



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA KRYTU VYSOKOTLAKÉHO HYDRAULICKÉHO FILTRU

PRODUCTION OF HIGH PRESSURE HYDRAULIC FILTER HOUSING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Podloucký

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michaela Císařová, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Lukáš Podloucký**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Michaela Císařová, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

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

Výroba krytu vysokotlakého hydraulického filtru

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o návrh výroby krytu určeného pro vysokotlaký hydraulický filtr. Součástí je rotačního tvaru a bude zhotovena technologií objemovým tvářením za studena. Na tuto problematiku bude zaměřena literární studie.

Cíle bakalářské práce:

Provést srovnání možných způsobů výroby se zhodnocením jejich vhodnosti a nevhodnosti.
Vypracovat aktuální literární studii zvolené technologie.
Zpracovat návrh výroby doložený nezbytnými technologickými a kontrolními výpočty.
Navrhnout a popsat tvářecí nástroj.
Zhotovit výkres nástroje s vyhotovením výkresů vybraných dílů.

Seznam doporučené literatury:

BABOR, Karel, Augustin CVILINEK a Jan FIALA. Objemové tvářením ocelí. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1967, 332 s.

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

FELDMANN, Heinz D. Protlačování oceli. 1. vyd. Vladimír Hašek. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1962, 200 s.

DVOŘÁK, Milan, GAJDOŠ, František, NOVOTNÝ, Karel. Technologie tvářením: plošné a objemové tvářením. 2. vyd. Brno: CERM. 2007. 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.

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

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na řešení problematiky výroby vysokotlakého hydraulického filtru technologií protlačování za studena. Výchozím polotovarem je kalota z oceli C15R o průměru 104 mm a výšce 57,9 mm. Výrobní série předpokládá množství 30 000 ks za rok. S využitím poznatků z odborné literatury i praxe byla zhodnocena technologičnost výrobku a následně zvolen technologický postup. Ten předpokládá protlačování dílu ve dvou operacích s mezioperačním rekrytalizačním žíháním a s využitím povrchové úpravy fosfátováním a mýdlováním. Pro výrobu je navržen lis Eitel 1 250 s nominální tvářecí silou 12 500 kN. Konstrukční řešení tvářecích nástrojů zohledňuje tvar protlačku, technologické zásady i početně ověřenou bezpečnost. Materiálem průtlačnice a průtlačníku je rychlořezná nástrojová ocel 19 830. V případě vyhazovače se jedná o vysokolegovanou nástrojovou ocel 19 437. Technologický postup i výpočty sil jsou ověřeny simulací procesu tváření vytvořené v programu Simufact Forming.

Klíčová slova

protlačování, tváření za studena, vysokotlaký filtr, plastická deformace, zpevnění materiálu

ABSTRACT

The Bachelor's thesis is focused on solving the problem of production of high-pressure hydraulic filter by cold extrusion technology. The initial semi-finished product is a C15R steel cap with a diameter of 104 mm and a height of 57.9 mm. The production series assumes a quantity of 30,000 pieces per year. The technologicality of the product evaluation was based on technical literature knowledge and professional experience. The technological process was chosen subsequently. This process counts with the extrusion in two operations with mid-operational recrystallization annealing and with the use of surface treatment by phosphating and soaping. An Eitel 1 250 press with a nominal forming force of 12 500 kN is designed for the production. The design of the forming tools takes into consideration the shape of the extrusion, technological principles and mathematically verified safety. The material of the die and punch is high-speed tool steel 19 830. The material of the ejector it is high-alloy tool steel 19 437. The technological process and force calculations are verified by simulation of the forming process created in the Simufact Forming program.

Key words

extrusion, cold forming, high pressure filter, plastic deformation, material strengthening

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PODLOUCKÝ, Lukáš. *Výroba krytu vysokotlakého hydraulického filtru* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132767>.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Michaela Císařová.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Výroba krytu vysokotlakého hydraulického filtru** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Lukáš Podloucký

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji především paní Ing. Michaelae Císařové, Ph.D za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce. Děkuji také panu Ing. Janu Řiháčkovi, Ph.D za podporu v oblasti simulace procesu tváření, panu Radku Polákovi a ing. Radku Dubšíkovi za odborné technické konzultace, také firmě Metaldyne Oslavany a v neposlední řadě děkuji mojí rodině za shovívavost i oporu, kterých se mi od ní při mých studiích dostává.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

	Str.
ÚVOD	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ	10
1.1 Možnosti technologického řešení výroby.....	10
2 PROTlačOVÁNÍ ZA STUDENA	12
2.1 Zpevnění a odpevnění tvářeného materiálu.....	14
2.1.1 Rekrytalizační žíhání	15
2.2 Technologičnost tvaru.....	16
2.3 Oceli k protlačování za studena a příprava polotovarů.....	16
2.4 Tvářecí lisy	18
2.5 Nástroje a zásady jejich konstrukčního řešení	19
2.5.1 Průtlačnice	20
2.5.2 Průtlačníky	20
2.5.3 Materiál tvářecích nástrojů	21
2.6 Výpočtové vztahy	21
3 NÁVRH ŘEŠENÍ VÝROBY	25
3.1 Technologické výpočty	25
3.1.1 Výpočty pro 1. tvářecí operaci	27
3.1.2 Výpočty pro 2. tvářecí operaci	29
4 VOLBA TVÁŘECÍHO LISU	34
5 NÁVRH NÁSTROJŮ	35
5.1 Průtlačník	35
5.2 Průtlačnice	36
5.3 Vyhazovač	38
5.4 Nástrojová sestava	39
6 ZÁVĚRY	40

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam příloh

Seznam výkresů

ÚVOD [1], [2], [3]

Technologie protlačování kovů byla známa a již koncem 19. století, kdy se využívala pro tváření měkkých neželezných kovů, zejména cínu a olova, později se přidalo tváření zinku, hliníku a některých jeho slitin. Ne všechny slitiny jsou tvařitelné za pokojové teploty a tak bylo nutné je před tvářením na potřebnou teplotu zahřát. Je známo, že roku 1909 přihlásil v USA Hooker svůj patent „Technologický postup a zařízení na výrobu kovových trubek a nádob“. Nicméně tváření oceli bylo až do třicátých let 20. století považováno za nemožné. Počátkem třicátých let, se Německo snažilo stát nezávislým na dovozu mědi, která byla mimo jiné jednou z hlavních surovin potřebných pro výrobu nábojek a nábojnic ve zbrojním průmyslu. I z těchto důvodů zde byla snaha vyrábět nábojky a nábojnice z oceli. Roku 1934 proběhly ve firmě Kabel und Metallwerke Neumeyer AG, v Norimberku první pokusy s protlačováním oceli Hookerovou metodou. Avšak v důsledku velikého tření mezi nástroji a materiálem byla nevyhovující jak životnost nástrojů, tak jakost povrchu výrobků. Následně ze však Dr. Singer učinil zásadní objev v podobě fosfátové mezivrstvy, která slouží pro potřebné ulpění maziva na polotovar při procesu tváření a tím pomáhá minimalizovat třecí síly mezi tvářeným materiálem a tvářecími nástroji. Materiál tak lze v plastickém stavu dobře tvarovat, aniž by došlo vlivem tření k poškození nástrojů. Díky tomuto objevu se tváření oceli stalo hospodárnou výrobní technologií, která byla pod názvem „Stříkání oceli za studena“ prohlášena z iniciativy německé armády za tajný patent.

Později v poválečném období zažila tato výrobní metoda obrovský rozmach na průmyslové úrovni zejména v USA a to především díky předním německým odborníkům, kteří do této země po válce přišli.

Dnes patří objemové tváření za studena mezi vysoce produktivní a moderní metodu průmyslové výroby kovových součástí. Díky možnosti automatizace výrobního procesu, vysoké produktivitě a celkové ekonomické výhodnosti ve velkosériové výrobě je tento způsob výroby jednou z předních výrobních technologií. Je využívána při výrobě ocelových, nejčastěji rotačních součástí, zejména v automobilovém, strojním, ale také leteckém průmyslu.

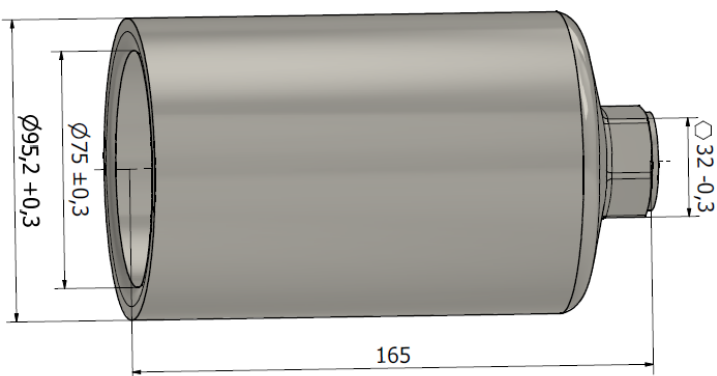


Obr. 1 Ocelové vylisky vyrobené technologií objemového tváření za studena

1 ROZBOR ZADÁNÍ [1], [2], [3], [4]

Práce je zaměřena na komplexní návrh výroby krytu filtru pro vysokotlaké, hydraulické systémy (obr. 2). Tyto typy elementů se osazují do nejrůznějších průmyslových, stavebních, ale také těžebních strojů, u kterých je z hlediska jejich funkce takový systém využíván.

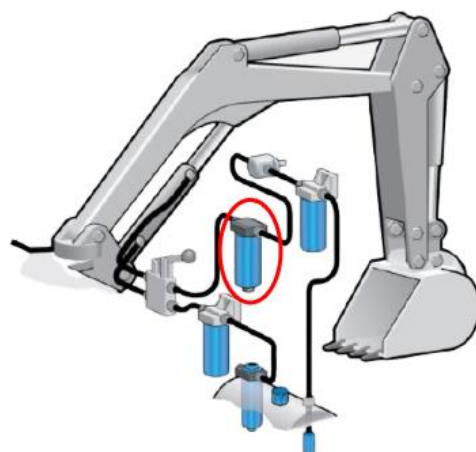
Samotný výrobek je rotačního tvaru a na hlavě je z montážních důvodů osazen šestihranem. Kvůli provozním vibracím strojů, teplotám a vysokým tlakům hydraulického oleje ve strojních systémech a zařízeních, v nichž se tyto typy těchto krytů vyskytují (obr. 3), je zde kladen velký důraz na kvalitní a vysoce funkční výrobek. Ten musí splňovat přísné požadavky kladené zejména na bezpečnost, pevnost, houževnatost, odolnost proti cyklickému namáhání a v neposlední řadě také na tvarovou a rozměrovou přesnost, včetně jakosti povrchu.



Obr. 2 Model vysokotlakého hydraulického filtru

Požadované mechanické charakteristiky zadaného dílu jsou: pro smluvní mez kluzu $R_{p02} = \min 450 \text{ MPa}$ ve stěně výrobku, mez pevnosti dna $R_m = \min 500 \text{ MPa}$ a tažnost $A_5 = \min 8 \%$.

Roční objem výroby je stanoven na 30 000 ks. Díl bude součástí výrobního portfolia firmy Metaldyne Oslavany, která je součástí americké společnosti American Axle & Manufacturing. AAM, je zkratkou názvu této korporace s nadnárodní působností, která produkuje nejen ocelové komponenty do automobilového i strojního průmyslu. Technologiemi tváření za studena, za tepla, za poloohřevu ale i obráběním, vyrábí součásti hnacích a převodových ústrojí automobilů, či vysoce namáhané součásti mechanismů elektrických bouracích kladiv Hilti, nebo kryty vysokotlakých filtrů pro firmy, jako Hydac, Klein a jiné světové výrobce.



Obr. 3 Umístění filtru ve stavebním stroji [4]

1.1 Možnosti technologického řešení výroby [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7]

Pro tento tvarově jednoduchý rotační díl je možné použít několik způsobů výroby, kde rozhodujícími faktory zvolené technologie musí být proveditelnost a ekonomičnost celého procesu. Nabízí se výroba technologií odléváním, obráběním, či tváření za studena. Každá z těchto možných variant je v průmyslové výrobě velmi důležitá a využívaná. Vždy je ale třeba navrhovaný díl posoudit a vzít v úvahu veškeré technické i ekonomické požadavky na něj a následnou analýzou výhod a nevýhod jednotlivých výrobních technologií stanovit tu nevhodnější.

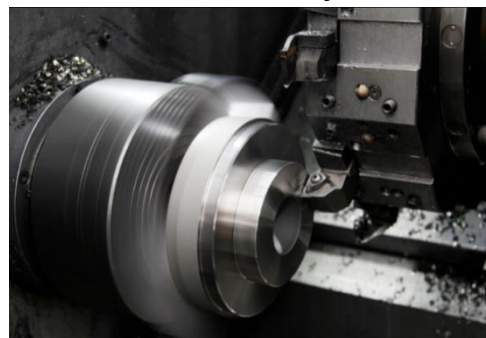
Technologie odlévání (obr. 4) je v požadavku na maximální využitelnost materiálu velice efektivní a zadanou součást tak lze vyrobít odlitím do skořepiny vyrobené metodou na vytavitelný model. Při použití vhodné oceli lze splnit i pevnostní požadavky.

Nevýhodou by však při volbě této technologie byla vysoká cena vhodné oceli, potřebné úkosity kvůli snadnému vyjmutí z formy, které by bylo nutné po odlití obrobit na požadovaný rozměr a tvar, či potřeba dalšího tepelného zpracování pro dosažení požadovaných mechanických vlastností. Z hlediska kvality a bezpečnosti hovoří v ne-prospěch této výrobní metody možná porozita i výskyt vnějších, ale především špatně zjistitelných vnitřních vad odlitků v podobě staženin, či bublin. Možná přítomnost těchto vad by kromě bezpečnosti negativně ovlivňovala odolnost výrobku proti vysokému tlaku a cyklickému namáhání, což jsou jedny z požadavků na hotový výrobek.



Obr. 4 Technologie odlévání [5]

Při volbě výroby technologií obrábění (obr. 5) je nutno vzít v úvahu požadavky na pevnost finálního výrobku které splňují jakostní legované oceli. Z plného tyčového materiálu kruhovitěho průřezu je třeba nachystat přířezy s průměrem i délkou většími, nežli jsou konečné rozměry výrobku dle výkresu, neboť je nutné počítat s přídatky na obrábění. Polotovar lze poté na soustruhu na dvě upnutí a v několika operacích obrobit na požadované rozměry, s tím, že šestihran bude vyroben frézováním. Metoda by byla vhodná pro výrobu několika kusů, kdy by v její prospěch jasně hovořila rychlost a výrobní nenáročnost celého procesu výroby, realizovatelného i v menší dílně. V případě sériové výroby daného dílu však tato metoda postrádá smysl, neboť použití drahé oceli při využitelnosti materiálu pouze okolo 30 % by bylo vysoce neekonomické.



Obr. 5 Technologie obrábění [6]

Objemovým tvářením za studena, metodou protlačování lze dosáhnout téměř 100% využití materiálu výchozího polotovaru. Je možné použít v porovnání s předchozími metodami materiál méně hodnotný, který může být i o polovinu levnější a přesto bude výsledný výrobek splňovat požadavky na materiálové charakteristiky i jakost povrchu. Nevýhodou této technologie je vysoká cena nástrojů, a tvářecích strojů, z tohoto důvodu není vhodná pro kusovou výrobu. Ovšem v případě stanovené roční série ve výši 30 000 ks tato nevýhoda odpadá. Díky vysoké produktivitě, levnému vstupnímu materiálu a materiálové úspoře se tento způsob výroby stává z ekonomického hlediska velmi výhodnou volbou.



Obr. 6 Technologie tvářením za studena

Po zvážení výhod a nevýhod uvažovaných výrobních technologií a zvážení každé z nich je zřejmé, že nejvhodnější variantou je výroba obalu vysokotlakého filtru objemovým tvářením za studena, metodou protlačování.

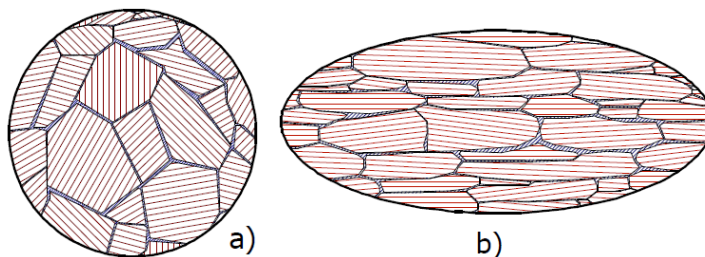
2 PROTlačOVÁNÍ ZA STUDENA [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14]

Jedná se o progresivní výrobní metodu, která je nejčastěji využívána pro výrobu symetrických, ale i nesymetrických rotačních součástí. Jedná se o beztržskovou výrobní metodu, vyznačující se vysokou produktivitou, úsporou materiálu a zvýšením mechanických vlastností, především mez pevnosti a kluzu tvářeného materiálu. Se zvyšujícím se objemem výroby, oproti jiným výrobním technologiím, jako je například obrábění, výrazně snižuje výrobní náklady.

Podstata této metody spočívá v plastickém přetvoření materiálu, k němuž dochází pod rekrytalizační teplotou $T = 0,3 T_{TAV}$. Během tohoto procesu dochází k vytvoření trvalých deformací, za působení trojosé napjatosti, která je vyvolána vnější silou. Působením trojosé napjatosti lze dosáhnout u vhodného materiálu vysokých hodnot přetvoření bez porušení soudržnosti materiálu, což je také účelem této specifické výrobní metody.

V průběhu protlačování dochází vlivem vnější síly k postupnému usměrňování a natáčení krystalické mřížky zrn materiálu, to umožňuje skluz v meziatomových vrstvách. Dochází tak k deformaci zrn, která se splošťují a protahují ve směru tváření. Výsledná změna tvaru zrn a usměrněná orientace krystalových mřížek jednotlivých zrn je nazývána deformační texturou. Grafické znázornění zrn před a po protlačování je vyobrazeno na obrázku 7.

Protlačováním dochází v materiálu k významným metalurgickým změnám v podobě nepřerušného průběhu vláken (viz obr. 8). Tyto deformace způsobují anizotropii vlastností materiálu, neboli změnu mechanických vlastností materiálu v různých směrech zatěžování. Výrazně narůstá mez pevnosti (R_m), ale také mez kluzu (R_e).



Obr. 7 a) Zrna materiálu před tvářením, b) po tváření [8]

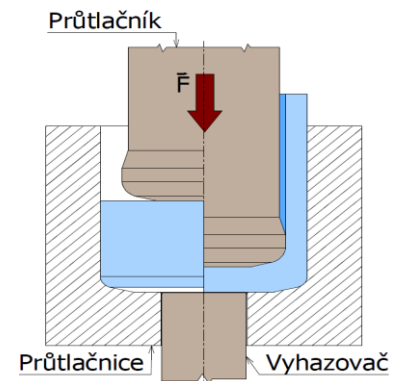
Na druhou stranu klesá tažnost materiálu (A_5) a kontrakce (Z) což se projevuje ztrátou plasticity. Plasticitu a strukturu zrn materiálu je v případě potřeby možné obnovit například rekrytalizačním, žiháním, čehož se obvykle využívá, mají-li následovat další tvářecí operace, nebo je z jiného důvodu nově vzniklá struktura nežádoucí.

Vyšší stupeň přetvoření může způsobit i porušení soudržnosti materiálu a tím zapříčinit poruchy v materiálové struktuře ve formě mikrotrhlin a trhlin, nebo i úplnou destrukci tvářeného dílu. K těmto materiálovým poruchám dochází v důsledku nestabilních lokálních plastických deformací.



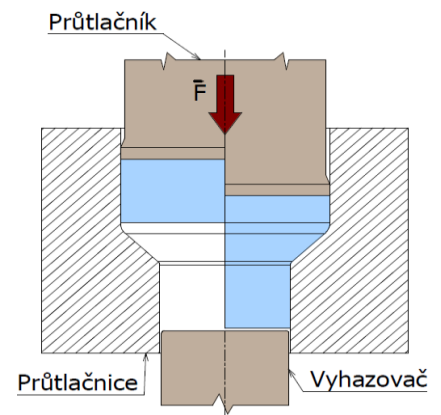
Obr. 8 Řez dílem vyrobeným protlačováním, s viditelným průběhem vláken

- Zpětné (protisměrné) protlačování [8], [9], [10], [11]
 Výchozím materiálem může být špalík, kalota, nebo prstavec, který je vložen uzavřené průtlačnice, kde na něj působí silou průtlačník. Tím je v materiálu vyvolána prostorová napjatost a je uveden do plastického stavu. Materiál „teče“ v prostoru mezi průtlačníkem a průtlačnicí, v protisměru pohybu průtlačníku (obr. 9). Tato metoda je vhodná pro výrobu dílů ve tvaru kalíšku, který může mít plné dno, nebo průchozí otvor, v závislosti na použitém výchozím polotovaru. Při průběhu této metody protlačování materiál klade vysoký deformační odpor. Výška polotovaru u této metody bývá větší než polovina průměru. Nejčastějším výsledným produktem je součást rotačního tvaru, která může být již finální výrobek, nebo polotovar určený k dalším tvářecím operacím, či pro zpracování některou z technologií obrábění.



