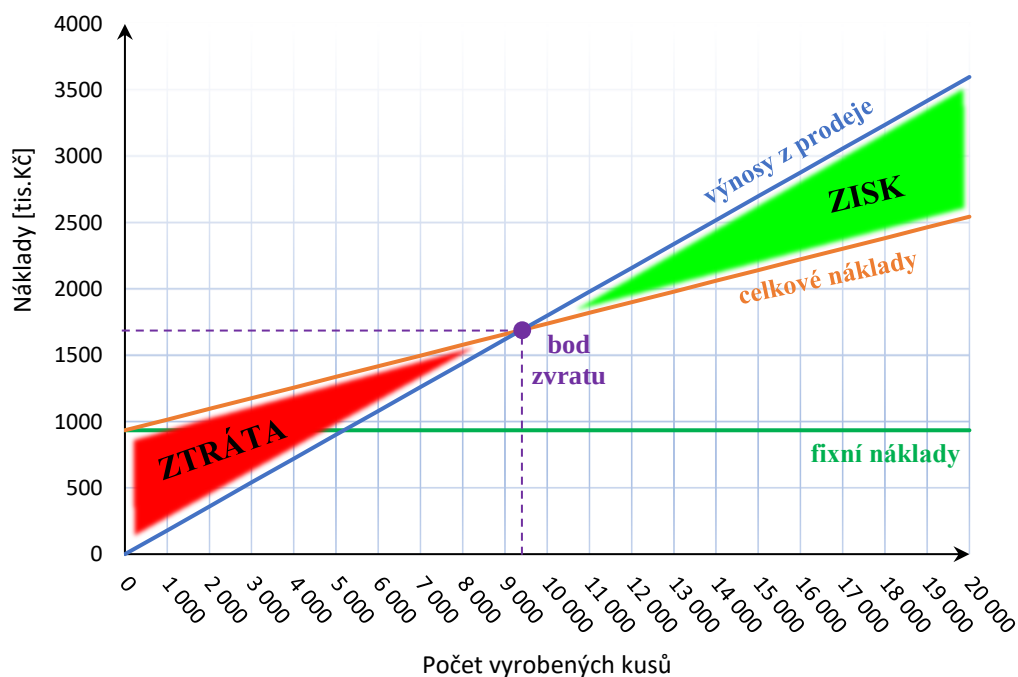
- Stanovení bodu zvratu (Break-Even Point):

$$B_{zvrát} = \frac{N_{FIX}}{C_{prodej} - \frac{PN_{CELK}}{n_r}} = \frac{934\,500}{184 - \frac{1\,690\,182}{20\,000}} = 9\,393 \text{ ks} \quad (6.22)$$

kde:

$B_{zvrát}$ [ks] – bod zvratu

S ohledem na určení bodu zlomu lze předpokládat, že při stanovení marže 40 % začne být výrobní série při počtu 9 393 kusů zisková a dále tvoří zisk.



Obr. 82 Zobrazení bodu zvratu výrobní série

Na závěr této kapitoly je ještě provedeno hrubé srovnání nákladů na výrobu daného výrobku protlačováním s technologií třískového obrábění, které bylo nastíněno v rozboru zadání. Z celkových nákladů je proveden pouze výpočet přímých nákladů na materiál, jež ukazuje významnou ne hospodárnost obrábění při uvažování výroby konkrétní zadané součásti. Pro dosažení požadovaných rozměrů je uvažován tyčový polotovár normovaného průměru 125 mm o délce 6 m, z něhož jsou dělením získány přířezy o délce 200 mm, pro upnutí tyče při řezání je rovněž nutná délka 80 mm.

Přímé náklady na materiál při obrábění zadaného dílce:

- Hmotnost jedné tyče:

$$m_{tyč} = \rho \cdot V_{tyč} = \rho \cdot \frac{\pi \cdot D_0^2}{4 \cdot 10^9} \cdot L_{tyč} = 7850 \cdot \frac{\pi \cdot 125^2}{4 \cdot 10^9} \cdot 6000 = 578 \text{ kg}$$

- Cena jedné tyče:

Cena tyčového polotovaru Ø125x6000 z oceli S355J0 je v současnosti 630 €/tuna. Při úvaze současného kurzu měn je cena jedné tyče 9 686 Kč.

- Počet přířezů z jedné tyče:

$$n_p = \frac{L_{tyč} - L_{nt}}{h_0 + š_k} = \frac{6000 - 80}{200 + 2} = 29,306 \rightarrow 29 \text{ ks}$$

Z jedné tyče daných rozměrů se dělením získá 29 přířezů.

- Cena materiálu na jeden kus výrobku:

$$C_{ks} = \frac{C_{tyč}}{n_p} = \frac{9\,686}{29} = 334 \text{ Kč/ks}$$

Přímé náklady na materiál roční série:

$$PN_{mat} = C_{ks} \cdot n_r = 334 \cdot 20\,000 = \mathbf{6\,680\,000 \text{ Kč}}$$

PROTLAČOVÁNÍ	OBRÁBĚNÍ
celkové náklady na výrobu roční série:	náklady na materiál pro výrobu roční série:
2 545 642 Kč	6 680 000 Kč

Jak je patrné, ačkoliv jsou náklady na provoz, pořizovací ceny nástrojů a strojů pro technologii obrábění nižší, již při výpočtu množství požadovaného materiálu na výrobu celé série překročily náklady na obrábění více než 2,5krát celkové náklady na výrobu protlačováním. Jelikož pro dosažení požadovaných vlastností výrobku by muselo být dále zařazeno tepelné zpracování a zušlechťování, čímž by výrobní náklady opět rostly, není nutno dále spekulovat o faktu, že objemové tváření za studena je pro zhotovení daného produktu nejvhodnějším způsobem.