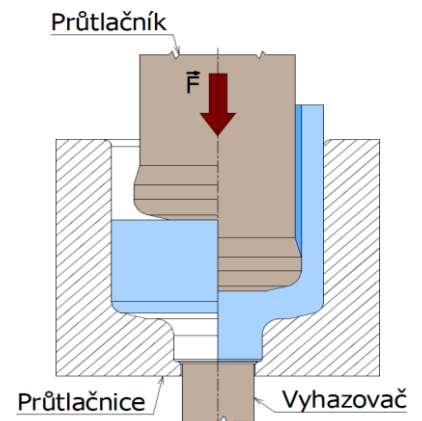
Obr. 9 Zpětné protlačování [10]

- Dopředné (sousedné) protlačování [8], [10], [11]
 Tento způsob protlačování (obr. 10) je využíván pro zmenšení průřezů dutých i plných polotovarů. Tvářený materiál je vložen do průtlačnice, která není uzavřena, ale má průchozí otvor o menším rozměru, než je samotný rozměr polotovaru. V první fázi nastává proces pěchování a po vyplnění dutiny průtlačnice je materiál protlačován otvorem ve směru pohybu průtlačníku. Výlisek zůstává v průtlačnici, ze které je obvykle vysunut za pomoci vyhazovače, ale v některých případech je možno tento výlisek vytlačit následujícím výliskem. Výchozím polotovarem může být například kalíšek vyrobený zpětným protlačováním, prstavec ze silnostěnné trubky, drátu, nebo plný špalík. Nejčastějším tvarem výlisku je součást rotačního tvaru. Je však možné tímto způsobem vyrábět i součásti jiného pravidelného tvaru.



Obr. 10 Dopředné protlačování [10]

- Sdružené (obousměrné) protlačování [8], [11], [12]
 Jedná se o kombinaci zpětného a dopředného protlačování, kdy tvářený materiál teče jak ve směru, tak i v protisměru pohybu průtlačníku. Názorné schéma je vyobrazeno na obrázku 11. Má-li však být výrobek při použití této metody kvalitní, je nutné, aby v části, kde materiál teče sousledně byl volen nižší stupeň přetvoření, neboť toto má vliv na správné zatečení materiálu a tím i na výsledné dodržení rozměrů a tvarů dle požadavků na konečný výrobek. Tato metoda objemového tváření je vhodná pro výrobu méně složitých součástí rotačního tvaru. Polotovarem může být špalík, silnostěnný prstavec, či kalíšek.

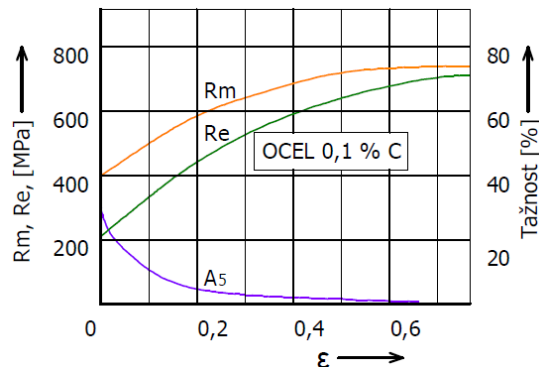


Obr. 11 Kombinované protlačování [10]

2.1 Zpevnění a odpevnění tvářeného materiálu [10], [11], [12], [13], [14]

Protlačování za studena je doprovázeno a ovlivňováno typickými jevy, kdy:

- v materiálu dochází k deformačnímu zpevnění, s nímž narůstá odpor materiálu proti přetvoření. Nejzávažnější projev tohoto jevu je hustota dislokací. U polykrystalů se jednotlivá zrna deformují v souladu s deformací sousedních zrn. Výsledné zpevnění je potom větší o zpevnění, které vzniká na hranicích zrn. Se zvyšující se mírou deformace narůstá mez pevnosti (R_m) a mez kluzu (R_e). Naopak výrazně klesá tažnost materiálu (A_5). Vliv deformace na tyto vlastnosti je znázorněn v grafu viz obr. 12.



Obr. 12 Vliv deformace na mechanické vlastnosti [11]

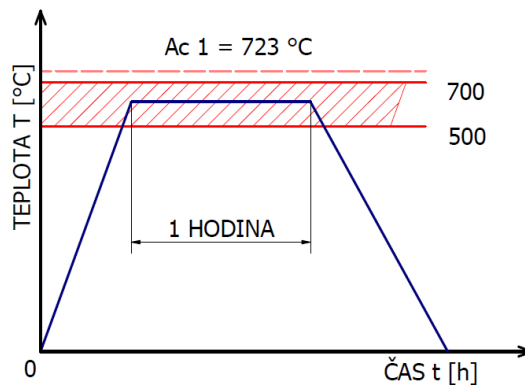
- materiál v závislosti na chemickém složení, teplotě, rychlosti deformace i stupni přetvoření klade proti přetvárné síle odpor, za podmínky jednoosé napjatosti. Je nazýván „přirozeným přetvárným odporem“ a značí se (σ_p). Grafy s křivkami těchto odporů a měrné přetvárné práce (A_j) pro různé materiály jsou získávány především prostřednictvím pěchovacích zkoušek. Přirozený přetvárný odpor je důležitý pro vypočtení deformačního odporu (σ_d). Ten je již ovlivněn třením, stupněm deformace, tvarem nástrojů i měnící se teplotou při různých stupních přetvoření. Proto jsou hodnoty σ_d větší, než hodnoty σ_p . Pomocí deformačního odporu jsou následně počítány další nezbytné parametry pro správné dimenzování tvářecích nástrojů i lisů, potřebných k zajištění stability tvářecího procesu.
- odpevnění je proces, při němž částečně, nebo úplně zanikají příčiny zpevnění. Je závislé na teplotě, které je daný materiál vystaven a také na čase, po který na něj tato teplota působí. V krystalické mřížce se vlivem přetvoření a zpevnění akumuluje deformační energie a materiál se stává termodynamicky nestabilní. Pokud je třeba toto zpevnění odstranit a obnovit plasticitu materiálu z důvodu následujících tvářecích operací, nebo kvůli optimalizaci jiných důležitých fyzikálních parametrů, je nutné přistoupit k některému z tepelně aktivovaných dějů. Zde se využívá odpevnění statické, které lze provést zotavením s polygonizací, sekundárním růstem zrn, či primární rekrystalizací. U všech těchto metod je důležité ohřátí materiálu na požadovanou teplotu, výdrž na ní po stanovený čas a poté volné, či řízené ochlazování. Pro ohřev materiálu jsou využívány elektrické žíhací pece (obr. 13), které díky výborné možnosti regulace a automatizace umožňují ohřev na přesně stanovenou teplotu a následné řízení celého žíhacího procesu dle konkrétních požadavků.



Obr. 13 Elektrická žíhací pec Ipsen s řídicím systémem Siemens

2.1.1 Rekrystalizační žíhání [10], [13], [14]

Tento způsob žíhání oceli je důležitým tepelným zpracováním, jenž je v souvislosti s metodou protlačování za studena využíváno. Uplatňuje se především pro mezioperační žíhání a pro žíhání hotových protlačků, je-li to vyžadováno. Proces probíhá při teplotě, která je vyjádřena vzhledem k teplotě tavení dané oceli, neboli dle Bočvarovy rovnice. Dochází během něj k obnově původních mechanických, ale i jiných fyzikálních vlastností, jež měl materiál před tvářením. Celý proces rekrystalizace probíhá za izotermického ohřevu, kdy se nejprve materiál ohřeje na potřebnou teplotu, při níž následně dojde k úplné rekrystalizaci struktury materiálu v časovém intervalu do jedné hodiny (obr. 14). Zejména lze tímto způsobem u tvářením zpevněného materiálu dosáhnout úplné obnovy plasticity.



Obr. 14 Schéma izotermického žíhacího procesu v závislosti na čase [10]

- Bočvarova rovnice pro rekrystalizaci je vyjádřena následujícím vztahem:

$$T_{REK} = (0,35 - 0,45) T_{TAV} \quad [K], \quad (2.1)$$

kde: T_{REK} – rekrystalizační teplota [K],

T_{TAV} – teplota tavení materiálu [K].

Proces rekrystalizace je závislý na několika faktorech, jsou to:

- velikost přetvoření materiálu – čím větší je stupeň přetvoření, tím větší je i termodynamická nestabilita a díky tomu je teplota potřebná pro aktivaci procesu rekrystalizace nižší.
- velikost teploty – při vyšší teplotě probíhá rekrystalizace rychleji a zkracuje se čas potřebný k dokončení procesu.
- chemické složení – čím větší je chemická čistota, tím lepší je pohyb dislokací v materiálu a klesá teplota potřebná pro rekrystalizaci.



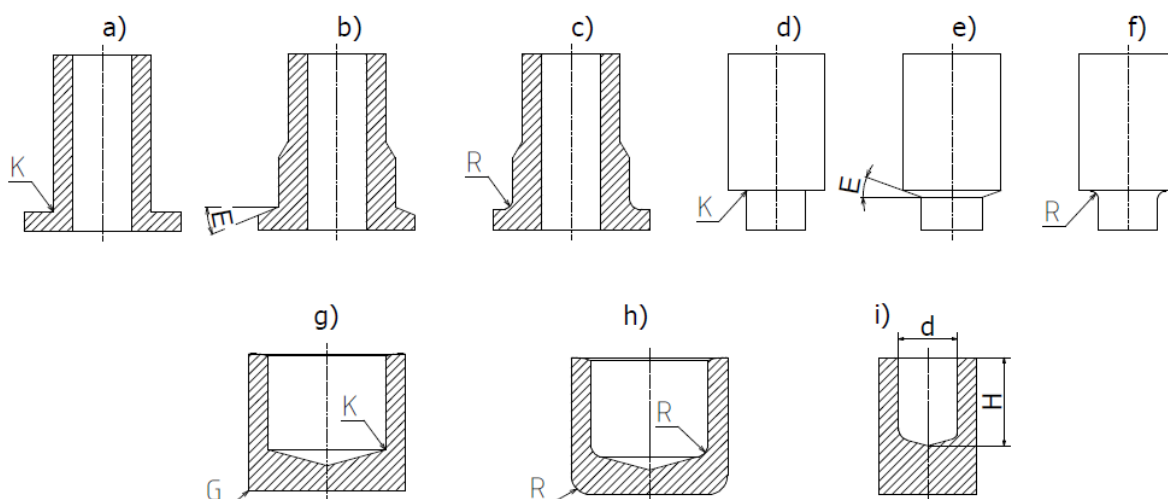
Obr. 15 Rekrystalizačně vyžíhané výlisky

2.2 Technologičnost tvaru [10], [12], [14]

Tvary součástí pro protlačování za studena mohou být symetrické, nesymetrické, jednodušší, či složitější. V praxi jsou nejčastějším produktem díly rotačního tvaru. Bývají zhotoveny některým ze základních způsobů protlačování, nebo jejich kombinací.

Součásti kalíškovitého tvaru, jsou vyráběny převážně kombinací zpětného protlačování, popřípadě v kombinaci s dopředným způsobem. Polotovarem je špalík, či kalota kruhového průřezu, jehož průměr je volen obvykle o 0,3 až 0,5 mm menší, než je nejmenší vnější průměr součásti. Důvodem je správné ustavení špalíku do průtláčnice. Dále je nutné dodržet zásady maximálního přetvoření, u zpětného je $\varphi_{max} = 1,4$ a u dopředného $\varphi_{max} = 3$ [10]. U zpětného protlačování by poměr výšky protlačovaného otvoru (H) k průměru (d) tohoto otvoru měl být v rozmezí 1,2 až 2.

Při optimalizaci tvarů řešené součásti je třeba předejít náhlým změnám příčného průřezu, tvarů a přechodů. Nevhodné jsou také rohy (K) (obr. 16a, d, g) a ostré hrany (G) (obr. 16g). Hrany jsou příčinou špatného toku materiálu a jejich přítomnost zvětšuje nároky na tvářecí sílu. Pokud však náhlé změny tvaru, nelze kvůli konstrukčním požadavkům vyloučit, je třeba je zmírnit například náběhovým kuzelem (E) (obr. 16b, e), či vhodným zaoblením (R) rohu (obr. 16c, f, h). U součástí kalíškovitého tvaru může být hloubka vtláčeného otvoru (d) maximálně dvojnásobek průměru otvoru (obr. 16i), protože při větším poměru již může dojít k porušení průtláčníků, ten se může pěchovat, ohnout, nebo může dojít k úplné destrukci.



Obr. 16 Technologická vhodná a nevhodná prvky pro objemové tváření za studena [14]

2.3 Oceli k protlačování za studena a příprava polotovarů [10], [11], [13], [14]

Obecně platí pravidlo, že materiál, u kterého není v jedné operaci možná 25% deformace, nebo je nutný tvářecí tlak vyšší, než 2500 MPa, není pro objemové tváření za studena z hospodárného hlediska vhodný.

- Oceli pro tváření za studena

Vhodné oceli (tab. 1) jsou s jemnozrnnou strukturou, dobrou tvárností, s nižším obsahem uhlíku (ideálně okolo 0,2 – 0,25 % C ale lze až do 0,45 % C) a legur s předepsaným nízkým obsahem fosforu, síry a malým sklonem k deformačnímu zpevnění. S vyšším obsahem uhlíku a legur stoupá deformační odpor kladený materiálem, to má výrazný vliv na počet nutných tvářecích operací i životnost nástrojů a tím na celkovou ekonomičnost výroby. Tyto kritéria splňují díky svému chemickému složení oceli nízkouhlíkové a nízkolegované.

Oceli s větším obsahem uhlíku a legur lze pro objemové tváření za studena použít, musí k tomu však být konstrukční důvod a odpovídající tepelné zpracování, obvykle se takovéto oceli žíhají na měkko. V případě uhlíkových ocelí je vyžadována jemnozrnná struktura s globulárním perlitem.

Tab 1. Některé oceli vhodné pro objemové tváření za studena [10].

Druh oceli	V žíhaném stavu			Po protlačení			Stupeň deformace
	mez kluzu R_e	mez pevnosti R_m	tažnost A_5	mez kluzu R_e	mez pevnosti R_m	tažnost A_5	
	MPa	MPa	%	MPa	MPa	%	cca %
11 340	~200	~330	~25	~500	~700	~7	~60
12 010	~230	~380	~25	~400	~700	~8,5	~60
12 020	~280	~430	~20	~500	~770	~7	~60

Při volbě vhodné oceli je třeba splnit materiálové požadavky kladené na výsledný výrobek dle požadavků zákazníka a zároveň dodržet pravidlo co nejlepší hospodárnosti výroby. Příklady vhodných ocelí pro tváření jsou uvedeny v tabulce 1.

- Příprava polotovarů [2], [6] - pro objemové tváření za studena obnáší několik technologických operací, jako jsou:
 - příprava rovnáním prohnutých tyčí,
 - loupání materiálu kvůli odstranění povrchových vad a zajištění přesnějšího rozměru,
 - dělení materiálu některou z metod řezání, či stříhání,
 - tepelné zpracování některou z metod žíhání (pokud tak již není materiál dodán),
 - čištění povrchu polotovarů omíláním v bubnech, kvůli odstranění okují, dále mořením v kyselinových lázních s následnou neutralizací a odmaštěním, které je důležité pro kvalitní aplikaci fosfátové vrstvy,
 - fosfátování vytvoří na polotovaru základní pórovitou vrstvu, která slouží jako nosný prvek pro dobré ulpění maziva, které díky této mezivrstvě drží na materiálu po celou dobu tvářecího procesu a tím účinně pomáhá omezit tření,
 - mazání pro které v závislosti na následujícím tvářecím procesu lze použít olej, mazlavé mýdlo (obr. 17a), technický lůj, či molykot – MoS_2 (obr. 17b), popřípadě lze některé druhy kombinovat, například přimazáním molykovaných polotovarů technickým lojem na kritických místech před vložením do lisu.



a) fosfátováno a mýdlováno

b) povrchová úprava molykot MoS_2

Obr. 17 Výlisky opatřené povrchovou úpravou pro další tvářecí operaci

2.4 Tvářecí lisy [1], [13], [15], [16] [17], [18]

V principu se jedná o zařízení, jejichž pracovní část, která je nazývána beran, či smykadlo, koná přímočarý vratný pohyb s upnutým jedním, nebo více nástroji. Přímocharost pohybu beranu je zajištěna jeho přesným vedením v konstrukci lisu. Lisy jsou vyráběny v různých variantách a provedeních.

- Mechanické lisy [10], [14], [15], [17]

Jsou poháněny elektromotory jejichž točivý moment je prostřednictvím klikového mechanismu přenášen na přímočarý pohyb beranu. Řadí se mezi ně klikové (obr. 18) a kolenové. Tyto stroje vynikají vysokou tuhostí, rychlostí a variabilním zdvihem za současné vysoké přesnosti vedení beranu. Mají možnost přestavení beranu, nebo stolu a jednoduše a přesně seřaditelný vyhazovač. Využívají se pro díly, jejichž výroba by z důvodu malého objemu série na postupovém lisu nedávala smysl. Jsou vhodné



Obr. 18 Klikový lis Stamtec [15]

k tváření větších dílů vyráběných na jednu, maximálně dvě operace a je zde výhodou možnost zařazení mezioperačního tepelného zpracování protlačků. Při výběru stroje je třeba volit lis, který má o 30 až 50 % větší nominální sílu, nežli je požadovaná tvářecí. Průběh síly těchto lisů není konstantní, a v případě klikových lisů lze jmenovité tvářecí síly využít pouze v úhlové poloze asi 30° před dolní úvratí a 50 % síly v případě klikového a pouhých 20 % u kolenového lisu v poloze 90° před dolní úvratí stroje. Z hlediska bezpečnosti provozu bývají osazeny pojistkami proti přetížení, a to jak mechanickými, tak elektrickými včetně indikátorů tvářecí síly.

- Hydraulické lisy [14], [17], [18]

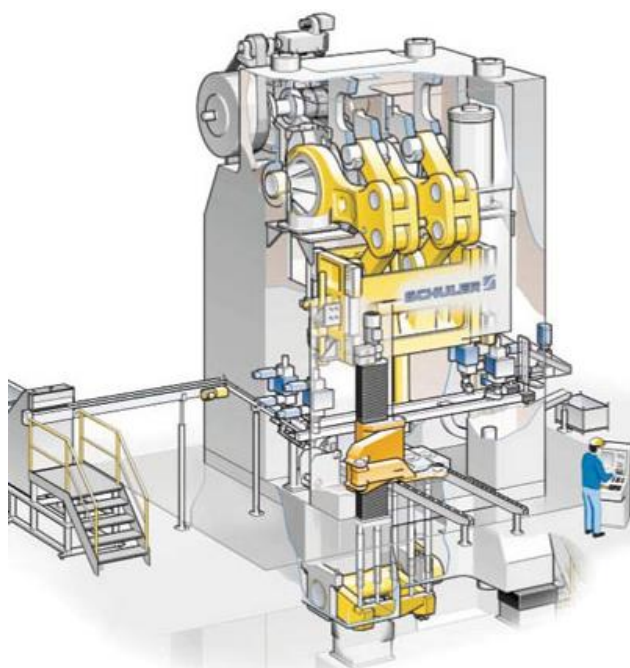
V tomto případě je beran uložen na pístu (obr. 19), který je poháněn hydraulickými čerpadly. Lisy jsou vhodné k protlačování dlouhých rozměrných výlisků, typu hřídel.

Důvodem je především schopnost stroje dosahovat nominální tvářecí síly s konstantním průběhem v celé dráze beranu. Další výhodou je zde minimalizace neproduktivního času díky možnosti rychlých přiblížení a vzdálení beranu od tvářeného dílu. Samotné dosednutí průtláčnicku na díl je pomalé a šetrné, což má pozitivní vliv na životnost drahých nástrojů. Nevýhodným faktorem oproti klikovým lisům je menší počet dosažitelných zdvihů i nižší pracovní rychlost, která ovlivňuje plynulost toku materiálu a v neposlední řadě také vyšší energetická náročnost i nákladnější údržba.



Obr. 19 Hydraulický lis [16]

- Speciální lisy (postupové automaty) [13], [14], [17]
Funkce těchto lisů je založena na mechanickém či hydraulickém principu. Stroj zobrazený na obrázku 20, je mechanický postupový automat od renomované firmy Schuler, jehož nominální síla může činit $1350 \div 31500$ kN. Je poháněn elektromotory, jejichž otáčivý pohyb je na přímočarý pohyb beranu přenášen přes důmyslný klikový a kolenový mechanismus. Beran je upraven pro uchycení několika tvářecích nástrojů a stůl je opatřen stejným počtem průtlačnic i mechanických vyhazovačů. Největší



Obr. 20 Postupový automatický lis Schuler [17]

výhodou automatů je plně automatizovaný chod a možnost vměstnání všech tvářecích operací do jednoho pracovního zdvihu. Tyto klíčové vlastnosti řadí stroje těchto typů mezi ty nejproduktivnější, které lze pro tváření za studena použít. Pro zvolení postupového automatu je nutno zvážit počet tvářecích operací, nebo množství zamýšlených kusů pro výrobu, neboť nízké série nejsou z důvodu vysokých nákladů na tvářecí nástroje a celkovou ekonomickou stránku provozu hospodárné. A je nutné brát v potaz také možný požadavek na mezioperační tepelné zpracování, které zde již z principu funkce stroje není možné zařadit.

2.5 Nástroje a zásady jejich konstrukčního řešení [1], [13], [14], [20]

Konstrukční provedení nástrojů je závislé na stroji, ve kterém je nástroj použit, na konkrétním způsobu protlačování a na tvaru výlisku. Mohou být jednoduché neboli určené pouze pro jednu tvářecí operaci, nebo víceoperační. Ty jsou určeny pro více operací v jednom pracovním cyklu, a to buď pro konvenční lis, nebo pro postupový automat.

Nejdůležitějšími částmi nástrojů jsou funkční části, které jsou vystaveny největšímu namáhání tlakem i třením a s tím spojeným opotřebením. Jsou to průtlačnice, průtlačník a vyhazovač.

Vzhledem k vysoké ceně těchto nástrojů, je nutné, aby u nich i v samotném procesu byly dodrženy určité požadavky a předpoklady pro hospodárnost. Jsou to:

- dlouhá životnost, již lze ovlivnit volbou vhodné nástrojové oceli, optimálním stupněm deformace, vhodným tepelným zpracováním, vysokou jakostí povrchu a vhodným chlazením i mazáním funkčních částí.
- vysoká tuhost nástrojové sestavy, které lze dosáhnout zamezením pružení jednotlivých částí masivním upevněním nástrojů, použitím kalených opěrných desek, vhodným konstrukčním řešením nástrojů v podobě potřebných zaoblení i vyvarování se náhlým přechodům. Je třeba také dostatečně dimenzovat průtlačnici správným počtem bandáží s odpovídajícími rozměry, a v neposlední řadě zajistit souosost funkčních částí nástroje i nejkratší možnou délku průtlačníku (2,5 maximálně 3násobek průměru pracovní části) a vyhazovače.

- snadná vyměnitelnost, kde je ideální, pokud lze zkompletovat nástrojovou sestavu v nástrojárně a následně ji pomocí manipulátoru upevnit do dutiny stolu a lisu.
- konstrukce musí umožňovat snadné vytlačení protlačku z průtlačnice, čehož lze dosáhnout dodržením kuželovitosti pracovní dutiny 1:1000.
- splnění požadavků na bezpečnost práce.

2.5.1 Průtlačnice [1], [13], [14]

Jedná se o důležitý a velice namáhaný tvářecí nástroj. Může být zhotovena z nástrojové oceli, či karbidů. Při konstrukčním návrhu je třeba dbát na tvar funkční dutiny, jenž je dán požadavkem na tvar výrobku i způsob tváření. Průtlačnice jsou dle způsobu protlačování pro zpětné, dopředné a pro pěchování.



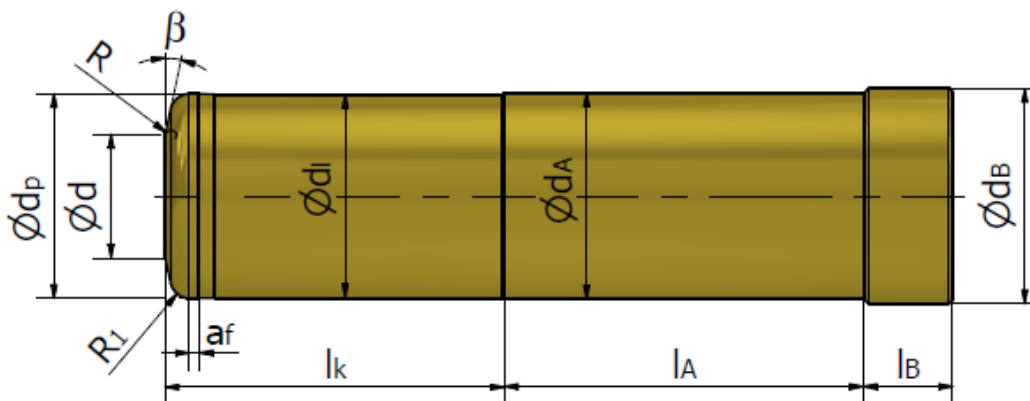
Obr. 21 Průtlačnice pro zpětné protlačování

Síla působící přes průtlačník na materiál v průtlačnici vyvolává radiální tlak, který lze uvažovat, jako hydrostatický, ten způsobuje v nástroji obvodové namáhání tahem. Aby průtlačnice tomuto namáhání odolala, je nutné ji opásat masivními bandážemi. V praxi se volí dvoustěnné až třístěnné. Jednotlivá pouzdra neboli bandáže, mívají mírně kuželovitý tvar, a lisují se do sebe obvykle za studena a s předpětím. Mohou být zalisovány i za tepla, ale to se v praxi příliš neužívá. Průtlačnice (obr. 21) se navrhuje a počítají jako silnostěnné nádoby s přetlakovým vnitřním namáháním. Napětí, která zde vznikají se počítají dle vzorců platících pro přetlakové nádoby namáhané tlakem.

2.5.2 Průtlačníky [3], [13], [14]

Tvar je volen na základě způsobu objemového tváření, pro který je určen. Od geometrie čela se odvíjí namáhání, jakému je vystaven. V případě nástrojů, jenž jsou určeny pro dopředné protlačování, je jejich tvar nejjednodušší a také jsou nejméně namáhány.

Nástroje pro zpětné protlačování (obr. 22) jsou zatěžovány nejvíce, neboť jsou namáhány na tah, tlak i ohyb. Deformační odpor materiálu je závislý na tvaru čelní plochy průtlačníku. Nejvhodnějším tvarem čela je kužel, nebo komolý kužel kde optimální úhel (β) činí 30° . V závislosti na pracovní teplotě i požadavku na tvar dna hotového protlačku je nejčastěji úhel



Obr. 22 Model průtlačníku pro zpětné protlačování

(β) volen 5 až 10° pro pracovní teplotu 20°. Průměr (d) základny komolého kužele na čele nástroje je volen tak, aby d_p^2/d^2 odpovídal přibližně 4, ani toto však není pravidlem. Faseta (a_f), se dle poznatků z praxe osvědčila s šířkou 0,05 až 0,06 d_p . Za fasetou následuje odlehčení zmenšením průměru o 0,1 až 0,2 mm na průměr (d_3). Přejít bývá zpravidla řešen rádiusem, či úkosem. Funkcí odlehčení je snížení stírací síly a tření při toku tvářeného materiálu. Z téhož důvodu je funkční část nástroje (l_k) včetně čela třeba leštit. Části (l_A) a (l_B) slouží pro upnutí do pouzdra průtlačníku. Pouzdro může současně sloužit, jako středící prvek k zajištění sousosti průtlačníku a průtlačnice.

2.5.3 Materiál tvářecích nástrojů [8], [10], [20]

Vysoké mechanické a tepelné namáhání tvářecích nástrojů s sebou přináší vysoké požadavky na materiál, z něhož budou vyrobeny. Materiál musí mít nízkou teplotní roztažnost, odolnost proti velkému tření a vysokou pevnost, tvrdost i houževnatost. Vhodná volba materiálu zásadním způsobem ovlivňuje životnost nástrojů.

Oceli musí být jakostní a mohou obsahovat pouze nepatrné množství síry, fosforu a musí být důkladně dezoxidované. Základní strukturou v těchto ocelích je martenzit. Legury, jako Cr, Ni, Mo, W a V, vytvářejí s uhlíkem karbidy, k jejichž správnému uspořádání je nutné vhodné tepelné zpracování a vykování. Základní druhy nástrojových ocelí jsou uvedeny v tabulce 2.

Tab 2. Oceli pro průtlačníky, průtlačnice, vyhazovače a bandáže [10].

Použití	Označení dle ČSN							
Průtlačníky	19 436	19 437	19 800	19 810	19 824	19 820	19 830	19 423
Průtlačnice	19 721	19 830	19 614	19 436	19 437	19 824	19 826	19 423
Vyhazovač	19 436	19 437	19 423					
Bandáže	13 180	19 650	19 423					

Konkrétní druhy oceli pro výrobu nástrojů jsou voleny podle podmínek, za kterých mají být použity. Zejména záleží na zvolené technologii výroby, druhu i stavu vstupního polotovaru, na rozměrech, tvaru, množství výrobků a požadované velikosti deformace.

Pro dosažení potřebných vlastností již vyrobených nástrojů je nutné vhodné tepelné zpracování v podobě kalení a popouštění. Průtlačníky z chromových a ledeburitických rychlořezných ocelí se kalí a popouštějí na tvrdost 60 až 62 HRC, v případě slitinových ocelí 54 až 58 HRC. Průtlačnice z ledeburitické oceli dosahují tvrdosti 58 až 68 HRC a z rychlořezné oceli 60 až 66 HRC. Bandáže se upravují na tvrdost 40 až 50 HRC, což odpovídá $R_m = 1\,225$ MPa až $1\,765$ MPa.

2.6 Výpočtové vztahy [8], [10], [13], [14]

Výpočtových vztahů pro tváření oceli za studena existuje celá řada, neboť průběh tváření, chování tvářeného materiálu na základě znalosti fyzikálních i chemických vlastností se snažil matematicky popsat ne jeden vědec. Mezi nejznámější patří Feldman, Unksov, Geleji, Thomson, Siebel, Dipper. Jejich vzorce a vztahy pro různé způsoby tváření se v praxi dobře osvědčily. Výsledky, které vzejdou z matematických výpočtů slouží pro možnost návrhu technologického postupu, dimenzování nástrojů i tvářecích strojů. Avšak je nutno brát v úvahu, že výsledky výpočtů dle jednotlivých autorů vztahů se od sebe budou více či méně lišit. Toto je dáno způsoby výpočtu, nemožností dokonale matematicky popsat geometrii nástrojů i tvářených dílů, či vstupními parametry, jako je například tření. Výsledné vypočtené hodnoty pro sílu lisu se budou lišit oproti výsledku naměřeném přímo u stroje. To mimo jiné i z důvodu různých chemických složení a fyzikálních vlastností jednotlivých vstupních materiálů.

Zpětné protlačování [13] (obr. 23):

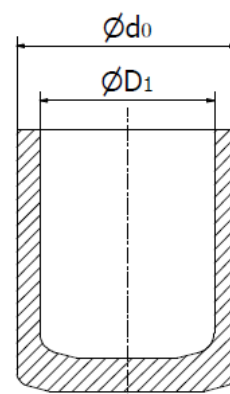
- Logaritmičké přetvoření

$$\varphi = \ln \frac{S_0}{S_0 - S_1} = \ln \frac{d_0^2}{d_0^2 - D_1^2} [-], \quad (2.2)$$

- Změna příčného průřezu,

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{S_0 - S_1}{S_0}\right) \cdot 100 = \frac{D_1^2}{d_0^2} \cdot 100 [\%], \quad (2.3)$$

kde: ε – změna příčného průřezu [%],
 φ – logaritmičké přetvoření [-],
 d_0 – vnější průměr před protlačáním [mm],
 D_1 – vnitřní průměr po protlačení [mm],
 S_0 – plocha průřezu před protlačáním [mm²],
 S_1 – plocha průřezu pop protlačení [mm²].



Obr. 23 Zpětné protlačování [13]

Dopředné protlačování plného tělesa [13] (obr. 24):

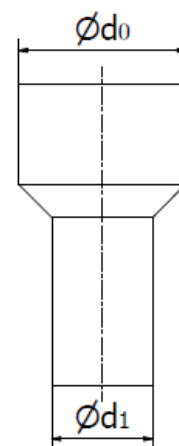
- Logaritmičké přetvoření

$$\varphi = \ln \frac{S_0}{S_1} = \ln \frac{d_0^2}{d_1^2} [-]. \quad (2.4)$$

- Změna příčného průřezu:

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{S_0 - S_1}{S_0}\right) \cdot 100 = \frac{d_0^2 - d_1^2}{d_0^2} \cdot 100 [\%], \quad (2.5)$$

kde: d_1 – vnější průměr po protlačení [mm].



Obr. 24 Dopředné protlačování plného tělesa [13]

Dopředné protlačování dutého tělesa [13] (obr. 25):

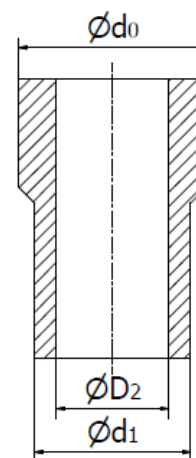
- Logaritmičké přetvoření

$$\varphi = \ln \frac{S_0 - S_2}{S_1 - S_2} = \ln \frac{D_0^2 - D_2^2}{D_1^2 - D_2^2} [-]. \quad (2.6)$$

- Změna příčného průřezu

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{S_1}{S_0}\right) \cdot 100 = \frac{D_0^2 - d_1^2}{D_0^2 - D_2^2} \cdot 100 [\%], \quad (2.7)$$

kde: D_2 – vnitřní průměr [mm],
 S_2 – plocha průřezu vnitřního otvoru [mm²].



Obr. 25 Dopředné protlačování dutého tělesa [13]

Pro řešení zpětného protlačování podle se často využívá vztahu podle Siebela, jedná se o osvědčený způsob pro výpočty protlačování ocelových i mosazných kalíšků, kde stěna má větší tloušťku, než desetina průtlačníku. [13]

- Vztah pro výpočet deformačního odporu při zpětném protlačování dle Siebela [13]

$$\sigma_d = 1,152 \cdot \frac{d_0^2}{D_1^2} \cdot \sigma_p \cdot \left(\log \frac{d_0^2}{d_0^2 - D_1^2} + \frac{d_0^2}{d_0^2 - D_1^2} \cdot \log \frac{d_0^2}{D_1^2} + \log \frac{D_1^2}{d_0^2 - D_1^2} \right) [MPa], \quad (2.8)$$

kde: σ_d – deformační přetvárný odpor [MPa],
 σ_p – přirozený přetvárný odpor [MPa].

- Vztah pro výpočet deformačního přetvárného odporu při dopředném protlačování plného tělesa podle Gelejho [14]:

$$\sigma_d = \sigma_p \frac{1}{1 - \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{d_1}{d_0}\right) \cdot \left(1 + \frac{f}{\sin(\alpha)}\right)} [MPa], \quad (2.9)$$

kde: α – poloviční úhel protlačovaného kužele [°],
 f – součinitel tření [-]

- Vztah pro výpočet tažné síly lisu

$$F_{taž} = S \cdot \sigma_p [kN], \quad (2.10)$$

kde: $F_{taž}$ – tažná síla [kN]

- Vztah pro výpočet protlačovací síly lisu [1] (platí pro všechny způsoby protlačování)

$$F_p = \sigma_d \cdot S_p [kN], \quad (2.11)$$

kde: F_p – protlačovací síla [kN],
 S_p – funkční plocha nástroje [mm²].

- Vztah pro výpočet přetvárné práce [13] (platí pro všechny způsoby protlačování)

$$A = V \cdot \int_0^z \sigma_d \cdot d\varphi = A_j \cdot V [J], \quad (2.12)$$

kde: A – přetvárná práce [J]
 A_j – měrná přetvárná práce [J · mm³],
 V – objem přetvořeného materiálu [mm³],
 $d\varphi$ – přírůstek logaritmické deformace [s⁻¹].

- Vztah pro výpočet celkového logaritmického přetvoření

$$\varphi_c = |\varphi_1| + |\varphi_2| [-] \quad (2.13)$$

kde: φ_c – celkové logaritmické přetvoření v jedné operaci [-],

- Vztah pro výpočet celkového příčného zúžení

$$\varepsilon_c = |\varepsilon_1| + |\varepsilon_2| [%] \quad (2.14)$$

kde: ε_c – celkové změna příčného průřezu v jedné operaci [%],

- Vztah pro výpočet celkové přetvárné práce

$$A_c = A_1 + A_2 [-] \quad (2.15)$$

kde: A_c – celková přetvárná práce [J],

- Vztah pro výpočet kvadratického modulu průřezu (kruhový průřez)

$$I_p = \frac{\pi \cdot D^4}{64} [mm^4] \quad (2.16)$$

kde: I_p – kvadratický modul průřezu [mm⁴]

- Vztah pro výpočet kritické vzpěrné síly prutu dle Eulera

$$F_v = \frac{\alpha_v^2 \cdot E_p \cdot I_p}{l_k^2} \text{ [kN]} \quad (2.17)$$

kde: E_p – modul pružnosti v tahu [Pa],
 F_v – kritická síla [kN]
 l_k – vzpěrná délka průtlačníku [mm],
 $\alpha_v = \frac{\pi}{2}$ – součinitel pro prut s volným koncem [-].

- Vztah pro výpočet poloměru setrvačnosti průřezu

$$i_y = \sqrt{\frac{I_p}{S}} \text{ [mm]}, \quad (2.18)$$

kde: i_y – poloměr setrvačnosti průřezu [mm],
 S – plocha průřezu [mm²].

- Vztah pro výpočet štíhlosti

$$\lambda = \sqrt{\frac{l_k}{i_y}} \text{ [-]}, \quad (2.19)$$

kde: λ – skutečná štíhlost [-]

- Vztah pro výpočet mezní štíhlosti

$$\lambda_k = \sqrt{\frac{\alpha_v^2 \cdot E_p}{\sigma_{kt}}} \text{ [-]}, \quad (2.20)$$

kde: λ_k – mezní štíhlost [-],
 σ_{kt} – mez kluzu materiálu v tlaku [MPa]

- Pravidla pro vztah mezi λ a λ_k

Případ, kdy není průřez průtlačníku dostatečný je mezním stavem vzpěrná stabilita:

$$\lambda \geq \lambda_k \Rightarrow F_v = \frac{\alpha_v^2 \cdot E_p \cdot I_p}{l_k^2} \Rightarrow k_v = \frac{F_v}{F_c} \geq k_d \quad (2.21)$$

kde: k_v – mezní stav pevnosti [-],
 k_d – koeficient bezpečnosti [-].

Případ, kdy má průtlačník dostatečný průřez je mezním stavem mez pružnosti:

$$\lambda < \lambda_k \Rightarrow \sigma = \frac{F_c}{S} \text{ [MPa]} \Rightarrow k_k = \frac{\sigma_{kt}}{\sigma} \text{ [MPa]} \Rightarrow k_k > k_d \quad (2.22)$$

kde: k_k – poměr mezi mezí kluzu v tlaku a působícím napětím [-]
 σ – napětí působící na průtlačník [MPa].