7 ZÁVĚRY

V rámci diplomové práce byl zhotoven návrh výroby drážkového náboje využívaného v automobilovém průmyslu. Požadovaná velikost roční výrobní série je 20 000 kusů. Vzhledem k tvaru součásti a základním požadavkům byla součást určena k výrobě objemovým tvářením za studena, konkrétně byly pro její zhotovení stanoveny základní způsoby technologie protlačování.

Z hlediska výrobního portfolia společnosti se jednalo o nový produkt, jenž je podobný již stávajícím výrobkům výrobního programu. Konstrukce a geometrie dílce byla dána od zákazníka, stejně jako požadavky na výrobu, které je nutno splnit. Mezi nejdůležitější patří stanovená pevnost součásti v oblasti hlavy a ozubeného dříku, zajištění pomocné měřicí kružnice pro kontrolu kvality a rozměrů, použití vhodného materiálu umožňujícího výrobu kvalitního produktu se zajištěním jeho využití.

Pro výrobu drážkového náboje byly navrženy tři varianty výroby, přičemž byl vybrán nejoptimálnější způsob výroby vzhledem k možnostem strojního vybavení společnosti a základním ekonomickým požadavkům na výrobu součásti. Vybraným materiálem splňujícím náročné požadavky na zadaný dílec byla zvolena ocel S355J0, jíž odpovídá český ekvivalent ocel ČSN 11 523. Drážkový náboj byl zhotoven v průběhu čtyř operací, mezi něž je z důvodu zpevnění v první operaci umístěno rekrystalizační žíhání pro obnovení plasticity. Tyto operace byly provedeny na vybraných konvenčních jednooperačních lisech, jež jsou součástí strojního parku závodu a umožňují výrobu zadané součásti. Pro tento návrh byly zpracovány základní technologické a kontrolní výpočty, z nichž vychází rozměry vstupního polotovaru do první operace a taktéž tvářecí síly, dle kterých proběhla volba optimálního výrobního zařízení pro každou operaci.

Pro všechny výrobní operace byly provedeny návrhy parametrů a kontrolní výpočty funkčních nástrojů včetně stanovení rozměrů a počtu potřebných objímek a materiálů jednotlivých částí nástrojových sestav, k nimž byla vyhotovena přiložená výkresová dokumentace.

K vytvořenému návrhu výroby bylo v závěru práce vyhotoveno technicko-ekonomické zhodnocení, jehož obsahem je přibližné stanovení nákladů a konečné ceny výroby drážkového náboje. V rámci těchto výpočtů nebyly brány v potaz režie, jež zahrnují náklady na osvětlení, vytápění, amortizaci, řízení a správu podniku, náklady na údržbu a úklid prostor. Byl proveden výpočet přímých nákladů obsahující výdaje za materiál, tepelné zpracování a povrchové úpravy dílců, mzdy a energie. Následně byly stanoveny fixní náklady na výrobní sérii a celkové náklady, z nichž byla určena konečná cena výroby jednoho kusu na 131 Kč, při započítání obchodní přírážky ve výši 40 % je prodejní cena jednoho drážkového náboje 184 Kč. Dále byl určen bod zvratu, z něhož vyplývá, že při zhotovení počtu 9 393 kusů dojde ke zlomu a výroba dalších kusů série začíná generovat zisk. Na závěr této kapitoly bylo provedeno zevrubné srovnání nákladů na materiál při výrobě zadané součásti třískovým obráběním s celkovými náklady na výrobu protlačováním. Z tohoto je patrné, že i přes vysoké náklady na nástroje a provoz technologie protlačování se jedná o vhodnější řešení výroby zadaného dílce.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. FOREJT, Milan. *Teorie tváření*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 167 s. ISBN 8021427647.
2. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
3. Metal Forming: Product Portfolio. In: *American Axle & Manufacturing* [online]. Detroit [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: <https://www.aam.com/what-we-do/our-products/metal-forming>
4. Direct extrusion products: Aluminium. In: *Gestión de Compras - industrial sourcing* [online]. [cit. 2020-07-15]. Dostupné z: https://www.gestiondecompras.com/files/products/forming_tubes_and_profiles/direct_extrusion_product_1.jpg
5. *Tvářené součásti a nástroje* [online]. [cit. 2020-07-15]. Dostupné z: <http://www.lancetools.com/portals/lance-tools/New%20Socket%20Cover%20Page.jpg>
6. Drivetrain. *Transmission and technology experts* [online]. Ontario [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: <https://www.mistertransmission.com/what-is-a-drivetrain/>
7. *Spare Parts Catalogue: Mechanics Cardan Components* [online]. [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: https://www.walterscheid-group.com/wp-content/uploads/Mechanics01_GB_0518_MW_web_Mechanics_Components_2018_v8-1.pdf
8. Spicer Compact Series Driveshaft: Overview. *Dana Incorporated* [online]. [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: <http://global.dana.com/commercial-vehicles/products/driveline/driveshafts/compact-series>
9. Drivetrain: Cardan shaft. In: *Cars - All Makes. All Models*. [online]. [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: https://www.netcarshow.com/audi/2014-rs5_tdi_concept/1280x960/wallpaper_28.htm
10. *American Axle & Manufacturing: Logo* [online]. [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: https://www.aam.com/images/default-source/logos/aam_logo.png
11. RYŠ, Přemysl, Mirko KLESNIL a Vladimír USTOHAL. *Nauka o materiálu*. Brno: VAAZ, 1965, 725 stran.
12. BAREŠ, Karel. *Lisování*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1971, 542 s. DT 621.979.
13. HOSFORD, William F. a Robert M. CADDELL. *Metal forming: mechanics and metallurgy*. 4th ed. New York: Cambridge University Press, 2011, xii, 331 s. : il. ISBN 978-1-107-00452-8.
14. MIELNIK, Edward M. *Metalworking science and Engineering*. Michael B. Bever. 1st ed. New York: McGraw-Hill, Inc., 1991. ISBN 0-07-041904-3.
15. *Fundamentals of Carbon Steel - Heat Treatment* [online]. England, 2017 [cit. 2020-08-08]. Dostupné z: <https://www.lff-group.com/posts/fundamentals-of-carbon-steel-part-2>
16. JECH, Jaroslav. *Tepelné zpracování oceli: metalografická příručka*. 4. vyd. přeprac. a dopln. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1983, 391 s.