- Vztah pro výpočet radiálního napětí podle Bosche [5]

$$\sigma_r = p_1 \cdot \frac{1}{a^2 - r_1^2} \cdot \left(1 - \frac{r_2^2}{r_1^2}\right) \text{ [Mpa]}, \quad (2.23)$$

kde: $a = \frac{r_2}{r_1}$ – poměr vnějšího a vnitřního poloměru [MPa],
 σ_r – radiální napětí [MPa],
 r_1 – vnitřní poloměr průtlačnice, či bandáže [mm],
 r_2 – vnější poloměr průtlačnice, či bandáže [mm],
 $\sigma_d = p_1$ – vnitřní tlak [MPa],

3 NÁVRH ŘEŠENÍ VÝROBY [1], [10], [13], [14], [21], [23], [24], [25]

Návrh výrobku i technologický postup je třeba zhotovit tak, aby vyhovoval rozměrovým, tvarovým i pevnostním požadavkům zákazníka na výsledný výrobek. A to vše v souladu se zásadami technologičnosti součásti.

Tento výrobek je určen pro montáž do vysokotlakých hydraulických strojních systémů, ve kterých bývá namáhán teplem, vibracemi a tlakem hydraulického oleje. Na základě těchto aspektů je po výsledném výrobku požadována vysoká pevnost, která musí činit ve dně minimálně 500 MPa, smluvní mez kluzu materiálu ve stěnách $R_{p0,2}$ minimálně 450 MPa, zbytkovou tažnost A_5 minimálně 8 % a tím také vysokou mez únavy. Současně je vyžadována příznivá cena.

Materiálem byla zvolena ocel C15R +U kruhového průřezu o průměru 104 mm, která je vhodná k protlačování. Jedná se o nízkouhlíkovou cementační ocel se zaručeným nízkým obsahem fosforu i síry, dodávanou bez tepelného zpracování.

Chemické složení oceli C15R je uvedeno v tabulce 3. Pro výpočty byla jako náhrada o velice podobném chemickém složení zvolena ocel 12 024.1, jejíž chemické složení je uvedeno v tabulce 4. Graf přirozených přetvárných odporů a jednotkové práce (A_j) je součástí přílohy 1. Ocel určená pro výpočty je tepelně zpracována normalizačním žiháním a v příloze 1 je rovněž zobrazen snímek tvaru i velikosti zrn a feriticko perlitické struktury při zvětšení 500 \times . Příloha 2 obsahuje snímky pořízené metalografickým mikroskopem Zeiss AxioCam/Cc5 zvětšené 200 \times , 500 \times a 1 000 \times . Ze snímků je zřejmé, že struktura obou ocelí je velice podobná. Pevnost oceli 12 024.1 v tahu je dle ČSN 41 2024 min 390 MPa [24]. V případě C15R +U je tvrdost v dodaném stavu v rozmezí 127 HBW – 140 HBW (příloha 2), to dle ČSN 18265 [25] odpovídá pevnosti $R_m = 430$ MPa – 480 MPa. Na základě chemického složení a metalografické struktury obou ocelí i pevnosti lze tedy předpokládat obdobné vlastnosti pro tváření.

Tab 3. Chemické složení použité oceli C15R (příloha 2).

Chemické složení [%]									
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al
0,16	0,49	0,29	0,017	0,025	0,09	0,03	0,02	0,011	0,025

Tab 4. Chemické složení oceli 12024.1 (příloha 1) [21].

Chemické složení [%]									
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al
0,24	0,56	0,30	0,011	0,020	0,09	0,03	0,07	0	0,009

3.1 Technologické výpočty [1], [13], [14],

Nejprve je třeba určit celkový objem a váhu výrobku. Vychází se z předpokladu zachování objemu, tedy že objem hotového výrobku je roven objemu výchozího polotovaru. Dle programu Inventor 2021 je objem roven 481 016 mm³ a váha tělesa je (při hustotě oceli $\rho = 7,850$ g · cm⁻³) = 3,78 kg.

Průměr výchozího polotovaru je stanoven na 104 mm, což zajistí dostatečný průměr pro redukci tloušťky stěny ve druhé operaci. Na základě praktických zkušeností z výroby součástí tohoto typu je vypočítaná hmotnost materiálu navýšena o 2 %, což je dostatečné pro pokrytí nepřesnosti při řezání i přetoků materiálu na hotovém výrobku a současné zajištění plného vylišování dílu dle požadavků výkresové dokumentace.

Jednotlivé výpočty budou provedeny za pomoci známých vztahů pro výpočet hmotnosti a objemu těles, jsou to:

- Výpočet objemu součásti ze stanovené hmotnosti přířezu

$$m_{pr} = m_v \cdot 1,02 = 3,78 \cdot 1,02 = 3,86 \text{ kg}$$

$$V_{pr} = \frac{3860}{7,85 \cdot 10^{-6}} = 491720 \text{ mm}^3,$$

- Výpočet délky přířezu z objemu součásti:

$$V_{pr} = \pi \cdot \frac{d_p^2}{4} \cdot l_{PŘÍŘEZ} [\text{mm}],$$

$$l_{pr} = \frac{4 \cdot V_{pr}}{\pi \cdot d_{pr}^2} = \frac{4 \cdot 491720}{\pi \cdot 104^2} = 57,88 \text{ mm},$$

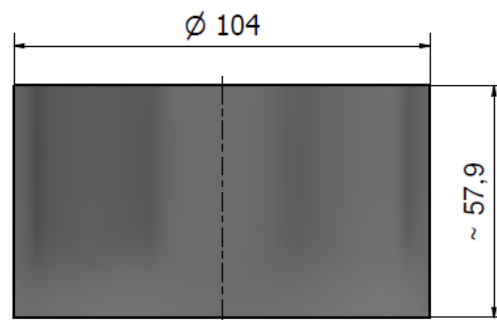
kde je: $m_{VÝR}$ – hmotnost hotového výrobku [kg],

m_{pr} – hmotnost přířezu [kg],

V_{pr} – objem válce [mm^3],

l_{pr} – délka přířezu [mm],

D_{pr} – průměr výchozího polotovaru [mm].



Obr. 26 Vyobrazení přířezu (kaloty)

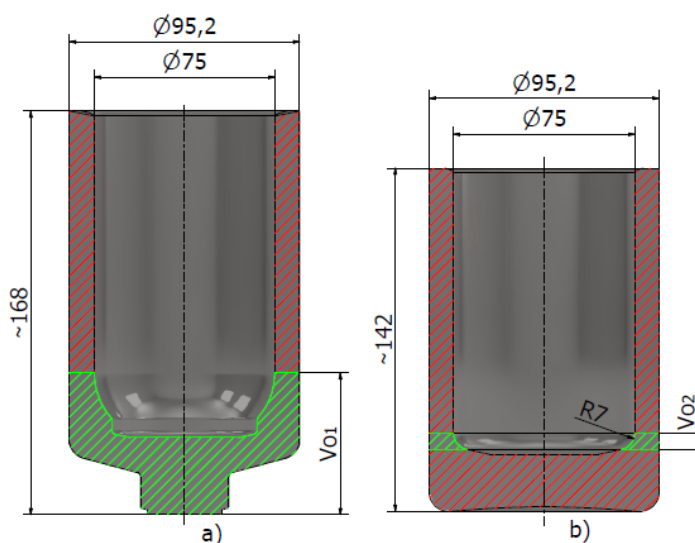
Provedenými výpočty, jejich zaokrouhlením a zohledněním přídavku materiálu byly stanoveny rozměry výchozího polotovaru na $\text{Ø}104 \times 57,9$ a váhu 3860 g (obr. 26).

Součást bude vyrobena ve dvou tvářecích operacích s mezioperačním rekrytalizačním žiháním před druhou operací. V první operaci bude zpětným protlačováním vyroben kalíšek s osazením pro správné založení ve 2. tvářecí operaci. V té dojde dopředným protlačováním dutého tělesa ke zmenšení vnějšího průměru a zvětšení celkové délky. Při dosednutí protlačku na spodní část průtláčnice bude dopředným protlačováním vylisován šestihran. Následně dojde prostřednictvím zpětného protlačování k přemístění přebytečného materiálu ze dna do stěn protlačku.

I kdyby zásady technologičnosti výrobku dovolily jej vyrobit v jedné operaci, nebylo by to nikterak výhodné, protože jako první by byl vylisován šestihran a následný vysoký tlak vyvolaný zpětným protlačováním by měl destruktivní vliv na spodní díl průtláčnice, kde v zaoblených rozích šestihranu způsobuje trhliny již po vylisování několika desítek kusů.

Výše zmíněný důvod pro výrobu tohoto dílu nejméně ve dvou operacích je opřen o praktické poznatky z výroby výlisků tohoto typu. Klíčové je provést protlačení šestihranu v poslední operaci, před kterou bude díl rekrytalizačně vyžihán.

Na základě praktických zkušeností je pro stanovení tloušťky dna pro první operaci nutné vycházet z objemu spodní části hotového výrobku (V_{01}), která je počítána od počátku přechodu vnitřního průměru 75 mm a rádiusu R28, viz obr. 27a.



Obr. 27 Objemy V_{01} a V_{02} pro výpočet tloušťky dna

Potřebné objemy pro výpočty v obou operacích jsou vypočítány v programu Inventor 2021 a jsou obsahem přílohy 3. Objem spodní části finálního výrobku roven 186 813 mm³. Od tohoto objemu je třeba odečíst objem materiálu prstence V_{O2} s vnitřním rádiusem R7, který je označen na obr. 27b u dílu ve 2. tvářecí operaci, na němž již došlo k redukci tloušťky stěny. Objem tohoto prstence je 20 664 mm³.

Samotná tloušťka dna je spočítána pro Ø 95,2 za pomoci známých vzorců pro výpočet objemu těles, kde: V_{O1} = 186 813 mm³, V_{O2} = 20 664 mm³,
Ød = 95,2 mm, h_d – tloušťka dna.

- Výpočet tloušťky dna

$$h_d = \frac{V_{o1} - V_{o2}}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} = \frac{186\,813 - 20\,664}{\frac{\pi \cdot 95,2^2}{4}} = 23,34 \text{ mm}$$

Potřebná tloušťka dna protlačku po 1. tvářecí operaci je zaokrouhlena na 23,5 mm s tolerancí ±0,5 mm. Tato tloušťka plně postačí jako zásoba materiálu pro plné protlačení a vytvarování spodní části dílu ve 2. tvářecí operaci.

3.1.1 Výpočty pro 1. tvářecí operaci [8], [10], [11], [14], [18], [21]

Pro první tvářecí operaci jsou přířezy bez tepelného zpracování fosfátovány a mýdlovány, hodnoty σ_p a A_j jsou k jednotlivým hodnotám přetvoření φ odečítány z grafu přetvárných odporů a měrné přetvárné práce pro ocel 12 024.1 (viz příloha 1). Z tohoto grafu je zřejmé, že podmínka maximálního přetvoření je: $\varphi \in < 0; 1,64 >$. Objem přetvořeného materiálu je na základě přetvořených oblastí vypočten programem Inventor 2021. Hodnoty přípustných logaritmičkových přetvoření a změn příčných průřezů jsou zapsány v tabulce 5.

Samotná 1. operace je složena ze dvou fází, kdy ve fázi a) je dopředným protlačováním plného tělesa na výchozí kalotě o průměru 104 mm vytvořeno zúžení průměru na 95,2 mm, které slouží jako zaváděcí část pro správné usazení protlačku do průtláčnice ve 2. tvářecí operaci. Ve fázi b) je zpětným protlačováním vytvořen kalíšek o vnějším průměru 104,2 mm, vnitřním průměru 75,2 mm, výškou 102 mm a tloušťkou dna 23,5 mm.

Protlačovaný polotovar je fosfátován a mýdlován, proto lze pro součinitel tření zvolit hodnotu $f = 0,05$ [1]. Simulace procesu tváření 1. operace je součástí přílohy 4.

Tab 5. Přípustná přetvoření v jedné operaci [2].

Způsob protlačování	Ocel	
Zpětné	$\varphi \cdot 10^2$	50 – 140
	ε [%]	40 – 70
Dopředné	$\varphi \cdot 10^2$	90 – 300
	ε [%]	60 – 95

a) Dopředné protlačování plného tělesa (obr. 28),

kde: Ø d₀ = 104 mm, Ø d₁ = 95,2 mm,
V = 214 272 mm³, f = 0,05,
 $\alpha = 20^\circ$.

- Logaritmičkové přetvoření je vypočteno dle vztahu (2.4)

$$\varphi_{1a} = \ln \frac{d_0^2}{d_1^2} = \ln \frac{104^2}{95,2^2} = 0,177$$

Hodnota logaritmičkého přetvoření φ_{1a} je zaokrouhlena na 0,18.

- Podmínka maximálního přetvoření
 $\varphi_{1a} = 0,18 \in < 0; 1,64 > \Rightarrow$ vyhovuje
- Změna příčného průřezu je vypočtena dle vztahu (2.5)

$$\varepsilon_{1a} = \frac{d_0^2 - d_1^2}{d_0^2} \cdot 100 = \frac{104^2 - 95,2^2}{104^2} \cdot 100 = 16,2 \%$$

Pro logaritmické přetvoření $\varphi_{1a} = 0,18$ byly z grafu přetvárných odporů odečteny hodnoty přirozeného přetvárného odporu $\sigma_p = 725$ MPa a měrné přetvárné práce $A_j = 0,1 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}$.

- Deformační odpor pro dopředné protlačování plného tělesa podle Gelejiho je vypočten dle vztahu (2.9)

$$\sigma_d = \sigma_p \frac{1}{1 - \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{d_1}{d_0}\right) \cdot \left(1 + \frac{f}{\sin(\alpha)}\right)} = 725 \cdot \frac{1}{1 - \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{95,2}{104}\right) \cdot \left(1 + \frac{0,05}{\sin(20)}\right)} = 761,97 \text{ MPa}$$

Hodnota deformačního odporu σ_d je zaokrouhlena na 762 MPa.

- Síla pro dopředné protlačení plného tělesa je vypočtena dle vztahu (2.11)

$$F_{p1a} = S_p \cdot \sigma_d = \frac{\pi \cdot 104^2}{4} \cdot 762 = 6\,473\,088,5 \text{ N}$$

Vypočtená tvářecí síla F_{p1a} je zaokrouhlena na 6 473 kN.

- Přetvárná práce pro dopředné protlačování plného tělesa je vypočtena dle vztahu (2.12)

$$A_{1a} = V \cdot \int_0^z \sigma_d \cdot d\varphi = A_j \cdot V = 0,1 \cdot 214\,272 = 21\,427,2 \text{ J}$$

Vypočtená přetvárná práce A_{1a} je zaokrouhlena na 21,43 kJ

b) Zpětné protlačování (obr. 29),

$$\varnothing d_0 = 104,2 \text{ mm}$$

$$\varnothing D_1 = 75,2 \text{ mm}$$

$$V = 339\,241 \text{ mm}^3$$

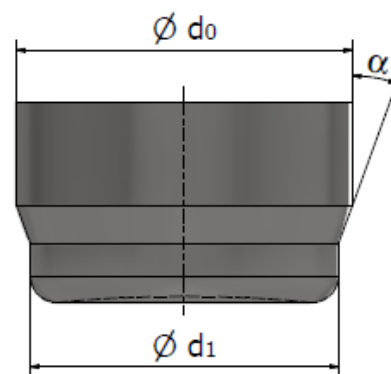
- Logaritmické přetvoření je vypočteno dle vztahu (2.2)

$$\varphi_{1b} = \ln \frac{d_0^2}{d_0^2 - D_1^2} = \ln \frac{104,2^2}{104,2^2 - 75,2^2} = 0,74$$

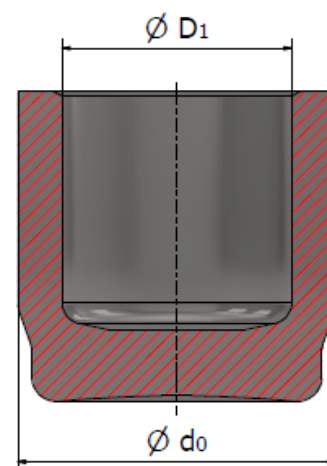
- Podmínka maximálního přetvoření
 $\varphi_{1b} = 0,74 \in < 0; 1,64 > \Rightarrow$ vyhovuje
- Změna příčného průřezu je vypočtena dle vztahu (2.3)

$$\varepsilon_{1b} = \frac{D_1^2}{d_0^2} \cdot 100 = \frac{75,2^2}{104^2} \cdot 100 = 52,2 \%$$

Pro logaritmické přetvoření $\varphi_{1b} = 0,74$ byly z grafu přetvárných odporů odečteny hodnoty přirozeného přetvárného odporu $\sigma_p = 830$ MPa a měrné přetvárné práce $A_j = 0,55 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}$



Obr. 28 Dopředné protlačování v 1. op. fáze a)



Obr. 29 Zpětné protlačování 1. op. fáze b)

- Deformační odpor pro zpětné protlačování podle Siebela je vypočten dle vztahu (2.8)

$$\begin{aligned}\sigma_d &= 1,152 \cdot \frac{d_0^2}{D_1^2} \cdot \sigma_p \cdot \left(\log \frac{d_0^2}{d_0^2 - D_1^2} + \frac{d_0^2}{d_0^2 - D_1^2} \cdot \log \frac{d_0^2}{D_1^2} + \log \frac{D_1^2}{d_0^2 - D_1^2} \right) \\ &= 1,152 \cdot \frac{104,2^2}{75,2^2} \cdot 830 \\ &\quad \cdot \left(\log \frac{104,2^2}{104,2^2 - 75,2^2} + \frac{104,2^2}{104,2^2 - 75,2^2} \cdot \log \frac{104,2^2}{75,2^2} \right. \\ &\quad \left. + \log \frac{75,2^2}{104,2^2 - 75,2^2} \right) = 1\,738,46 \text{ MPa},\end{aligned}$$

Vypočtená hodnota deformačního odporu σ_d je zaokrouhlena na 1 740 MPa.

- Síla pro zpětné protlačování je vypočtena dle vztahu (2.11)

$$F_{p1b} = S_p \cdot \sigma_d = \frac{\pi \cdot 75^2}{4} \cdot 1\,740 = 7\,687\,084 \text{ N}.$$

Vypočtená tvářecí síla F_{p1b} je zaokrouhlena na 7 690 kN.

- Přetvárná práce pro dopředné protlačování plného tělesa je vypočtena dle vztahu (2.12)

$$A_{1b} = V \cdot \int_0^z \sigma_d \cdot d\varphi = A_j \cdot V = 0,55 \cdot 339\,241 = 186\,582,55 \text{ J}$$

Vypočtená přetvárná práce A_{1b} je zaokrouhlena na 186 kJ

- Celkové logaritmické přetvoření φ_c v 1. tvářecí operaci

$$\varphi_{c1} = |\varphi_{1a}| + |\varphi_{1b}| = 0,18 + 0,74 = 0,92$$

- Celkové příčné zúžení v 1. tvářecí operaci

$$\varepsilon_{c1} = |\varepsilon_{1a}| + |\varepsilon_{1b}| = 16,2 + 52,2 = 68,4 \%$$

- Celková přetvárná práce A_c v první tvářecí operaci

$$A_{c1} = A_{1a} + A_{1b} = 21,43 + 186,6 = 208,03 \text{ kJ}$$

Celková přetvárná práce v 1. tvářecí operaci A_{c1} je zaokrouhlena na 208 kJ.

Porovnáním výsledků sil vypočtených v 1. tvářecí operaci, kde $F_{p1a} = 6\,473 \text{ kN}$ a $F_{p1b} = 7\,690 \text{ kN}$, je zřejmé, že celková protlačovací síla F_c potřebná pro protlačení výlisku v 1 tvářecí operaci je 7 690 kN.

3.1.2 Výpočty pro 2. tvářecí operaci [9], [13], [14], [18], [21]

Před druhou tvářecí operací je polotovar rekrytalizačně vyžhán a je na něm provedena povrchová úprava fosfátováním a mýdlováním. Hodnoty přetvárných odporů σ_p a přetvárných prací A_j jsou pro jednotlivé hodnoty přetvoření φ odečítány z grafu přetvárných odporů pro ocel 12 024.1 (viz příloha 1).