17. ALTAN, Taylan, Gracious NGAILE a Gangshu SHEN. *Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2004. ISBN 9781615030941.
18. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013, 169 s. ISBN 9788021447479
19. BABOR, Karel, Augustin CVILINEK a Jan FIALA. *Objemové tváření ocelí*. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1967.
20. FELDMANN, Heinz D. *Protlačování ocelí*. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1962.
21. ELFMARK, Jiří, Alois FARLÍK a Jiří KOTOUČ. *Tváření kovů*. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1992. ISBN 80-030-0651-1.
22. TSCHÄTSCH, Heinz. *Metal forming practise: processes, machines, tools*. Berlin: Springer, 2006, xii, 405 s. ISBN 3540332162.
23. ČSN 22 7005: *Tvářecí nástroje. Protlačování ocelí za studena. Všeobecné požadavky na konstrukci a výpočet*. Praha: Český normalizační institut, 1992.
24. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu. II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003, 516 s. ISBN 8072042831.
25. *Loupání tyčí* [online]. 2015 [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: http://www.ilkametal.cz/sortiment/pramet/katalogy/pramet_bar%20peeling%202015_cz.pdf
26. BAY, Niels. The state of the art in cold forging lubrication. *Journal of Materials Processing Technology*. Elsevier, 1994, (46), 19-40. DOI: 10.1016/0924-0136(94)90100-7.
27. *Moření v HCl. Konstrukce - Odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství* [online]. 16.02.2015 [cit. 2020-07-14]. ISSN 1803-8433. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20170401055333/http://www.konstrukce.cz/clanek/moreni-v-hcl/>
28. NARAYANAN, Sankara. *Surface pretreatment by phosphate conversion coatings* [online]. 2005. India: Advanced Study Center Co.Ltd. [cit. 2020-07-15]. Dostupné z: http://www.ipme.ru/e-journals/RAMS/no_2905/narayanan.pdf
29. PEYCHEVA, Ralitsa. Using polymer lubricants to optimize cold forging. *Forging* [online]. 2015, 22-24 [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: <https://www.farinia.com/sites/default/files/0815FORG-polymercoat.pdf>
30. MORAVEC, Ján a Jozef BÍLIK. *Tvárníacie stroje a nástroje*. Žilina: Žilinská univerzita, 2017. Vysokoškolské učebnice. ISBN 978-80-554-1339-6.
31. FOREJT, Milan. *Oborový projekt 2* [online]. BRNO: Odbor technologie tváření kovů a plastů, 2003 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/h2p_oborovy_projekt_2_forejt.pdf
32. KOTOUČ, Jiří. *Tvářecí nástroje*. Praha: ČVUT, 1993, 349 s. ISBN 80-01-01003-1.
33. LANGE, Kurt, et al. *Handbook of metal forming*. 1st ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1985. ISBN 0-07-036285-8.

34. FREMUNT, Přemysl, Jiří KREJČÍK a Tomáš PODRÁBSKÝ. *Nástrojové oceli*. Brno: Dům techniky, 1994, 229 s.
35. HÝSEK, Rudolf. *Tvářecí stroje 1973*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1974, 588 s.
36. *Experimentální metody: Sylabus* [online]. Brno, 2003 [cit. 2020-08-10]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/he1_experimentalni_metody_cviceni_2019_forej_t_piska_humar_janicek.pdf
37. Měření kontinuální Stribeckovy křivky pomocí tribometru typu pin-on-disk. *TriboTechnika* [online]. Žilina: Techpark, o. z., 2015 [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-62015/mereni-kontinualni-stribeckovy-krivky-pomoci-tribometru-typu-pinondisk-telisko-na-disku.html>
38. 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>
39. *Karoserie automobilu: Porsche Panamera* [online]. [cit. 2020-08-08]. Dostupné z: <https://s3.amazonaws.com/excellence/images/big/7587/porsche-vw-group-platforms-5.jpg?1583431554>
40. Přehled vlastností oceli: S355JO. *Bolzano* [online]. Kladno [cit. 2020-07-15]. Dostupné z: <https://bbolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/nelegovane-konstrukcni-oceli-podle-en-10025/prehled-vlastnosti-oceli-s355jo>
41. *Řezání tyčových polotovarů* [online]. [cit. 2020-07-14]. Dostupné z: <https://www.pilart.cz/obrazky/produkty/velky/205-h-1207201216015265276.jpg>
42. PETR TYL, Jan. Bod zvratu. *Marketing Mind* [online]. České Budějovice, 26.01.2018 [cit. 2020-08-08]. Dostupné z: <https://www.marketingmind.cz/bod-zvratu-priklad-vzorec-vypocet-graf/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A	tažnost	[%]
A _j	měrná přetvárná práce	[J.mm ⁻³]
A _t	práce tvářecí síly	[J]
a	poměr krajních poloměrů	[-]
B _{zvrat}	bod zvratu	[ks]
C _e	cena energií	[Kč/kWh]
C _{kg}	cena za 1 kg vratného železného kovu nad 6 mm	[Kč/kg]
C _{ks}	cena materiálu jednoho výrobku	[Kč/ks]
C _{odpad}	obdržená částka za vrácený kovový odpad	[Kč]
C _{prodej}	cena prodeje drážkového náboje při dané marži	[Kč]
C _{tyč}	cena jedné tyče	[Kč/ks]
c	součinitel závislý na druhu stříhání	[-]
D ₀	průměr výchozího polotovaru	[mm]
D _{0p}	vnitřní průměr průtlačnice pro 1. operaci	[mm]
D ₁	průměr tvářené části průtlačku	[mm]
ΔD ₁	lisovací přesah mezi průtlačnicí a první objímkou	[mm]
D ₂	poměrný průměr první objímky	[mm]
ΔD ₂	lisovací přesah mezi první a druhou objímkou	[mm]
D ₃	poměrný průměr druhé objímky	[mm]
D _{stř}	průměr střižnice	[mm]
d _{stř}	průměr střižníku	[mm]
d _v	průměr válce	[mm]
F	tvářecí síla	[N]
F ₁	protlačovací síla v 1. operaci	[N]
F ₂	protlačovací síla v 2. operaci	[N]
F _{3D}	protlačovací síla pro dřík ve 3. operaci	[N]
F _{3H}	protlačovací síla pro hlavu ve 3. operaci	[N]
F ₄	protlačovací síla ve 4. operaci	[N]
F _j	jmenovitá síla lisu	[N]
F _p	síla pohonu	[N]
F _s	střižná síla	[N]
h	výška výlisku	[mm]
h ₀	výška vstupního polotovaru (kaloty)	[mm]
Δh	stlačení	[mm]
h _a	aktivní výška polotovaru v zaváděcí části průtlačnice	[mm]
h _D	výška dříku	[mm]
h _K	výška kužele	[mm]
h _p	výška prstencového polotovaru	[mm]
h _v	výška válce	[mm]
k	nosnost jednoho koše	[kg]
L	délka tělesa po deformaci	[mm]
L ₀	délka tělesa před deformací	[mm]
L _{nt}	délka nevyužitého konce tyče	[mm]
L _s	délka křivky stříhu	[mm]
L _{tyč}	délka tyče	[mm]
l'	výška redukčního oka	[mm]

M_t	hodinová mzda operátora lisu	[Kč/h]
m	hmotnost	[kg]
m_D	hmotnost dříku	[kg]
m_H	hmotnost válcové hlavy	[kg]
m_K	hmotnost kužele	[kg]
$m_{NÁBOJ}$	celková hmotnost náboje	[kg]
m_{odpad}	hmotnost kovového odpadu	[kg]
$m_{POLOTOVAR}$	hmotnost výchozího polotovaru	[kg]
$m_{PRSTENEC}$	hmotnost jednoho dílce po prostřižení dna	[kg]
m_{tp}	hmotnost všech tyčových polotovarů pro výrobu série	[kg]
m_{tp2}	hmotnost polotovarů po 2. operaci	[kg]
$m_{tyč}$	hmotnost jedné tyče	[kg]
N_{CELK}	celkové náklady na výrobu drážkového náboje	[Kč]
N_{FIX}	fixní náklady na výrobní sérii	[Kč]
$N_{koš}$	náklady na jeden koš	[Kč]
$N_{NÁBOJ}$	náklady na výrobu jednoho drážkového náboje	[-]
N_{NS}	cena nástrojové sestavy	[Kč]
N_{PR}	náklady na provoz	[Kč/hod]
$N_{PÚ1}$	náklady na povrchovou úpravu celé série před 1. operací	[Kč]
$N_{PÚ2}$	náklady na povrchovou úpravu po 2. operaci	[Kč]
$N_{PÚ3}$	náklady na povrchovou úpravu po 3. operaci	[Kč]
N_{rek}	náklady na rekrytalizační žhání	[Kč]
n	koefficient zahrnující vliv vnějších podmínek při stříhání	[-]
n_{hod}	počet hodin v peci	[hod]
n_{k1}	počet košů při povrchové úpravě před 1. operací	[ks]
n_{k2}	počet košů při povrchové úpravě po 2. operaci	[ks]
n_{op}	počet operací výrobního postupu	[-]
n_p	počet přířezů z jedné tyče	[ks]
n_r	velikost výrobní série za rok	[ks]
n_t	celkový počet tyčí	[ks]
n_{zdvih}	počet zdvihů stroje	[min ⁻¹]
$n_{žvt}$	předpokládaná průměrná životnost nástrojové sestavy	[ks]
P_1	příkon stroje pro 1. operaci	[kW]
P_2	příkon stroje pro 2. operaci	[kW]
P_3	příkon stroje pro 3. operaci	[kW]
P_4	příkon stroje pro 4. operaci	[kW]
PN_{celk}	celkové přímé náklady	[Kč]
PN_{EN}	přímé náklady na energii	[Kč]
PN_{mat}	přímé náklady na materiál	[Kč]
PN_{mzdy}	přímé náklady na mzdy	[Kč]
PN_{mzdy1}	přímé náklady na mzdy v 1. operaci	[Kč]
PN_{mzdy2}	přímé náklady na mzdy ve 2. operaci	[Kč]
PN_{mzdy3}	přímé náklady na mzdy ve 3. operaci	[Kč]
PN_{mzdy4}	přímé náklady na mzdy ve 4. operaci	[Kč]
P_{pec}	kapacita pece	[kg/hod]
p	doporučené zatížení průtlačnic	[MPa]
p_1	vnitřní tlak na funkční plochu průtlačnice	[MPa]
R	poloměr spodní podstavy kužele	[mm]
R_e	mez kluzu tvářeného materiálu	[MPa]