Operace je složena z několika fází. Fáze a) je specifická tím, že pro dopředné protlačování dutého tělesa je zde využit princip tažení se ztenčením stěny. Tím je přetvořen vnější průměr 104,2 mm na průměr 95,2 mm v celé výšce kalíšku a současně dojde k celkovému prodloužení protlačku na 142 mm. Ve fázi b₁) je dopředným protlačováním vylisován šestihran a současně je ve fázi b₂) formou zpětného protlačování část materiálu vytlačena do stěn protlačku. Ve fázi c) je zpětným protlačováním zajištěno plné dotvarování a kalibrace dna i šestihranu. Přebytný materiál tloušťky dna je následně vytlačen do stěny výlisku. Proces tváření ve 2. operaci je vyobrazen v simulaci, jenž je součástí přílohy 4.

a) Dopředné protlačování dutého tělesa (tažením), model pro výpočet je znázorněn na obr. 30

$$\begin{aligned} \text{kde: } \varnothing d_0 &= 104,2 \text{ mm}, & \varnothing d_1 &= 95,2 \text{ mm}, \\ \varnothing D_2 &= 75 \text{ mm}, & V &= 333\,579 \text{ mm}^3, \\ f_1 = f_2 &= 0,05, & \alpha &= 15^\circ. \end{aligned}$$

- Logaritmické přetvoření je vypočteno dle vztahu (2.6)

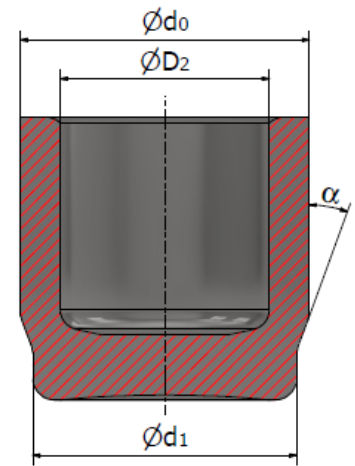
$$\varphi_{2a} = \ln \frac{d_0^2 - D_2^2}{d_1^2 - D_2^2} = \ln \frac{104,2^2 - 75^2}{95,2^2 - 75^2} = 0,42$$

- Podmínka maximálního přetvoření

$$\varphi_{2a} = 0,42 \in \langle 0; 1,64 \rangle \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

- Změna příčného průřezu je vypočtena dle vztahu (2.7)

$$\begin{aligned} \varepsilon_{2a} &= \frac{d_0^2 - d_1^2}{d_0^2 - D_2^2} \cdot 100 = \frac{104,2^2 - 95,2^2}{104,2^2 - 75^2} \cdot 100 \\ &= 34 \% \end{aligned}$$



Obr. 30 Dopředné protlačování 2. OP, fáze a)

V této fázi průtlačník táhne mezikruží, jenž je rovno rozdílu ploch S_0 a S_1 . Hodnoty přetvoření byly vypočteny pomocí vztahů pro dopředné protlačování dutého tělesa. Pro logaritmické přetvoření $\varphi_{2a} = 0,42$ byla z grafu přetvárných odporů odečtena hodnota $\sigma_p = 820 \text{ MPa}$, kterou lze v tomto případě uvažovat jako mez kluzu materiálu při výpočtu tažné síly. Měrná přetvárná práce dosahuje hodnoty $A_j = 0,28 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}$.

- Tažná síla je vypočtena dle vztahu (2.10)

$$F_{t2a} = S \cdot \sigma_p = \frac{\pi \cdot (S_0^2 - S_1^2)}{4} \cdot 820 = 1\,155\,769,95 \text{ N}$$

Vypočtená tažná síla F_{p2a} je zaokrouhlena na 1 156 kN.

- Přetvárná práce pro dopředné protlačování ve fázi a) je vypočtena dle vztahu (2.12)

$$A_{2a} = V \cdot \int_0^z \sigma_d \cdot d\varphi = A_j \cdot V = 0,28 \cdot 333\,579 = 93\,402,12 \text{ J}$$

Vypočtená přetvárná práce A_{2a} je zaokrouhlena na 93,4 kJ

Ve fázi a) je tažením redukována tloušťka stěny v celé délce protlačku, za současného prodloužení. Tím je zajištěno její rovnoměrné zpevnění, aniž by byla vyčerpána plasticita dna, které tak zůstává bez přetvoření. Volba výpočtu metodou tažení se ztenčením stěny je podložena simulací vytvořené v programu Simufact Forming, která je součástí v přílohy 4. Výstupem je rovněž graf tvářecí síly v závislosti na zdvihu. Hodnota síly získaná výpočtem, $F_{t2a} = 1\,156 \text{ kN}$ je srovnatelná se silou v grafu, kde je rovna přibližně 1 000 kN. Pro ověření byla fáze a) vypočtena i s uvažováním dopředného protlačování dutého tělesa (viz příloha 5), s výpočtem podle Feldmana, kde je i při zanedbání plnicího kontejneru výsledná síla rovna asi 5 000 kN, čímž pětinasobně překračuje sílu vypočtenou simulací.

b) Kombinace dopředného protlačování plného tělesa a zpětného protlačování

Fáze b) je složena ze dvou částí, b_1 a b_2 , z důvodu dvou současně probíhajících způsobů protlačování. Průměr d_{1b1} je roven střední hodnotě kružnic vepsané a opsané šestiúhelníku o vzdálenosti stran 32 mm, to je rovno 34,5 mm. Ze simulace procesu tváření (viz obr. 32) je zřejmé, že při redukcí z průměru d_{0b1} na průměr d_{1b1} dochází ke skluzu v materiálu pod úhlem 45° , neboť zde smyková napětí τ_{max} dosahují nejvyšších hodnot (značeno červenou barvou). Součinitel tření je zvolen $f = 0,5$ [1].

- b_1) Dopředné protlačování plného tělesa (obr. 31),

$$\text{kde: } \varnothing d_{0b1} = 60,4 \text{ mm}, \quad \varnothing d_{1b1} = 34,5 \text{ mm},$$

$$\alpha = 45^\circ, \quad f = 0,5,$$

$$V = 15\,990 \text{ mm}^3.$$

- Logaritmičké přetvoření je vypočteno dle vztahu (2.4)

$$\varphi_{2b1} = \ln \frac{d_{0b1}^2}{d_{1b1}^2} = \ln \frac{60,4^2}{34,5^2} = 1,12$$

- Podmínka maximálního přetvoření
 $\varphi_{2b} = 1,12 \in < 0; 1,64 > \Rightarrow$ vyhovuje

- Příčné zúžení je vypočteno dle vztahu (2.5)

$$\varepsilon_{2b1} = \frac{d_{0b1}^2 - d_{1b1}^2}{d_{0b1}^2} \cdot 100 = \frac{60,4^2 - 34,5^2}{60,4^2} \cdot 100$$

$$= 67,4 \%$$

Pro logaritmičké přetvoření $\varphi_{2b1} = 1,12$ byly z grafu přetvárných odporů odečteny hodnoty deformačního odporu $\sigma_p = 850 \text{ MPa}$ a měrné přetvárná práce $A_j = 0,82 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}$.

- Deformační odpor u dopředného protlačování plného tělesa podle Gelejiho je vypočten dle vztahu (2.9)

$$\sigma_d = \sigma_p \cdot \frac{1}{1 - \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{d_{1b1}}{d_{0b1}}\right) \cdot \left(1 + \frac{f}{\sin(\alpha)}\right)} = 850 \cdot \frac{1}{1 - \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{34,5}{60,4}\right) \cdot \left(1 + \frac{0,5}{\sin(45)}\right)}$$

$$= 1\,340,7 \text{ MPa}$$

Vypočtená hodnota deformačního odporu σ_d je zaokrouhlena na 1 341 MPa.

- Tvářecí síla pro dopředné protlačování ve fázi b₁) je vypočtena dle vztahu (2.11)

$$F_{p2b1} = S_p \cdot \sigma_d = \frac{\pi \cdot 60,4^2}{4} \cdot 1341 = 3\,839\,445 \text{ N}$$

Vypočtená tvářecí síla F_{p2b1} je zaokrouhlena na 3 840 kN.

- Přetvárná práce pro dopředné protlačování ve fázi b₁) je vypočtena dle vztahu (2.12)

$$A_{2b1} = V \cdot \int_0^z \sigma_d \cdot d\varphi = A_j \cdot V = 0,82 \cdot 15\,990$$

$$= 13\,111,8 \text{ J}$$

Přetvárná práce A_{2b1} je zaokrouhlena na 13,1 kJ.

- b₂) Zpětné protlačování mezikruží (viz obr. 32),

$$\text{kde: } \varnothing d_0 = 95,2 \text{ mm}, \quad \varnothing D_{1L} = (75^2 - 60,4^2)$$

$$V = 14\,305 \text{ mm}^3.$$

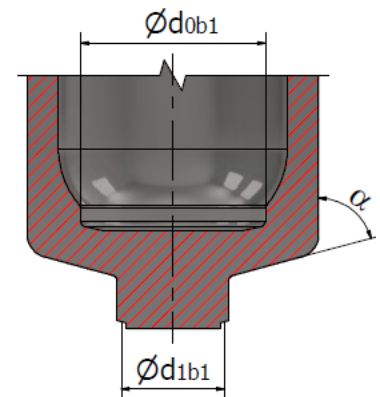
- Logaritmičké přetvoření je vypočteno dle vztahu (2.2)

$$\varphi_{2b2} = \ln \frac{d_0^2}{d_0^2 - D_{1L}^2} = \ln \frac{95,2^2}{95,2^2 - (75^2 - 60,4^2)} = 0,25$$

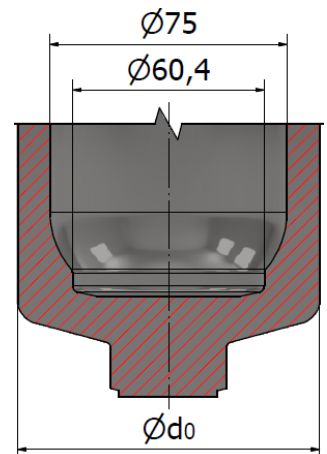
- Podmínka maximálního přetvoření
 $\varphi_{2b2} = 0,25 \in < 0; 1,64 > \Rightarrow$ vyhovuje

- Změna příčného průřezu je vypočtena dle vztahu (2.3)

$$\varepsilon_{2b2} = \frac{D_{1L}^2}{d_0^2} \cdot 100 = \frac{(75^2 - 60,4^2)}{95,2^2} \cdot 100 = 21,8 \%$$



Obr. 31 Dopředné protlačování plného tělesa 2. op. fáze b₁)



Obr. 32 Zpětné protlačování 2. op. fáze b₂)

Pro logaritmické přetvoření $\varphi_{2b2} = 0,25$ byly z grafu přetvárných odporů odečteny hodnoty $\sigma_p = 750 \text{ MPa}$ a měrná přetvárná práce $A_j = 0,15 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}$.

- Deformační odpor u zpětného protlačování podle Siebela je vypočten dle vztahu (2.8)

$$\begin{aligned} \sigma_d &= 1,152 \cdot \frac{d_0^2}{D_{1L}^2} \cdot \sigma_p \cdot \left(\log \frac{d_0^2}{d_0^2 - D_{1L}^2} + \frac{d_0^2}{d_0^2 - D_{1L}^2} \cdot \log \frac{d_0^2}{D_{1L}^2} + \log \frac{D_1^2}{d_0^2 - D_{1L}^2} \right) \\ &= 1,152 \cdot \frac{95,2^2}{(75^2 - 60,4^2)} \cdot 750 \\ &\quad \cdot \left(\log \frac{95,2^2}{95,2^2 - (75^2 - 60,4^2)} + \frac{95,2^2}{95,2^2 - (75^2 - 60,4^2)} \right. \\ &\quad \left. \cdot \log \frac{95,2^2}{(75^2 - 60,4^2)} + \log \frac{(75^2 - 60,4^2)}{95,2^2 - (75^2 - 60,4^2)} \right) = 1\,577,3 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Vypočtená hodnota deformačního odporu σ_d je zaokrouhlena na 1 580 MPa.

Plocha S_p je vypočtena z mezikruží průměrů 75 mm a 60,4 mm.

- Tvářecí síla ve fázi b₂) je vypočtena dle vztahu (2.11)

$$F_{p2b2} = S_p \cdot \sigma_d = \frac{\pi \cdot (75^2 - 60,4^2)}{4} \cdot 1580 = 2\,453\,118,3 \text{ N}$$

Vypočtená tvářecí síla F_{p2b2} je zaokrouhlena na 2 453 kN.

- Přetvárná práce pro zpětné protlačování ve fázi b₂) je vypočtena dle vztahu (2.12)

$$A_{2b2} = V \cdot \int_0^z \sigma_d \cdot d\varphi = A_j \cdot V = 0,15 \cdot 14\,305 = 2\,145,75 \text{ J}$$

Vypočtená přetvárná práce A_{2b2} je zaokrouhlena na 2,15 kJ

Tvářecí síly F_{p2b1} a F_{p2b2} jsou dílčí výpočty superpozice. Obě působí současně, a musí být sečteny.

- Protlačovací síla ve fázi b)

$$F_{p2b} = F_{p2b1} + F_{p2b2} = 3\,152 + 2\,453 = 5\,605 \text{ kN}$$

- Přetvárná práce ve fázi b) je vypočtena dle vztahu (2.15)

$$A_{2b} = A_{2b1} + A_{2b2} = 13,1 + 2,15 = 15,25 \text{ kJ}$$

- Logaritmické přetvoření ve fázi b) je vypočteno dle vztahu (2.13)

$$\varphi_{2b} = |\varphi_{2b1}| + |\varphi_{2b2}| = 1,12 + 0,25 = 1,37$$

- Příčné zúžení ve fázi b) je vypočteno dle vztahu (2.14)

$$\varepsilon_{2b} = |\varepsilon_{2b1}| + |\varepsilon_{2b2}| = 67,4 + 21,8 = 89,2 \%$$

- c) **Zpětné protlačování** (obr. 33),

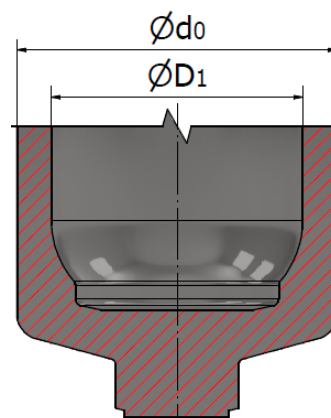
kde: $\varnothing D_0 = 95,2 \text{ mm}$, $\varnothing D_1 = 75 \text{ mm}$,
 $V = 8\,836 \text{ mm}^3$.

- Logaritmické přetvoření je vypočteno dle vztahu (2.2)

$$\varphi_{2c} = \ln \frac{D_0^2}{D_0^2 - D_1^2} = \ln \frac{95,2^2}{95,2^2 - 75^2} = 0,97$$

- Podmínka maximálního přetvoření vyhovuje

$$\varphi_{2c} = 0,97 \in \langle 0; 1,64 \rangle$$



Obr. 33 Zpětné protlačování 2. OP, fáze c)

- Změna příčného průřezu je vypočtena dle vztahu (2.3)

$$\varepsilon_{2c} = \frac{D_1^2}{D_0^2} \cdot 100 = \frac{75^2}{95,2^2} \cdot 100 = 62,1 \%$$

Pro logaritmické přetvoření $\varphi_{2c} = 0,97$ byla z grafu přetvárných odporů odečtena hodnota $\sigma_p = 830$ MPa a měrná přetvárná práce $A_j = 0,73$ J · mm⁻³

- Deformační odpor pro zpětné protlačování podle Siebela je vypočten dle vztahu (2.8)

$$\begin{aligned} \sigma_d &= 1,152 \cdot \frac{D_0^2}{D_1^2} \cdot \sigma_p \cdot \left(\log \frac{D_0^2}{D_0^2 - D_1^2} + \frac{D_0^2}{D_0^2 - D_1^2} \cdot \log \frac{D_0^2}{D_1^2} + \log \frac{D_1^2}{D_0^2 - D_1^2} \right) \\ &= 1,152 \cdot \frac{95,2^2}{75^2} \cdot 830 \\ &\quad \cdot \left(\log \frac{95,2^2}{95,2^2 - 75^2} + \frac{95,2^2}{95,2^2 - 75^2} \cdot \log \frac{95,2^2}{75^2} + \log \frac{75^2}{95,2^2 - 75^2} \right) \\ &= 1\,819,18 \text{ MPa}, \end{aligned}$$

Vypočtená hodnota deformačního odporu σ_d je zaokrouhlena na 1 820 MPa.

- Tvářecí síla pro zpětné protlačování ve fázi c) je vypočtena dle vztahu (2.11)

$$F_{p2c} = S_p \cdot \sigma_d = \frac{\pi \cdot 75^2}{4} \cdot 1820 = 8\,128\,870,99 \text{ N}.$$

Vypočtená tvářecí síla F_{p2c} je zaokrouhlena na 8 130 kN

- Přetvárná práce pro zpětné protlačování ve fázi c) je vypočtena dle vztahu (2.12)

$$A_{2c} = V \cdot \int_0^z \sigma_d \cdot d\varphi = A_j \cdot V = 0,73 \cdot 8\,836 = 6\,450 \text{ J} = 6,45 \text{ kJ}$$

- Celkové logaritmické přetvoření φ_c ve 2. tvářecí operaci je vypočteno dle vztahu (2.14)

$$\varphi_{c2} = |\varphi_{2a}| + |\varphi_{2b}| + |\varphi_{2c}| = 0,42 + 1,37 + 0,97 = 2,51$$

- Celkové příčné zúžení ve 2. tvářecí operaci je vypočteno dle vztahu (2.15)

$$\varepsilon_{c2} = |\varepsilon_{2a}| + |\varepsilon_{2b}| + |\varepsilon_{2c}| = 34 + 89,2 + 62,1 = 185,3 \%$$

- Celková přetvárná práce v 2. tvářecí operaci vypočtena dle vztahu (2.15)

$$A_{c2} = A_{2a} + A_{2b} + A_{2c} = 93,4 + 15,25 + 6,3 = 114,95 \text{ kJ}$$

Z vypočtených hodnot tvářecích sil ve 2. operaci je pro výběr lisu určující $F_{p2c} = 8\,130$ kN. Příslušné hodnoty získané výpočty pro jednotlivé operace jsou rozhodující při správném dimenzování tvářecího lisu i nástrojů. Výsledky jsou shrnuty v tabulce 6.

	1. Operace	2. Operace
F_c [kN]	7 690	8 130
A_c [kJ]	208	114,95
φ_c [-]	0,92	2,51
ε_c [%]	68,4	185,3

Pro simulaci tváření 2. operace, jenž je součástí přílohy 4, jsou použity obdobné podmínky, jako při technologických výpočtech dle ověřených vztahů. Tedy teplota 25 °C, ocel 12 024.1 a součinitel tření mezi nástroji a materiálem $f = 0,05$. Rozdíl hodnot sil získaných výpočtem, kdy $F_c = 8\,130$ kN a simulačním softwarem, kde F_c je rovna přibližně 9 400 kN lze přičíst odlišným způsobům vyhodnocení i rozdílům ve vstupních datech. Odlišnosti jsou například v chemickém složení oceli u materiálu definovaného v programu a materiálu použitého pro technologické výpočty. Významný vliv zde má i způsob výpočtu, kdy simulační software počítá s komplexnějšími daty a s reálnými tvary nástrojů. Obal filtru tedy lze tímto technologickým postupem vyrobit. Výrobní postup je součástí přílohy 10.

4 VOLBA TVÁŘECÍHO LISU [1], [14], [18]

Návrh obalu filtru předpokládá výrobu na konvenčním lisu ve dvou tvářecích operacích s mezioperačním žiháním. Nejvyšší potřebná tvářecí síla vyšla výpočtem pro 2. operaci a je rovna 8 130 kN. Na základě této hodnoty a s přihlédnutím ke strojovému parku firmy Metaldyne, ve které bude díl vyráběn, je pro obě operace zvolen hydraulický tvářecí lis Eitel 1 250 (obr. 34) s pevným rámem a čtyřsloupovou konstrukcí. Tím je zaručena výborná tuhost stroje a díky bočnímu vedení i dostatečná přesnost beranu. Stroj disponuje nominální tvářecí silou 12 500 kN a zdvihem beranu 1 000 mm. Tak je dostatečně dimenzován pro výrobu tohoto dílu. Podrobnější technická data lisu jsou uvedena v tabulce 7.

Dutina beranu je osazena „T“ drážkami i závitky pro šrouby k uchycení hlavy. Ta je osazena středícím čepem a vnitřním lichoběžníkovým závitkem. Díky tomu lze nástrojovou sestavu v hlavě beranu přesně vystředit. Sestava je do dutiny přitažena pomocí speciální převlečné matice.

Tab 7. Technické parametry lisu Eitel 1 250 (příloha 6).

Jmenovitá lisovací síla	[kN]	12 500
Pracovní tlak	[bar]	315
Beran:		
zdvih	[mm]	1 000
lisovací rychlost	[mm · s ⁻¹]	65 až 125
přibližovací rychlost	[mm · s ⁻¹]	600
Vyhazovač:		
zdvih válce vyhazovače	[mm]	600
vyhazovací síla	[kN]	2 500
rychlost vysouvání	[mm · s ⁻¹]	153



Obr. 34 Hydraulický lis Eitel 1 250

5 NÁVRH NÁSTROJŮ [1], [9], [13], [14], [18]

Nástroje budou navrženy pro 1. tvářecí operaci, kde dochází k dopřednému protlačování plného tělesa i ke zpětnému protlačování. Jejich tvary a rozměry jsou voleny s přihlédnutím k zákaznickým požadavkům na tvar výrobku, k zásadám uvedeným v kapitole 2.6, v příloze 7, ale také k osvědčeným poznatkům z praxe.

5.1 Průtlačník [13], [14], [18], [22], [23], [26]

Navržený nástroj (viz obr. 35) je konstrukčně řešen pro zpětné protlačování dle zásad uvedených v příloze 7. Průtlačník je zde využit i pro dopředné protlačení náběhového osazení s kuželem. Průměr průtlačníku d_p i úhel β jsou voleny dle požadavku na rozměry a tvar výrobku. Délka funkční části $l = 125$ mm je navržena s ohledem na výšku stěny dílu ode dna, která činí 78,5 mm. Celková délka nástroje je 290 mm, byla zvolena na základě potřebné výšky zdvihu, jenž činí 260 mm i dle zásady uvedené v kapitole 2.5, kdy nesmí přesáhnout 2,5 až 3násobek l_k . Průměry d_1 , d_2 a rozměry l_A a l_B jsou voleny podle vnitřních rozměrů a tvarů upínacího pouzdra. Materiál pro výrobu průtlačníku je nástrojová rychlořezná Mo-W ocel 19 830 vyznačující se vysokou pevností i houževnatostí viz materiálový list v příloze 8. Tvrdost hotového nástroje po zakalení a popuštění je stanovena na 62-64 HRC, což zajišťuje mez kluzu v tlaku asi 3 300 MPa. Je třeba zkontrolovat, zda konstrukční řešení nástroje vyhovuje i z hlediska bezpečnosti. U nástroje s volným koncem je součinitel $\alpha_v = \frac{\pi}{2}$.

Znamé parametry: $\varnothing d_p = 75,2$ mm, $l_k = 125$ mm (navržená hodnota),
 $\varnothing d_A = 79$ mm, $l_A = 134$ mm,
 $\varnothing d_B = 74,8$ mm, $l_B = 31$ mm,
 $E_p = 2,17 \cdot 10^5$ mm⁴, $k_d = 1,5$ (zvolen),
 $F_c = 7\,690$ kN, $\alpha_v = \frac{\pi}{2}$,
 $\sigma_{kt} = 3\,300$ MPa.

- Výpočty dalších důležitých rozměrů

$$R_1 = 0,1 \cdot d_p = 0,09 \cdot 75,2 = 6,768$$

Zaokrouhlo: $R_1 = 7$ mm

$$\varnothing d = d_p - (2 \cdot R_1 + 0,2 \cdot d_p) = 75,2 - (2 \cdot 7 + 0,2 \cdot 75,2) = 46,16$$

Zaokrouhlo: $\varnothing d = 45$ mm
 $a_f = 0,05 \cdot d_p = 0,05 \cdot 75,2 = 3,76$

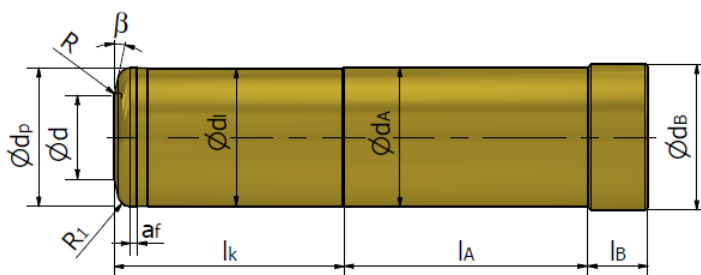
Zaokrouhlo: $a = 3,5$ mm

$$d_l = d_p - 2 \cdot 0,2 = 75,2 - 0,4 = 74,8 \text{ mm}$$

- Podmínky pro navrženou délku $l = 125$ mm:
 $l_k \leq 3 \cdot d_p \Rightarrow 125 \leq 3 \cdot 75,2 \Rightarrow 125 \leq 225$ – podmínka vyhovuje
- Výpočet kvadratického modulu průřezu dle vztahu (2.16)

$$I_p = \frac{\pi \cdot d_3^4}{64} = \frac{\pi \cdot 74,8^4}{64} = 1\,536\,655 \text{ mm}^4$$

Vypočtená hodnota kvadratického modulu průřezu je zaokrouhlena na $1,54 \cdot 10^6$ mm⁴.



Obr. 35 Model navrženého průtlačníku

- Kritická síla podle Eulera je vypočtena dle vztahu (2.17)

$$F_v = \frac{\alpha_v^2 \cdot E_p \cdot I_p}{l_k^2} = \frac{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \cdot 2,17 \cdot 10^5 \cdot 1,54 \cdot 10^6}{125^2} = 52\,771\,590,38\text{ N}$$

Vypočtená hodnota kritické síly je zaokrouhlena na 52 800 kN

- Poloměr setrvačnosti je vypočten dle vztahu (2.18)

$$i_y = \sqrt{\frac{I_p}{\frac{\pi \cdot d_l^2}{4}}} = \sqrt{\frac{1,54 \cdot 10^6}{\frac{\pi \cdot 74,8^2}{4}}} = 18,72\text{ mm}$$

- Štíhlost průtlačníku dle vztahu (2.19)

$$\lambda = \sqrt{\frac{l_k}{i_y}} = \sqrt{\frac{125}{18,72}} = 2,58$$

- Mezní štíhlost průtlačníku dle vztahu (2.20)

$$\lambda_k = \sqrt{\frac{\alpha_v^2 \cdot E_p}{\sigma_{kt}}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \cdot 2,17 \cdot 10^5}{3300}} = 12,7$$

$$\lambda < \lambda_k \Rightarrow 2,58 < 12,7$$

Průřez průtlačníku je dostatečný a z hlediska vzpěrné stability vyhovuje. Dle pravidla ve vztahu (2.22) je zde mezním stavem mezní stav pružnosti.

- Vzpěrná stabilita dle vztahů (2.22)

$$\sigma = \frac{F_c}{\frac{\pi \cdot d_l^2}{4}} = \frac{7\,690\,000}{\frac{\pi \cdot 74,8^2}{4}} = 1813\text{ MPa} \quad k_k = \frac{\sigma_{kr}}{\sigma} = \frac{3\,300}{1813} = 1,82$$

Podmínka bezpečnosti.

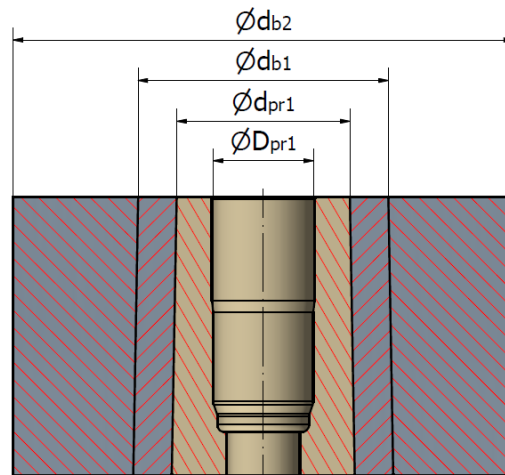
$$k_k > k_d \Rightarrow 1,82 > 1,5$$

Podmínka je splněna. Průtlačník z hlediska bezpečnosti vyhovuje a je materiálem i rozměry dostatečně dimenzován pro výrobu navrženého průtlačníku.

5.2 Průtlačnice [1], [13], [14], [22], [23], [26]

Jedná se o průtlačnici, ve které je otvor pro zakládání polotovaru zároveň vodícím prvkem pro správné vystředění mezi průtlačníkem a průtlačnicí. Nástroj je navržen z Mo-W oceli 19 830 s vysokou houževnatostí (příloha 8). Tvrdost po zakalení a popuštění je stanovena na 60-62 HRC. Dno průtlačnice tvoří hlava vyvažovače.

Dopředným protlačováním výchozího polotovaru přes redukční kužel je redukován průměr 104 mm na průměr 95,2 mm. Následuje zpětné protlačování, při němž vzniká napětí, pro které je třeba nástroj správně dimenzovat. Jejich únosnost se zvyšuje radiálním předpětím, které vznikne zalisováním do masivní objímky neboli bandáže s mírným kuzelem. Model nástroje včetně bandáží je vyobrazen na obrázku 36. Navrhovaná průtlačnice svírá na vnějším průměru poloviční



Obr. 36 Model sestavy průtlačnice [13]

úhel kužele 1°. Vnitřní funkční část dutiny je otevřena s kuželovitostí 1:1000, z důvodu snížení osových napětí při vytlačení hotového protlačku. Rozměry jsou vypočteny dle vztahů a zásad uvedených v příloze 7.

Znamé parametry: $D_{pr1} = 104,2 \text{ mm}$
 $a = 1,7$ (zvoleno)
 $p_1 = \sigma_d = 1\,740 \text{ MPa}$

- Výpočet vnějšího průměru průtlačnice

$$a = \frac{d_{pr1}}{D_{pr1}} \Rightarrow d_{pr1} = a \cdot D_{pr1} = 1,7 \cdot 104,2 = 177,14 \text{ mm}$$

Průměr d_{pr1} je zaokrouhlen na 180 mm.

Pro vhodné dimenzování předpětí potřebným počtem objímek je třeba znát velikost radiálního napětí v průtlačnici.

- Výpočet radiálního napětí dle vztahu (2.18)

$$\sigma_r = p_1 \cdot \frac{1}{a^2 - 1} \cdot \left(1 - \frac{r_2^2}{r_1^2}\right) = 1\,740 \cdot \frac{1}{1,7^2 - 1} \cdot \left(1 - \frac{90^2}{52,1^2}\right) = -1\,827 \text{ MPa}$$

Z výpočtu radiálního tlaku je zřejmé, že dle zásad uvedených v tabulce přílohy 7 je nutné použít dvě objímky. Poměr mezi průměry d_{b1} a D_{pr1} je zvolen: $a_{11} = 2,5$ a mezi d_{b2} a D_{pr1} : $a_{21} = 5$

- Výpočet 1. objímky

$$a_{11} = \frac{d_{b1}}{D_{pr1}} \Rightarrow d_{b1} = a \cdot D_{pr1} = 2,5 \cdot 104,2 = 260,5 \text{ mm}$$

Průměr d_{b1} je zaokrouhlen na 260 mm.

- Výpočet 2. objímky

$$a_{21} = \frac{d_{b2}}{D_{pr1}} \Rightarrow d_{b2} = a \cdot D_{pr1} = 5 \cdot 104,2 = 521 \text{ mm}$$

Průměr d_{b2} je zaokrouhlen na 520 mm.

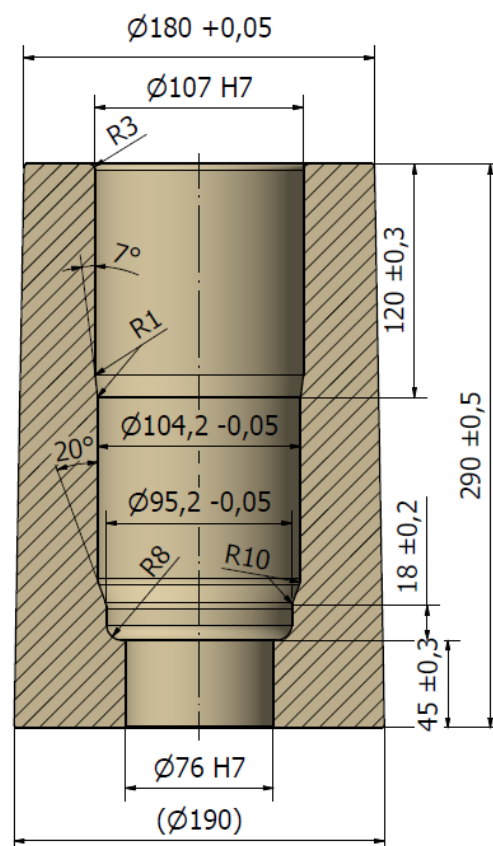
- Výpočet přesahu d_{pr1}

$$d_{pr1} \cdot 0,0045 = 180 \cdot 0,0045 = 0,81 \text{ mm}$$

- Výpočet přesahu d_{b1}

$$d_{b1} \cdot 0,0035 = 260 \cdot 0,0035 = 0,91 \text{ mm}$$

Výpočtem byl stanoven potřebný počet bandáží, tloušťka jejich stěn, tloušťka stěny průtlačnice a přesahy, se kterými do sebe mají být jednotlivé díly zalisovány. Nástroj je zalisován do první objímky s předpětím 0,81 mm a následně je tato dvojice zalisována do druhé objímky s přesahem 0,91 mm. Dosaženým předpětím je zajištěno, že i při vysokém radiálním napětí, ke kterému dochází během procesu tváření budou deformace nástroje v oblasti Hookova zákona a nedojde k destrukci. Je třeba brát v úvahu, že rozměry průtlačnice (obr. 37) ve výkresové dokumentaci jsou platné v zalisovaném stavu a správná hloubka zalisování má vliv na výsledné rozměry výlisku, životnost nástroje i bezpečnost během pracovního procesu.



Obr. 37 Model navržené průtlačnice

5.3 Vyhazovač [13], [14], [20], [27]

Součástí funkční části průtlačnice je rovněž vyhazovač navržený z vysokolegované nástrojové oceli 19 437 (příloha 9) Vyhazovač je v ní vystředěn pomocí uložení s malou vůlí H7/h6 a tvoří dno. Rádus hlavy $R = 400$ mm tangenciálně navazuje na rádusy v průtlačnici o poloměru

8 mm. Celková délka vyhazovače je rovna 352 mm a vychází z výšky zdvihu ovládacího čepu i montážní výšky spodního dílu nástrojové sestavy. Délku vyhazovače je třeba ověřit výpočtem pro vzpěrnou stabilitu vztaženou k nejmenšímu průměru. Ten je obdobně, jako u průtlačníku s odlehčením 0,2 mm oproti pracovní části, jejíž průměr činí 76 mm. Průměr vyhazovače je tedy $d_v = 75,6$ mm.

Znamé parametry: $\varnothing d_v = 75,6$ mm, $\sigma_{kt} = R_m = 2\,750$ MPa
 $l_k = 352$ mm, $\alpha_v = 2\pi$ (vyhazovač má vedení)

- Výpočet kvadratického modulu průřezu dle vztahu (2.16)

$$I_p = \frac{\pi \cdot d_v^4}{64} = \frac{\pi \cdot 75,6^4}{64} = 1\,603\,456,1 \text{ mm}^4$$

Vypočtená hodnota kvadratického modulu průřezu je zaokrouhlena na $1,6 \cdot 10^6$ mm⁴.

- Kritická síla podle Eulera je vypočtena dle vztahu (2.17)

$$F_v = \frac{\alpha_v^2 \cdot E \cdot I_p}{l_k^2} = \frac{(2\pi)^2 \cdot 2,17 \cdot 10^5 \cdot 1,6 \cdot 10^6}{352^2} = 110\,625\,214,6 \text{ N}$$

Vypočtená hodnota kritické síly je zaokrouhlena na 111 000 kN.

- Poloměr setrvačnosti je vypočten dle vztahu (2.18)

$$i_y = \sqrt{\frac{I_p}{\frac{\pi \cdot d_v^2}{4}}} = \sqrt{\frac{1,6 \cdot 10^6}{\frac{\pi \cdot 75,6^2}{4}}} = 18,88 \text{ mm}$$

- Štíhlost vyhazovače dle vztahu (2.19)

$$\lambda = \sqrt{\frac{l_k}{i_y}} = \sqrt{\frac{352}{18,88}} = 4,32$$

- Mezní štíhlost vyhazovače dle vztahu (2.20)

$$\lambda_k = \sqrt{\frac{\alpha_v^2 \cdot E_p}{\sigma_k}} = \sqrt{\frac{(2\pi)^2 \cdot 2,17 \cdot 10^5}{2\,750}} = 53,4$$

$$\lambda < \lambda_k \Rightarrow 4,32 < 53,4$$

Průřez vyhazovače je dostatečný a z hlediska vzpěrné stability vyhovuje. Dle pravidla ve vztahu (2.22) je zde mezním stavem mezní stav pružnosti.

- Vzpěrná stabilita dle vztahů (2.22)

$$\sigma = \frac{F_c}{\frac{\pi \cdot d_v^2}{4}} = \frac{7\,690\,000}{\frac{\pi \cdot 75,6^2}{4}} = 1\,759 \text{ MPa} \quad k_k = \frac{\sigma_{kt}}{\sigma} = \frac{2\,750}{1\,713} = 1,61$$

Podmínka bezpečnosti.

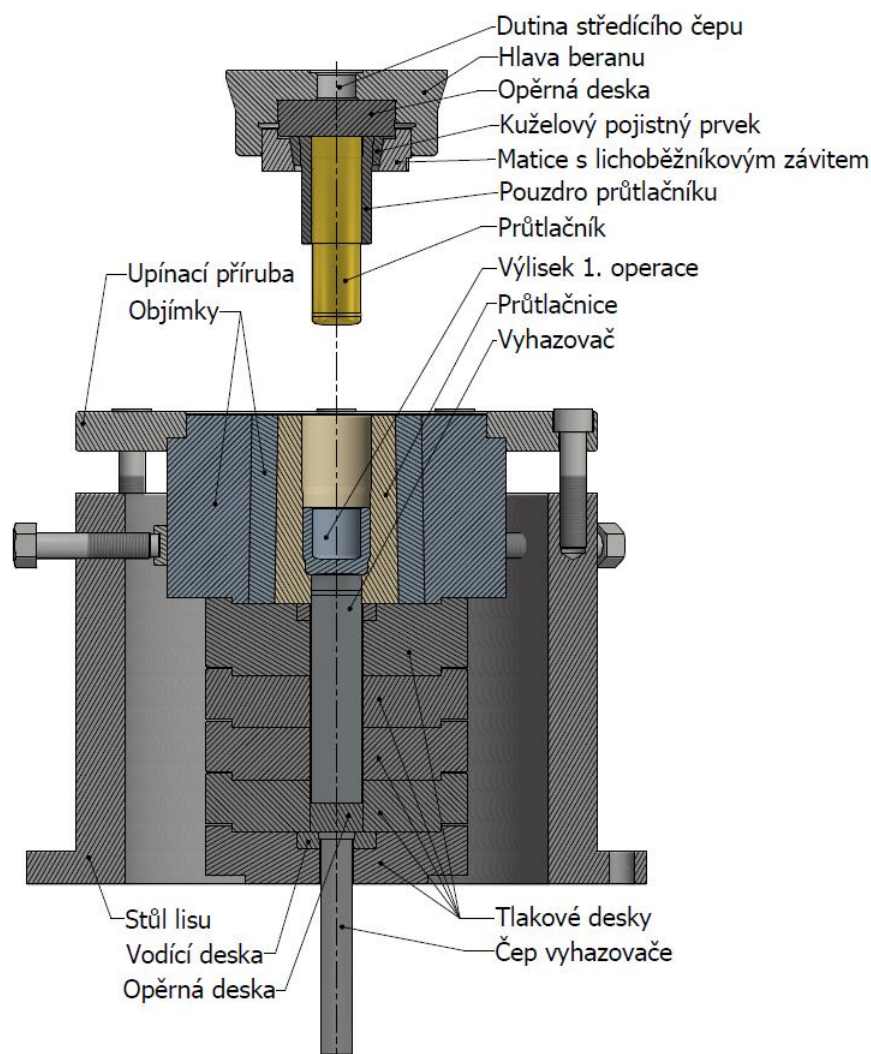
$$k_k > k_d \Rightarrow 1,61 > 1,5$$

Podmínka je splněna. Navržený vyhazovač z hlediska bezpečnosti vyhovuje a je materiálem i rozměry dostatečně dimenzován pro výrobu navrženého dílu.