R _m	mez pevnosti tvářeného materiálu	[MPa]
r	poloměr horní podstavy kužele	[mm]
S	průřez činné části nástroje	[mm ²]
S ₀	plocha průřezu výchozího polotovaru	[mm ²]
S ₁	plocha průřezu průtlačníku	[mm ²]
S _{0,1}	plocha vstupního průřezu polotovaru před 1. operací	[mm ²]
S _{1,1}	plocha průřezu průtlačníku pro 1. operaci	[mm ²]
S _{0,3}	plocha vstupního průřezu prstence před 3. operací	[mm ²]
S _{1,3}	plocha výstupního průřezu hlavy po 3. operaci	[mm ²]
S _{2,3}	plocha výstupního průřezu dříku po 3. operaci	[mm ²]
S _{0,4}	plocha vstupního průřezu dříku před 4. operací	[mm ²]
S _{1,4}	plocha výstupního průřezu dříku s drážkami po 4. operaci	[mm ²]
S _{drážky}	součet ploch průřezů drážek	[mm ²]
S _{dřík bez drážek}	plocha průřezu dříku bez drážek	[mm ²]
S _{stř}	střižná plocha	[mm]
s	tloušťka materiálu	[mm]
š _k	šířka rezného kotouče	[mm]
t _{ks}	výrobní čas jednoho kusu	[Nh]
t _{ks1}	výrobní čas jednoho kusu v 1. operaci	[Nh]
t _{ks2}	výrobní čas jednoho kusu v 2. operaci	[Nh]
t _{ks3}	výrobní čas jednoho kusu v 3. operaci	[Nh]
t _{ks4}	výrobní čas jednoho kusu v 4. operaci	[Nh]
V	objem výlisku	[m ³]
V _D	objem válcového dříku	[m ³]
V _{DNO}	objem odpadu	[m ³]
V _{Dp}	pracovní hodnota objemu dříku	[m ³]
V _{DRÁŽKY}	objem drážek	[m ³]
V _H	objem válcové hlavy	[m ³]
V _K	celkový objem kužele	[m ³]
V _{KUŽEL}	objem kužele	[m ³]
V _{K1}	objem vnějšího kužele	[m ³]
V _{K2}	objem vnitřního kužele	[m ³]
V _{KALÍŠEK}	objem polotovaru po prostřížení dna	[m ³]
V _{NÁBOJ}	celkový objem náboje	[m ³]
V _P	objem prstence	[m ³]
V _{POLOTOVAR}	objem výchozího polotovaru	[m ³]
V _{tyč}	objem tyče	[m ³]
V _{VÁLEC}	objem válce	[m ³]
v	střižná vůle	[mm]
Z	zdvih	[mm]
α	redukční úhel	[rad]
ε	poměrné přetvoření	[-]
ε _C	celková poměrná deformace	[%]
ε _{el}	elastická složka poměrné deformace	[%]
ε _{pl}	plastická složka poměrné deformace	[%]
ε ₁	stupeň přetvoření v 1. operaci	[%]
ε _{3H}	stupeň přetvoření hlavy ve 3. operaci	[%]

ε_{3D}	stupeň přetvoření dříku ve 3. operaci	[%]
ε_4	stupeň přetvoření ve 4. operaci	[%]
η	využití stroje	[-]
μ_R	koeficient tření v redukční části průtlačnice	[-]
μ_Z	koeficient tření v zaváděcí části průtlačnice	[-]
ϱ	měrná hmotnost oceli	[kg.m ⁻³]
σ_d	deformační odpor	[MPa]
σ_{d1}	deformační odpor v 1. operaci	[MPa]
σ_{d3D}	deformační odpor dříku ve 3. operaci	[MPa]
σ_{d3H}	deformační odpor hlavy ve 3. operaci	[MPa]
σ_{d4}	deformační odpor ve 4. operaci	[MPa]
σ_p	celkový přirozený přetvárný odpor	[MPa]
σ_{ps}	střední přirozený deformační odpor	[MPa]
σ_{pD}	přirozený def. odpor pro přetvoření dříku ve 3. operaci	[MPa]
σ_{pH}	přirozený def. odpor pro přetvoření hlavy ve 3. operaci	[MPa]
σ_{p1}	přirozený def. odpor 1. operaci	[MPa]
σ_{p4}	přirozený def. odpor pro 4. operaci	[MPa]
σ_r	radiální napětí v průtlačnici	[MPa]
τ_s	pevnost materiálu ve střihu	[MPa]
φ	logaritmické přetvoření	[-]
φ_1	logaritmické přetvoření v 1. operaci	[-]
φ_{3D}	logaritmické přetvoření dříku ve 3. operaci	[-]
φ_{3H}	logaritmické přetvoření hlavy ve 3. operaci	[-]
φ_4	logaritmické přetvoření ve 4. operaci	[-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Typické produkty protlačování [3]	10
Obr. 2 Složité tvary výrobků zhotovené protlačováním hliníku [4]	10
Obr. 3 Rozmanité druhy výrobků technologie protlačování [5]	10
Obr. 4 Drážkový náboj [3]	11
Obr. 5 Sestavení kardanového hřídele [7]	11
Obr. 6 Schéma a model kardanové hřídele [8]	11
Obr. 7 Umístění kardanu v osobním automobilu [9]	11
Obr. 8 Schéma a rozměry součásti	12
Obr. 9 Logo firmy [10]	13
Obr. 10 Schematické znázornění skluzu [12]	15
Obr. 11 Změna mechanických vlastností v důsledku tváření za studena [1]	15
Obr. 12 Změna mikrostruktury v důsledku tváření za studena [15]	16
Obr. 13 Schematické znázornění průběhu odpevňovacích procesů [15]	17
Obr. 14 Závislost průběhu tvářecí síly na pracovní dráze při protlačování [19]	19
Obr. 15 Polotovár pro pastorek do převodovky automobilu	22
Obr. 16 Srovnání využití materiálu vstupního polotovaru	22
Obr. 17 Příklady tvaru výrobků protlačováním [19]	23
Obr. 18 Příklady tvaru výrobků protlačování [19]	23
Obr. 19 Příklady tvaru výrobků protlačováním [19]	24
Obr. 20 Řešení eliminace ostrých rohů a hran [19]	24
Obr. 21 Kuželové plocha nahrazena odstupňováním [19]	24
Obr. 22 Řešení technologičnosti součásti [19]	25
Obr. 23 Vlevo struktura feriticko-perlitická, vpravo s globulárním perlitem	27
Obr. 24 Faktory ovlivňující životnost nástrojů [17]	31
Obr. 25 Průtlačník pro dopředné protlačování dutých součástí	32
Obr. 26 Průtlačnice pro zpětné protlačování	32
Obr. 27 Vyhazovač a sestava tlakových desek	33
Obr. 28 Armovaná průtlačnice objímkami [30]	34
Obr. 29 Průtlačnice s bandážemi [29]	34
Obr. 30 Princip dopředného protlačování	38
Obr. 31 Průtlačnice pro dopředné protlačování [2]	38
Obr. 32 Průtlačník pro dopředné protlačování tyčí [23]	39
Obr. 33 Průtlačník pro dopředné protlačování dutých součástí [23]	40
Obr. 34 Parametry protlačku [23]	40
Obr. 35 Princip technologie zpětného protlačování	41
Obr. 36 Průtlačnice pro zpětné protlačování [2]	42
Obr. 37 Druhy průtlačníků dle tvaru čela [19]	42
Obr. 38 Vliv tvaru čela průtlačníku na deformační odpor [2]	43
Obr. 39 Průtlačník pro zpětné protlačování	43
Obr. 40 Schéma průtlačníku pro zpětné protlačování [23]	43
Obr. 41 Parametry protlačku [23]	44
Obr. 42 Možnosti a tvary výrobků technologie kombinovaného protlačování	44
Obr. 43 Defekty výrobků zhotovených protlačováním	45
Obr. 44 Odštěpené části a praskliny nástrojů	46
Obr. 45 Destrukce průtlačníku pro dopředné protlačování dutých těles	46
Obr. 46 Znázornění mazacích režimů pomocí Stribeckovy křivky [17]	47
Obr. 47 Vznik vrstev maziva při mýdlování [17]	48
Obr. 48 Karoserie automobilu zhotovená technologiemi plošného tváření [39]	49
Obr. 49 Princip technologie stříhání	49

Obr. 50 Zadaný dílec	50
Obr. 51 První výrobní fáze	50
Obr. 52 Druhá výrobní fáze	51
Obr. 53 Výrobní postup druhé varianty	51
Obr. 54 Výrobní postup třetí varianty	51
Obr. 55 Feriticko-perlitická struktura vzorku z tyče oceli 11 523	53
Obr. 56 Schematické rozdělení tělesa pro výpočet objemu	54
Obr. 57 Schéma a rozměry drážkového náboje	56
Obr. 58 Schéma náboje před poslední operací	57
Obr. 59 Prstenec – polotovar pro kombinované protlačování	58
Obr. 60 Kalíšek – polotovar pro prostřížení dna a získání prstence	59
Obr. 61 Kalota – polotovar pro zpětné protlačování	59
Obr. 62 Svazky tyčových polotovarů	60
Obr. 63 Dělení polotovaru na kotoučové pile [41]	60
Obr. 64 Přejezd koše s polotovary mezi lázněmi na LPÚ	60
Obr. 65 Vstupní polotovar pro výrobní proces	61
Obr. 66 Operace 1	62
Obr. 67 Operace 2	63
Obr. 68 Operace 3	63
Obr. 69 Operace 4	65
Obr. 70 Průtlačnice pro 1. operaci	68
Obr. 71 Průtlačník pro 1. operaci	68
Obr. 72 Nástrojová sestava pro 1. operaci – tvorba kalíšku	68
Obr. 73 Nástrojová sestava pro 2. operaci – prostřížení dna	69
Obr. 74 Průtlačnice pro 3. operaci	70
Obr. 75 Průtlačník pro 3. operaci	71
Obr. 76 Nástrojová sestava pro 3. operaci – kombinované protlačování	71
Obr. 77 Průtlačník pro 4. operaci	73
Obr. 78 Nástrojová sestava pro 4. operaci – protlačení drážek	73
Obr. 79 Přiblížení sestavy funkčních nástrojů	73
Obr. 80 Vybraný lis pro 3. operaci	74
Obr. 81 Vybraný lis pro 4. operaci	74
Obr. 82 Zobrazení bodu zvratu výrobní série	81

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Základní druhy ocelí pro produkty objemového tváření za studena [19]	26
Tab. 2 Postup operací na LPÚ	29
Tab. 3 Základní druhy nástrojových ocelí pro objemové tváření za studena [34]	35
Tab. 4 Geometrické parametry průtlačnic pro dopředné protlačování [2]:	39
Tab. 5 Geometrické parametry průtlačnic pro zpětné protlačování [2]	42
Tab. 6 Geometrické parametry průtlačníků pro zpětné protlačování [2]	43
Tab. 7 Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli S355J0 [40]	53
Tab. 8 Postup operací na LPÚ pro ocel 11 523	61
Tab. 9 Přípustné hodnoty deformace na jednu operaci při protlačování ocelí [20]	66

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Křivky přetvárného odporu oceli 11 523