5.4 Nástrojová sestava [8], [9], [13]

Průtlačník je za použití přechodného uložení H7/k6 vsunut do pouzdra, jehož vnitřní průměr slouží pro upevnění nástroje a vnější průměr společně se vstupním průměrem průtlačnice, mezi nimiž je použito uložení s malou vůlí H7/h6 fungují jako vodící prvek pro vzájemné vystředění obou nástrojů a tím zajišťují dostatečně přesný přímočarý pohyb. Horní část průtlačníku je opřena o opěrnou desku vyrobenou z oceli ČSN 19 423. Ta je zakalena a popuštěna na tvrdost 60 – 62 HRC. Pouzdro s průtlačníkem je vsazeno do objímky s vnitřním osazením pro zajištění pouzdra a vnějším kuželem. Za pomoci převlečné matky s lichoběžníkovým závitem, která je vnitřním tvarem přizpůsobena kuželu objímky je takto složený nástroj upevněn a vystředěn v hlavě beranu.

Průtlačnice, jejíž dostatečné předpětí zajišťují dvě bandáže, je vložena do stolu lisu. Ten je vystředěn spodním vnitřním průměrem a přes přírubu přitažen do rámu lisu. V dutině stolu jsou na sobě přes středící průměry naskládány tlakové desky, jimiž je zajištěna vhodná výška průtlačnice s ohledem na ergonomičnost a bezpečnost pracovního prostoru. Vyhazovač je veden dutinou v tlakových deskách. Stůl lisu je po obvodu osazen závity pro šrouby, které jsou opřeny o vnější průměr bandáže. Těmi je spodní nástroj jemně vystředěn i zajištěn v pozici, která je sousádá s průtlačníkem. Takto složený a vystředěný spodní díl sestavy je pomocí příruby přitažen ke stolu lisu.



Obr. 38 Řez modelem navržené nástrojové sestavy a stolem lisu

6 ZÁVĚRY

Práce předkládá řešení problematiky výroby obalu vysokotlakého hydraulického filtru technologií protlačování za studena s předpokládanou sériovostí 30 000 kusů za rok. Materiálem dílu byla zvolena cementační ocel C15R, jež je díky svým materiálovým vlastnostem pro tuto technologii výroby vhodná.

Na základě poznatků čerpaných ze široké škály odborné literatury i z praxe byl řešený díl zhodnocen z hlediska technologičnosti a následně rozvržen do dvou tvářecích operací s mezioperačním rekrystalizačním žíháním. Polotovarem pro první operaci je kalota $\varnothing 104 \times 57,9$ opatřená povrchovou úpravou s fosfátem a mýdlem. Z té je kombinací dopředného a zpětného protlačování vylišován kalíšek se zaváděcím průměrem. Ve druhé operaci pak následuje tažení se ztenčením stěny, kombinované protlačování a závěrem zpětné. Vysokým tlakem vyvolaným v materiálu zpětným protlačováním je zajištěno důkladné vytvarování dna i vnějšího šestihranu, jímž je výlisek osazen.

Prostřednictvím ověřených vztahů byly vypočteny hodnoty přetvoření materiálu, deformační odpory, přetvárné práce i síly v jednotlivých fázích tvářecího procesu. Vypočtené síly, 7 690 kN pro první a 8130 kN pro druhou operaci byly určující pro výběr vhodně dimenzovaného stroje i konstrukční návrh nástrojů. Pro obě tvářecí operace byl zvolen hydraulický tvářecí lis Eitel 1 250. Stroj disponuje nominální silou 12 500 kN v celé dráze zdvihu beranu.

Návrh nástrojů pro první operaci byl proveden s ohledem na tvar protlačku, i v souladu s osvědčenými vzory a pravidly teoretického i praktického charakteru. Materiálem průtlačníku a průtlačnice je s ohledem na vysoké namáhání zvolena nástrojová rychlořezná ocel 19 830, vyznačující se vysokou dosažitelnou tvrdostí, houževnatostí i odolností proti otěru. Tvrdost nástrojů po zakalení a popuštění byla stanovena na 64 - 62 HRC pro průtlačník a 56 - 54 HRC pro průtlačnici. Vyhazovač, jehož vrchní část zároveň tvoří dno průtlačnice je navržen z nástrojové vysokolegované oceli 19 437, zakalené a popuštěné na tvrdost 62 - 60 HRC.

Výpočtům průtlačníku i vyhazovače na vzpěrnou stabilitu dle Eulera oba nástroje z bezpečnostního hlediska vyhověly. Pro průtlačnici byla výpočty stanovena tloušťka stěny a potřebný počet objímek. Dále byly vypočteny rozměry i přesahy, se kterými do sebe musí být vzájemně jednotlivé díly zalisovány, pro dosažení potřebného předpětí a vysoké únosnosti nástroje.

Prostřednictvím simulace tvářecího procesu obou operací byla ověřena proveditelnost výroby dle navrženého technologického postupu. Nicméně je důležité, aby zákaznické výrobě předcházela zkušební série se stanoveným počtem 50 ks, z toho pět vzorových podrobit kontrole rozměrů dle výkresové dokumentace, laboratorně ověřit na požadované materiálové charakteristiky a zkontrolovat na přítomnost smykových trhlin.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [28]

1. FELDMANN, Heinz D. *Protlačování oceli: určeno pro technology a konstruktéry*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962.
2. LENFELD, Petr. *Technologie II, Část 1: Tváření kovů*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. sv. Část 1 ISBN 978-80-7372-466-5.
3. ŘASA, Jaroslav, KAFKA, Jindřich a HANĚK, Václav. *Strojírenská technologie 4: návrhy nástrojů, přípravků a měřidel: zásady montáže*. Praha: Scientia, pedagogické nakladatelství, 2003. s. 7. ISBN 80-7183-284-7.
4. Hydraulics | Donaldson Engine & Vehicle. *301 Moved Permanently* [online]. Copyright © 2021 Donaldson Company, Inc. All Rights Reserved [cit. 25.04.2021]. Dostupné z: <https://www.donaldson.com/en-za/hydraulics/>
5. Shell Moulding Foundry |Intricate Casting Manuafcturer|Precision Casting Manufacturers|Machined Castings Supplier in India. *Shell Moulding Foundry |Intricate Casting Manuafcturer|Precision Casting Manufacturers|Machined Castings Supplier in India* [online]. India: Magnafoundry, 2001-2021 [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: <https://www.magnafoundry.com/shell-mould-cast-iron-casting-manufacturers-india-shell-moulding-cast-iron-foundry.php>
6. Horizontal CNC Turning | Large CNC Turning Services | Toolcraft. *CNC Machine Shop / CNC Precision Machining / Toolcraft* [online]. Copyright © 2021 Toolcraft Machining, Inc. All Rights Reserved. Designed by [cit. 25.04.2021]. Dostupné z: <https://www.toolcraft.com/our-capabilities/horizontal-cnc-turning/>
7. DVOŘÁK, Milan. *Technologie II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2683-7.
8. BAREŠ, Karel. *Lisování: Určeno [také] stud. na stř. a vys. odb. školách*. Praha: SNTL, 1971, 542 s.
9. HRUBÝ, Jiří, RUSZ, Stanislav, ČADA, Radek. *Strojírenské tváření*. Ostrava: 2006. ISBN 80-248-1218-5.
10. FOREJT, Milan. *Teorie tváření*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2764-7.
11. DVOŘÁK, Milan, NOVOTNÝ, Karel, GAJDOŠ, František. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-214-2340-4.
12. BRALLA, James G. *Design for manufacturability handbook second edition. COLD-HEADED PARTS, Chapter 18*, New York: McGraw-Hill, 1999 [online]. Copyright © [cit. 09.02.2021]. ISBN 00-07-007139-X. Dostupné z: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780070071391>
13. FOREJT, Milan, PÍŠKA, Miroslav. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
14. BABOR, Karel, FIALA, Jan a CVILINEK, Augustin. *Objemové tváření ocelí*. Praha: SNTL, 1967.
15. Your Complete Stamping Press-Line Solution / *Stamtec Inc.* [online]. Copyright © [cit. 23.03.2021]. Dostupné z: https://www.stamtec.com/images/PDF/KP_KT_Series_Catalog_March_2017.pdf

16. China 800 Tons Four Column Type Automatic Hydraulic Press - China 800 Tons Hydraulic Press, Hydraulic Press. *China Press Brake manufacturer, Hydraulic Guillotine, Shearing Machine supplier - Hako CNC Machine (Anhui) Manufactory Co., Ltd.* [online]. Copyright © 1998 [cit. 17.05.2021]. Dostupné z: <https://hacopress.en.made-in-china.com/product/vXNEIelPCikn/China-800-Tons-Four-Column-Type-Automatic-Hydraulic-Press.html>
17. Forging Technology. SCHULER - *Spitzentechnologie in allen Bereichen der Umformtechnik* [online]. Dostupné z: https://www.schulergroup.com/major/download_center/broschueren_forging/download_forging/forging_broschuere_mehrstufenpressen_knieheb_eantrieb_e.pdf
18. ELFMARK, Jiří. *Tváření kovů*. Praha: SNTL, 1992. ISBN 80-03-00651-1.
19. KAMELANDER, Ivan. *Tvářecí stroje II*. Brno: VUT, 1989. ISBN 80-214-1038-8
20. NOVOTNÝ, Karel. *Tvářecí nástroje*. Brno: VUT Brno, 1992, 186 s. ISBN 80-214-0401-9
21. BENEŠ, Milan a Bohumil MAROŠ. *Křivky přetvárných odporů ocelí*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986, 228 s. Poradenská příručka.
22. 1.3343 / 19 830 / HS6-5-2C / S6-5-2 / M2 / MAX SPECIAL MO 5 – Specialisté na nástrojovou ocel | ToolSteel.cz. *Specialisté na nástrojovou ocel | ToolSteel.cz – Nástrojové oceli a speciální materiály* [online]. Copyright © 2019 ToolSteel.cz [cit. 24.03.2021]. Dostupné z: <http://toolsteel.cz/1-3343-19830-hs6-5-2c-s6-5-2-m2-max-special-mo-5/>
23. LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. Paté upravené vydání. Úvaly: Albra, 2011, xiv, 927 stran : ilustrace. ISBN 978-80-7361-081-4.
24. ČSN 41 2024. *Ocel 12 024*. Praha: Český normalizační institut, 1988. Dostupné také z: <https://csnonlinefirmy.agentura-cas.cz/vystaven.aspx?k=27329>
25. ČSN EN ISO 18265. *Kovové materiály - Převod hodnot tvrdosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014, 80 s. Dostupné také z: <https://csnonlinefirmy.agentura-cas.cz/vystaven.aspx?k=95161>
26. ČSN 41 9830. *Ocel 19 830 rychlořezná*. Praha: Český normalizační institut, 1967. Dostupné také z: <https://csnonlinefirmy.agentura-cas.cz/vystaven.aspx?k=3543>
27. ČSN 41 9437. *Ocel 19 437 Cr-W-V*. Praha: Český normalizační institut, 1969. Dostupné také z: <https://csnonlinefirmy.agentura-cas.cz/vystaven.aspx?k=3511>
28. Citace PRO. *Citace PRO* [online]. Copyright © Citace.com, s.r.o. 2015 [cit. 20.05.2021]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
a	Poměr vnějšího a vnitřního poloměru	[-]
a _f	Rozměr fazety	[mm]
d ₀	Vnější průměr před protlačením	[mm]
d ₁	Vnější průměr po protlačení	[mm]
d _i	Průměr odlehčení pracovní části průtlačníku	[mm]
d _A	Průměr upínací části průtlačníku A	[mm]
d _B	Průměr upínací části průtlačníku B	[mm]
d _p	Průměr funkční části průtlačníku	[mm]
d _{pr1}	Vnější průměr průtlačnice	[mm]
d _b	Vnější průměr bandáže	[mm]
d _φ	Přírůstek logaritmické deformace	[s-1]
f	Součinitel tření	[-]
h _d	Tloušťka dna	[mm]
i _y	Poloměr setrvačnosti	[mm]
k _d	Koeficient bezpečnosti	[-]
k _k	Poměr meze kluzu v tlaku a působícího napětí	[-]
k _v	Mezní stav pružnosti	[-]
l	Délka	[mm]
l _k	Vzpěrná délka	[mm]
m	Vypočtená hmotnost výrobku dle zákaznického požadavku	[g]
m _{pr}	Hmotnost přířezu	[g]
p ₁	Vnitřní tlak v průtlačnici	[MPa]
r ₁	Vnitřní poloměr průtlačnice	[mm]
r ₂	Vnější poloměr průtlačnice	[mm]
t	Čas	[s]
A	Přetvárná práce	[J]
A _j	Měrná přetvárná práce	[J · mm ⁻³]
A ₅	Tažnost	[%]
A _c	Celková přetvárná práce	[J]
D	Vnitřní průměr	[mm]
D ₁	Vnitřní průměr po protlačení	[mm]
D ₂	Vnitřní průměr protlačovaného tělesa	[mm]
D _{pr1}	Vnitřní průměr průtlačnice	[mm]
E _p	Youngův modul pružnosti materiálu v tahu	[Pa]
F _p	Protlačovací síla	[N]
F _{taž}	Tažná síla	[N]
F _v	Kritická síla	[N]
HRC	Tvrдость podle Rockwella	[HRC]
I _p	Kvadratický moment průřezu	[mm ⁴]
R	Rádus	[mm]
R _e	Mez kluzu materiálu v tahu	[MPa]
R _m	Mez kluzu materiálu v tahu	[MPa]
R _{p02}	Smluvní mez kluzu materiálu v tahu	[MPa]
S	Plocha průřezu	[mm]

S_0	Plocha průřezu před protlačení	$[\text{mm}^2]$
S_1	Plocha průřezu po protlačení	$[\text{mm}^2]$
S_2	Plocha průřezu vnitřního otvoru protlačovaného tělesa	$[\text{mm}^2]$
S_p	Plocha průřezu funkční části průtlačníku	$[\text{mm}^2]$
T_{rek}	Teplota rekrytalizace	$[\text{K}]$
T_{tav}	Teplota tavení materiálu	$[\text{K}]$
V	Objem přetvořeného materiálu	$[\text{mm}^3]$
V_{O1}	Objem spodní části finálního výrobku	$[\text{mm}^3]$
V_{O2}	Objem prstence	$[\text{mm}^3]$
V_{pr}	Objem přířezu	$[\text{mm}^3]$
α	Poloviční úhel redukčního kužele průtlačnice	$[\text{°}]$
β	Úhel čela průtlačníku	$[\text{°}]$
ε	Změna příčného průřezu	$[\%]$
φ	Logaritmické přetvoření	$[-]$
φ_{max}	Maximální logaritmické přetvoření	$[-]$
φ_c	Celkové logaritmické přetvoření	$[-]$
λ	Štíhlost	$[-]$
λ_k	Mezní štíhlost	$[-]$
ρ	Hustota oceli	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
σ	Skutečné napětí	$[\text{MPa}]$
σ_d	Deformační odpor	$[\text{MPa}]$
σ_k	Mez kluzu materiálu v tahu	$[\text{MPa}]$
σ_{kt}	Mez kluzu materiálu v tlaku	$[\text{MPa}]$
σ_r	Radiální napětí v průtlačnici	$[\text{MPa}]$

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Ocelové výlisky vyrobené technologií objemového tváření za studena.....	9
Obr. 2 Model vysokotlakého hydraulického filtru.....	10
Obr. 3 Umístění filtru ve stavebním stroji [4]	10
Obr. 4 Technologie odlévání [5].....	11
Obr. 5 Technologie obrábění [6].....	11
Obr. 6 Technologie tváření za studena	11
Obr. 7 a) Zrna materiálu před tvářením, b) po tváření [8]	12
Obr. 8 Řez dílem vyrobeným protlačováním, s viditelným průběhem vláken	12
Obr. 9 Zpětné protlačování [10]	13
Obr. 10 Dopředné protlačování [10].....	13
Obr. 11 Kombinované protlačování [10].....	13
Obr. 12 Vliv deformace na mechanické vlastnosti [11]	14
Obr. 13 Elektrická žíhací pec Ipsen s řídicím systémem Siemens	14
Obr. 14 Schéma izotermického žíhacího procesu v závislosti na čase [10]	15
Obr. 15 Rekrytalizačně vyžíhané výlisky	15
Obr. 16 Technologická vhodná a nevhodná prvky pro objemové tváření za studena [14]	16
Obr. 17 Výlisky opatřené povrchovou úpravou pro další tvářecí operaci	17
Obr. 18 Klikový lis Stamtec [15].....	18
Obr. 19 Hydraulický lis [16].....	18
Obr. 20 Postupový automatický lis Schuler [17].....	19
Obr. 21 Průtlačnice pro zpětné protlačování	20
Obr. 22 Model průtlačníku pro zpětné protlačování.....	20
Obr. 23 Zpětné protlačování [13]	22
Obr. 24 Dopředné protlačování plného tělesa [13].....	22
Obr. 25 Dopředné protlačování dutého tělesa [13].....	22
Obr. 26 Vyobrazení přířezu (kaloty).....	26
Obr. 27 Objemy V_{O1} a V_{O2} pro výpočet tloušťky dna	26
Obr. 28 Dopředné protlačování v 1. op. fáze a).....	28
Obr. 29 Zpětné protlačování 1. op. fáze b)	28
Obr. 30 Dopředné protlačování 2. OP, fáze a)	30
Obr. 31 Dopředné protlačování plného tělesa 2. op. fáze b ₁)	31
Obr. 32 Zpětné protlačování 2. op. fáze b ₂).....	31
Obr. 33 Zpětné protlačování 2. OP, fáze c)	32
Obr. 34 Hydraulický lis Eitel 1 250.....	34
Obr. 35 Model navrženého průtlačníku	35
Obr. 36 Model sestavy průtlačnice [13].....	36
Obr. 37 Model navržené průtlačnice.....	37
Obr. 38 Řez modelem navržené nástrojové sestavy a stolem lisu	39

SEZNAM TABULEK

Tab 1. Některé oceli vhodné pro objemové tváření za studena [10].	17
Tab 2. Oceli pro průtlačníky, průtlačnice, vyhazovače a bandáže [10].	21
Tab 3. Chemické složení použité oceli C15R (příloha 2).	25
Tab 4. Chemické složení oceli 12024.1 (příloha 1) [21].	25
Tab 5. Přípustná přetvoření v jedné operaci [2].	27
Tab 6. Hodnoty vypočtené v 1. a 2. operaci.	33
Tab 7. Technické parametry lisu Eitel 1 250 (příloha 6).	34

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Přetvárné odpory, měrná přetvárná práce a chem. složení oceli 12 024.1 [21]
Příloha 2 – Inspekční certifikát oceli C15R +U, struktura materiálu a vstupní zkouška
Příloha 3 – Objemy přetvořeného materiálu
Příloha 4 – Simulace procesu tváření v 1. a 2. operaci
Příloha 5 – Dopředné protlačování dutého tělesa ve 2. operaci [10], [13], [14]
Příloha 6 – Technické údaje tvářecího lisu Eitel 1 250
Příloha 7 – Zásady konstrukce tvářecích nástrojů pro zpětné protlačování [13]
Příloha 8 – Materiálový list oceli 19 830 [26]
Příloha 9 – Materiálový list oceli 19 437 [27]
Příloha 10 – Výrobní postup

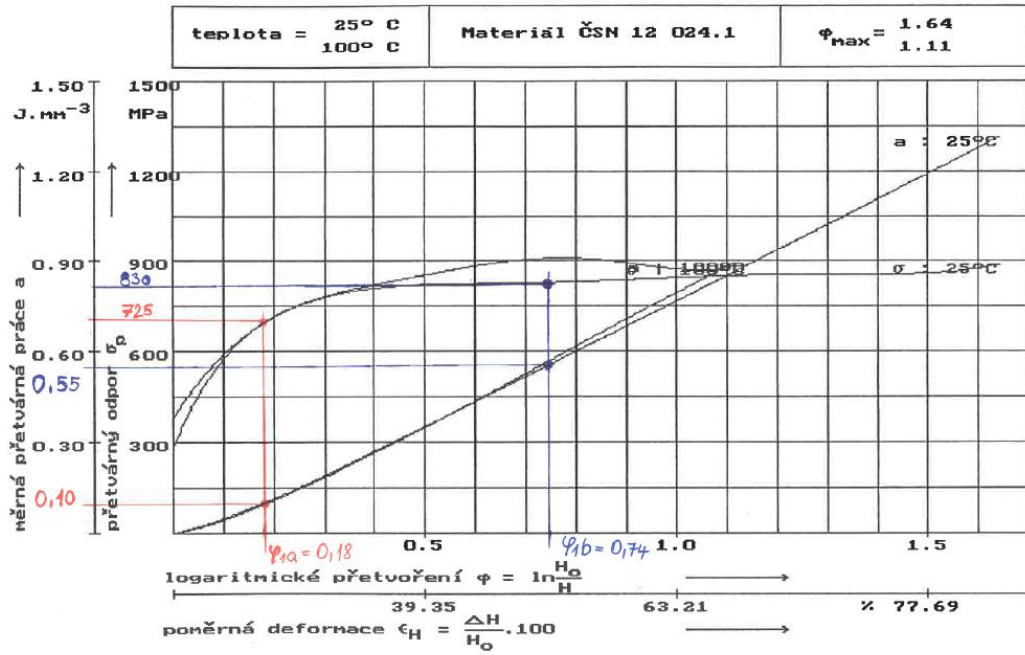
SEZNAM VÝKRESŮ

Protlaček 1. op.	BP2021_001
Obal filtru	BP2021_002
Postupový výkres	BP2021_003
Průtlačník 1. op.	BP2021_004
Průtlačnice 1. op.	BP2021_005
Vyhazovač 1.op.	BP2021_006
Lisovací sestava	BP2021_007