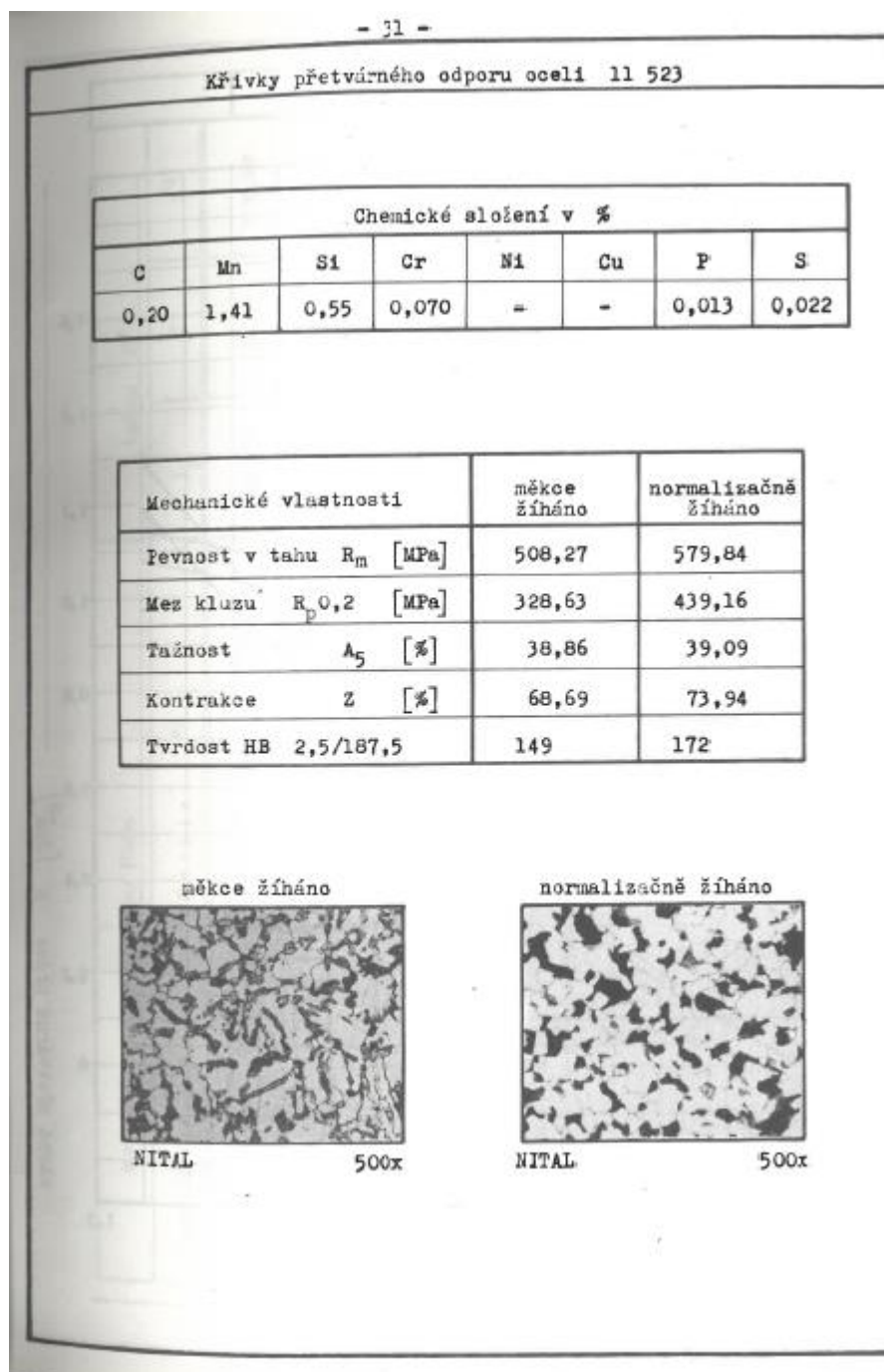
SEZNAM VÝKRESŮ

Polotovar pro tváření	2020-DP-171089-1
Drážkový náboj	2020-DP-171089-2
Průtlačnice pro 4. operaci	2020-DP-171089-N01
Průtlačník pro 4. operaci	2020-DP-171089-N02
Nástrojová sestava pro 1. operaci	2020-DP-171089-S01
Nástrojová sestava pro 2. operaci	2020-DP-171089-S02
Nástrojová sestava pro 3. operaci	2020-DP-171089-S03
Nástrojová sestava pro 4. operaci	2020-DP-171089-S04

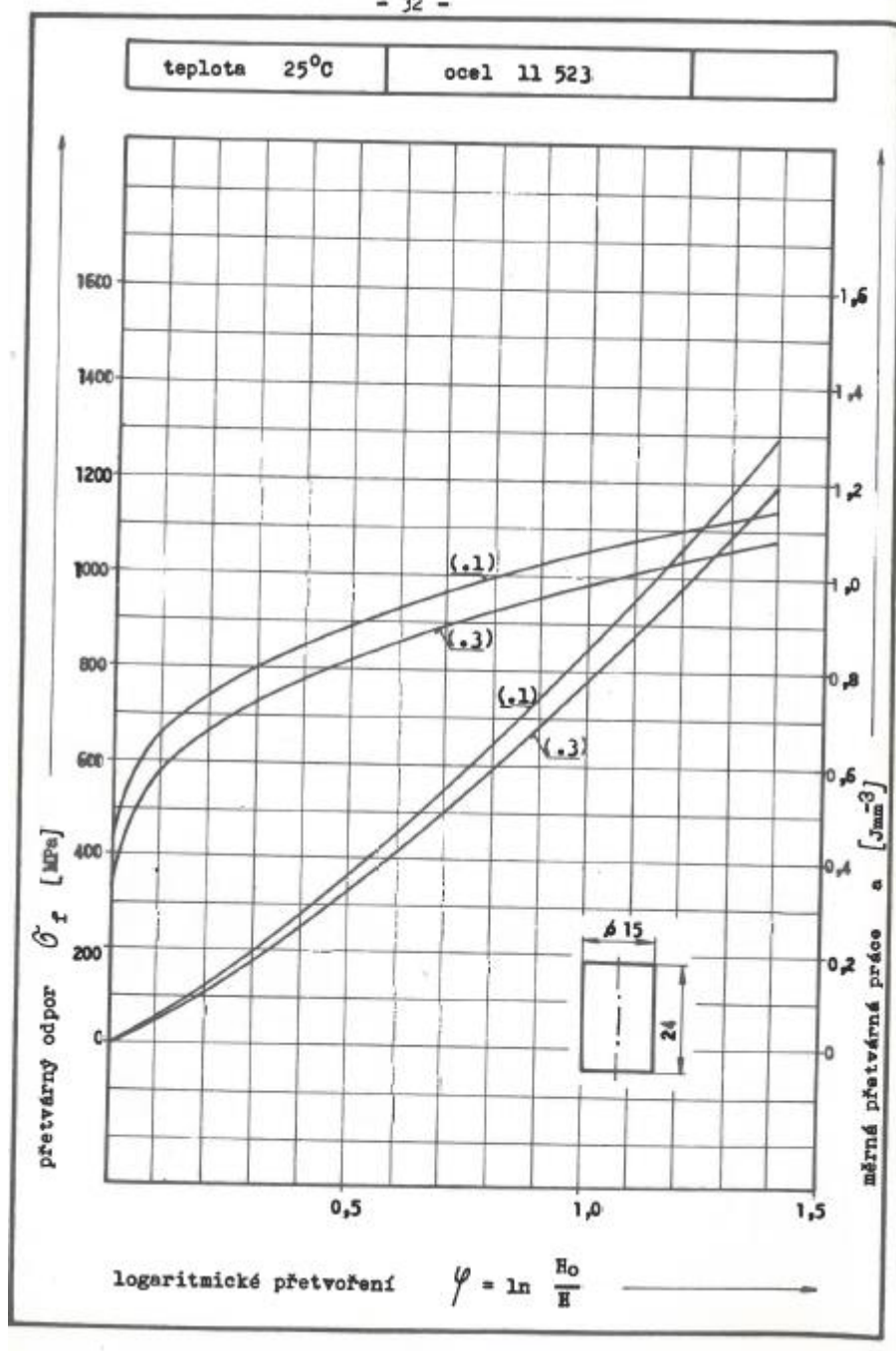
PŘÍLOHA 1

1/4

Křivky přetvárného odporu oceli 11 523



- 32 -



Ocel 11 5 2 3 měřicí zřídění		teplota 25° C		
Aprox. izofixa	Rovnice *)	I_{yx}	$\bar{\sigma}^2$	δ^2
Polytropa	$\bar{\sigma}_r = 658,45 \varphi^{0,4138} + 318,62 \quad [\text{MPa}]$	0,99768	98,310	2728,688
Polynom 3. stupně	$\bar{\sigma}_r = 533,68 \varphi^3 - 1345,31 \varphi^2 + 1350,12 \varphi + 422,43 \quad [\text{MPa}]$	0,99570	807,734	21808,812
Polynom 5. stupně	$\bar{\sigma}_r = 2552,40 \varphi^5 - 9534,78 \varphi^4 + 13244,28 \varphi^3 - 8504,58 \varphi^2 + 2880,48 \varphi + 346,45 \quad [\text{MPa}]$	0,99803	167,599	4189,966
Rekurentní 1. zmnožená funkce $\bar{\sigma}_r = \frac{F}{D^2} \frac{4000}{\eta} \quad [\text{MPa}]$	$F = 242,45 \varphi^3 - 277,27 \varphi^2 + 390,76 \varphi + 69,61 \quad [\text{MPa}]$	0,99966	21,504	580,602
	$D = 2,36 \varphi^3 - 1,49 \varphi^2 + 7,83 \varphi + 14,91 \quad [\text{mm}]$	0,99969	0,011	0,292
$a = 0,47 \varphi^{1,138} + 0,32 \varphi \quad [\text{mm}^{-3}]$		$\dot{\varphi}_{\text{str.}} = 0,014 \quad [\text{s}^{-1}]$		

*) Pozn.: Rovnice platí pro φ v intervalu 0 až 1,33

Ocel 11 523 normalizačně litého		teplota 25° C		
Aprox. měřidla	Rovnice ⁿ⁾	I _{yx}	G ²	J ²
Polytropa	$\tilde{G}_r = 625,19 \varphi^{0,4248} + 417,71 \text{ [MPa]}$	0,93482	156,887	4392,843
Polynom 3. stupně	$\tilde{G}_r = 526,84 \varphi^3 - 1382,99 \varphi^2 + 1386,92 \varphi + 497,47 \text{ [MPa]}$	0,99316	507,518	13702,984
Polynom 5. stupně	$\tilde{G}_r = 2025,69 \varphi^5 - 7579,80 \varphi^4 + 10673,69 \varphi^3 - 7133,66 \varphi^2 + 2618,84 \varphi + 437,89 \text{ [MPa]}$	0,99848	122,006	3050,153
Racionálně lomená funkce $\tilde{G}_r = \frac{F}{D^2} \frac{4000}{\varphi} \text{ [MPa]}$	$F = 425,98 \varphi^5 - 1487,13 \varphi^4 + 2071,31 \varphi^3 - 1205,32 \varphi^2 + 569,72 \varphi + 75,98 \text{ [MPa]}$	0,99994	4,114	102,889
	$D = 1,46 \varphi^3 + 0,73 \varphi^2 + 6,31 \varphi + 14,98 \text{ [mm]}$	0,99993	0,003	0,071

$$\dot{\varphi}_{\text{stř.}} = 0,012 \text{ [s}^{-1}\text{]}$$

$$a = 0,44 \varphi^{1,4248} + 0,42 \varphi \text{ [Jmm}^{-3}\text{]}$$

ⁿ⁾ Pozn.: Rovnice platí pro φ v intervalu 0 až 1,32