Příloha 1 – Přetvárné odpory, měrná přetvárná práce a chem. složení oceli 12 024.1 [21] 1/2

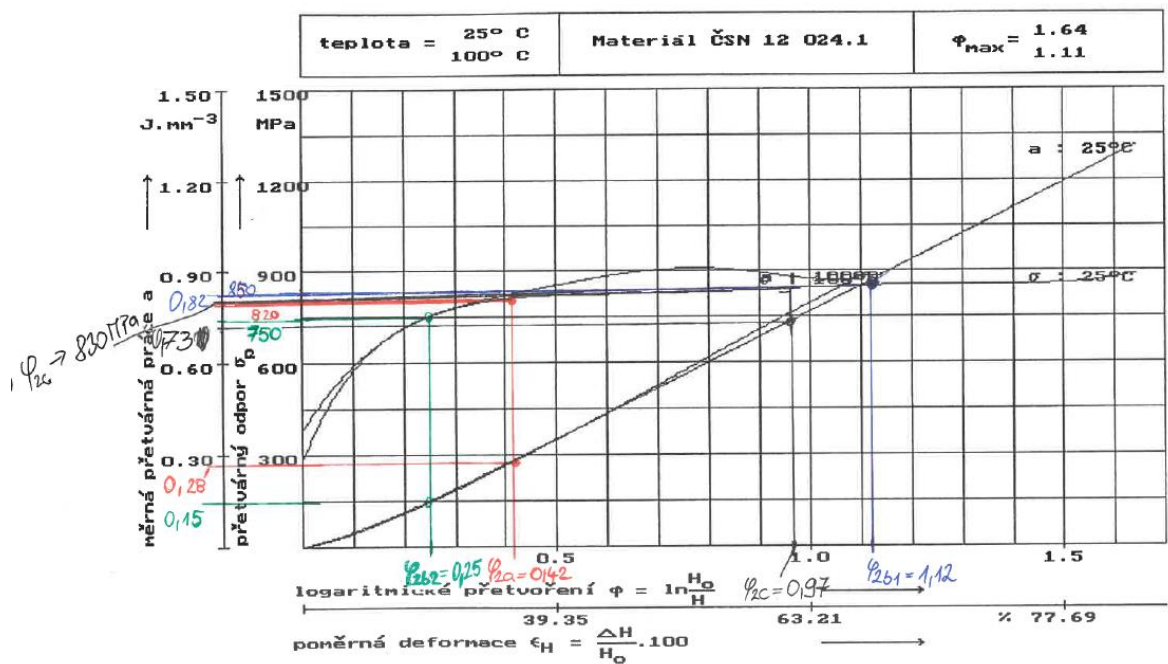
Graf přirozených přetvárných odporů a měrné přetvárné práce pro výpočty v 1. tvářecí operaci

Grantová agentura ČR



Graf přirozených přetvárných odporů a měrné přetvárné práce pro výpočty ve 2. tvářecí operaci

Grantová agentura ČR



Příloha 1 – Přetvárné odpory, měrná přetvárná práce a chem. složení oceli 12 024.1 [21] 2/2

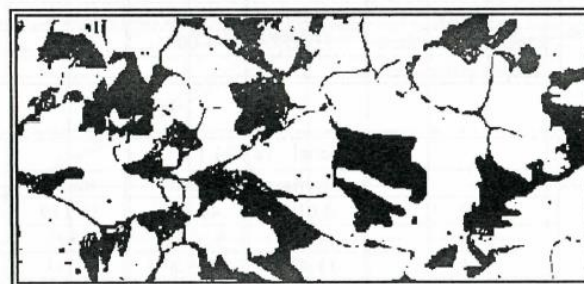
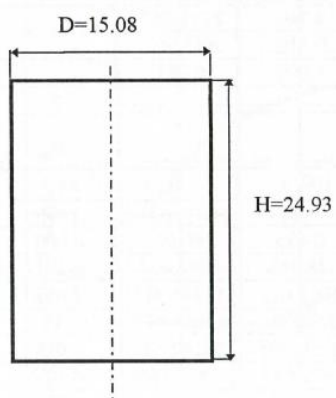
Chemické složení oceli 12 024.1

Grantová agentura ČR

Materiál ČSN 12 024.1

MECHANICKÉ VLASTNOSTI		
Pevnost v tahu R_m	[MPa]	
Mez kluzu R_p 0,2	[MPa]	
Tažnost A_5	[%]	
Kontrakce Z	[%]	
Tvrdość	HV 30	131

CHEMICKÉ SLOŽENÍ V %					
C	Mn	Si	P	S	Cr
0,23	0,56	0,30	0,011	0,020	0,09
Ni	Mo	Cu	Al	V	
0,03	0,00	0,07	0,009	-	



Nital

500 x

Hodnoty dosažených a kritických logaritmických stupňů přetvoření pro měřené teploty									
teplota	20°C	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C	700°C	750°C
$\varphi_{\text{dot.}}$	1.64	1.11	1.18	1.61	1.87	1.86	1.92	1.82	1.85
$\varphi_{\text{krit.}}$	-	1.25	1.36	1.69	-	-	-	-	-

Příloha 2 – Inspekční certifikát oceli C15R +U, struktura materiálu a vstupní zkouška 1/3

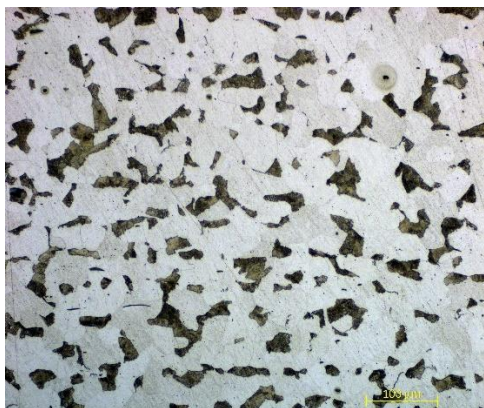
A02 Druh dokumentu / Art der Prüfbescheinigung / Type of inspection document Inspekční certifikát 3.1 - Abnahmeprüfzeugnis 3.1 - Inspection certificate 3.1, EN 10204:2004			
A01/A05 Výrobní závod / Herstellerwerk / Manufacturer TRINECKÉ ŽELEZÁRNY, a.s., Průmyslová 1000, Staré Město, 739 61 Třinec, Czech Republic VZ - Sochorová válcovna, 272 01 Kladno - Dřín, Czech Republic			Stránka / Seite / Page 1/2
A07 Číslo objednávky / Kundenbestellnummer / Purchaser's order No 00 [redacted]		A06 Příjemce / Empfänger / Consignee [redacted] S. I. O.	
A10 Číslo kontraktu / Kontraktnummer / Contract No. 00 [redacted] 1		A08 Číslo zakázky / Werkauftragsnummer / Manufacturer's order No [redacted]	
B01, B09-B11 Popis výrobku / Rozměry / Tolerance Specification der Produkt / Maße / Toleranz Product description / Dimensions / Tolerance		B02, B04 Označení oceli / Stav dodání Stahlbezeichnung / Lieferzustand Steel designation / Deliv. state	B03 Materiálová norma Materialnorm Classification standard
Tyče kruhové loupnané-Rundstahl geschält- Pealed HOT ROLLED ROUND BARS 104 mm + 0,220 - 0,220 6,000 m +200 -0 Přímotť tyčů 0,200% - Straightness 0,200%		C15R +U	EN 10084:2008 TL 2562/05 TL-EVS/WV-LIA TL 2562-Index b/ 23.01.2012 Rev.3
A11 Dopr. prostředek č. Wagen Nr. Wagon No.	A12 Ložný list č. Ladefahr Nr. Loading list No.	B07 Tavba Schmelze Heat No.	B08 Kruhy / Kuasy Rögen / Stöck Coils / Piles
[redacted]	[redacted]	44489	9
[redacted]	[redacted]	44489	9
[redacted]	[redacted]	44489	9
[redacted]	[redacted]	44489	6
[redacted]	[redacted]	44489	7
[redacted]	[redacted]	44489	8
		B09 Svezky Krbd Crbd	B13 Hmotnost (kg) Gewicht (kg) Weight (kg)
		1	3620
		1	3630
		1	3645
		1	2430
		1	2820
		1	2610
			----- 18755
B07, B14, C70 Tavba / Způsob výroby/ Způsob výroby Schmelze / Herstellungsjahr/ Stahlherstellung, Heat No./ Year of production/ Steelmaking process		C71-C92 Chemické složení-Chemische Zusammensetzung-Chemical composition [%]	
44489/2020 BO-2P01		C ✓ Mn ✓ Si ✓ P ✓ S ✓ Cr ✓ Ni ✓ Cu ✓ Mo ✓ Al ✓ 0.16 0.49 0.290 0.017 0.025 0.09 0.03 0.02 0.011 0.025	

A01/A05 Výrobní závod / Herstellerwerk / Manufacturer TRINECKÉ ŽELEZÁRNY, a.s., Průmyslová 1000, Staré Město, 739 61 Třinec, Czech Republic VZ - Sochorová válcovna, 272 01 Kladno - Dřín, Czech Republic			Stránka / Seite / Page 2/2
B07, B14, C70 Tavba / Způsob výroby/ Způsob výroby Schmelze / Herstellungsjahr/ Stahlherstellung, Heat No./ Year of production/ Steelmaking process		C71-C92 Chemické složení-Chemische Zusammensetzung-Chemical composition [%]	
BO-Strangguss BOE-cc blooms 410		Sn ✓ V Ti N Al sol B 0.002 0.005 0.0010 0.0046 0.025 0.0004	
Mechanické hodnoty-Mechanische Werte-Mechanical values			
B07 Tavba Schmelze Heat No.	B08 Stav zkoušení Probestatus Test state	C11 Mez kluzu Streckgrenze Yield point Rp 0.2 (MPa)	C12 Mez pevnosti Zugfestigkeit Tensile strength Rm (MPa)
44489	+Q+T	387	592
C13 Táhnost Bruchdehnung Elongation A5 [%]	C14 Kontrakce Bruchdehnung Contraction Z [%]	B09 Stav zkoušení Probestatus Test state	C03 Zkušební teplota Prüftemperatur Test temperature
22,0	65,6		
B07 Tavba Schmelze Heat No.	D58 Přechovcí zkoušky Stempprüben Healing tests (EN 10263-1)	D57 Oduhlnění Entschalen Desulfurization (max. / mm)	C64 Mikrošistota Reinheitsgrad Micro purity (DIN 60502)
44489			K4 max.30 (oxide)
C67 Velikost zrna Korngröße Grain size (ISO 645)	C30 Tvrdoť HB Härte HB Hardness HB	C92 Vakuování Vakuumdegasat Vacuum degassing	
			8 Oberflaeche: 133-141-139 D/10 unter Oberflaeche: 129-129-129 Mittel: 125
B07 Tavba Schmelze Heat No.	D53 100% kontrola totožnosti Verwechslungsprüfung 100% Sparking test 100%	D02 UZ kontrola US Prüfung US test	D68 Mikrostruktura (%) Mikrostruktur (%) Microstructure (%)
44489	provedena /entspricht/O.K.	KSR max. 2 mm	ohne Widmannstätten-Gefüge
B07 Tavba Schmelze Heat No.	D54 Povrchové vady Oberflächenehler Surface defects	D61 Stupeň protvářeni Umformungsgrad Reduction ratio	
44489	provedena /entspricht/O.K.	14,4	

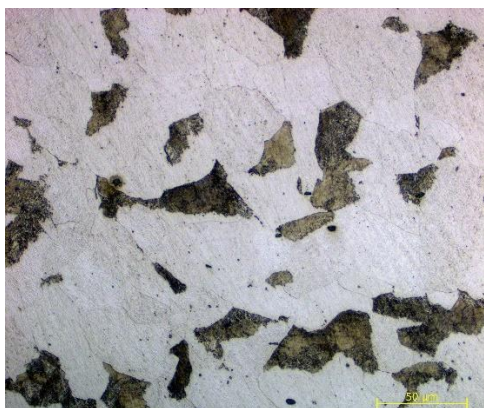
Příloha 2 – Inspekční certifikát oceli C15R +U, struktura materiálu, vstupní zkouška 2/3

Struktura materiálu C15R +U v dodávaném stavu. Snímáno metalografickým mikroskopem Zeiss AxioCam/Cc5, zvětšeno 200× ; 500×; 1000×.

200×



500×



1000×



Příloha 2 – Inspekční certifikát oceli C15R +U, struktura materiálu, vstupní zkouška 3/3

	Formulář pro:	Evidenční číslo:
	Doklad materiálu pro výrobu	F-7.5.1.1.05

OBECNÉ ÚDAJE

Uvol. dodavatel: ano ne Č. vstupní zkoušky:

Materiál: CK15 Průměr: Ø704 Číslo šarže: 4

Dodavatel: MS-KADKO Č. objednávky:

Výrobce: MS-KADKO Datum dodání:

Mat. předpis TL- 2562 Dodané množství:

VÝROBA / Rozměrová a vizuální přejímka
(5 libovolných tyčí z různých svazků)

POVRCH: válcovaný tažený bez rýh ano ne
loupáný tryskaný bez ostrých vrubů ano ne

ROZMĚRY: kruhové tyče: trubka / (plochá tyč):
Ø má být Tloušťka má být Šířka má být
naměřeno je:
min. Ø stěna/(min. tloušťka) (min. šířka)
max. Ø stěna/(max. tloušťka) (max. šířka)

REKLAMACE: označení délka tyče doprava váha svazku pokrivení

Datum: 12. 9. 2021 Podpis:

Do 3 dnů po dodání předat vzorky laboratoři.

LABORATOŘ

Tvrдост: 130 střed: 123, 123 HBW Tahová zk.: Rm _____ N/mm² Mikročistota: _____
140 okraj: 123, 123 HBW Rp 0,2 _____ N/mm² oxidy: _____
115 obvod: 123, 123, 123 HBW As _____ % sulfidy: _____
Z _____ % četnost: _____

Stav textury: Perlit-perlit
Stupeň přetvoření: < 30 % Velikost zrna: 35 µm Oduhličeno: ne ano
Chemické složení: vyhovuje nevyhovuje

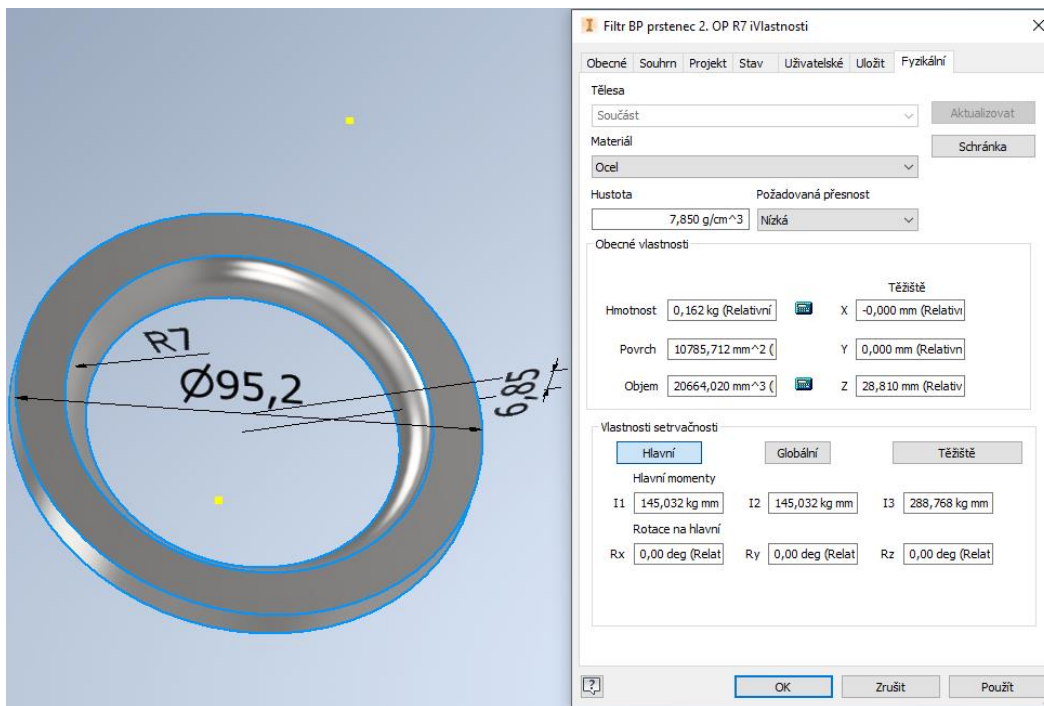
POUŽITÍ: uvolněno podmíněné uvolnění pozastaveno viz poznámka
Reklamacce: ano ne dodané množství jenom část
Poznámka: _____

Datum: 13-01-2021 Podpis:

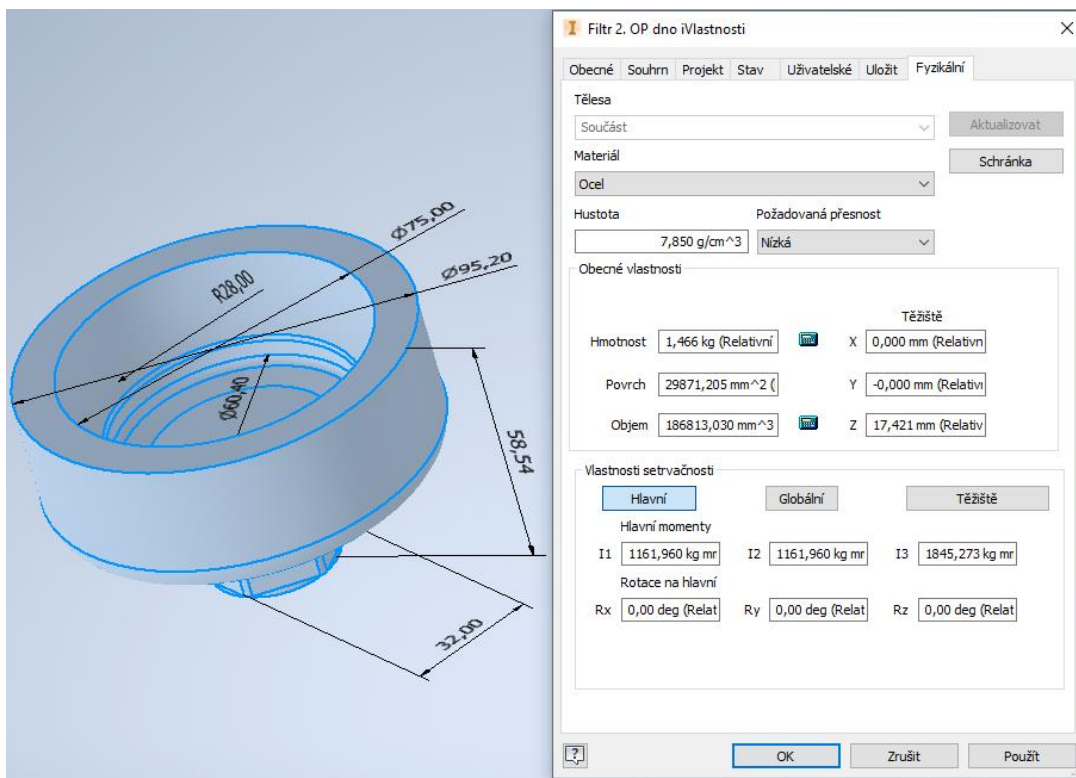
LOGISTIKA – rozpis spotřeby

Datum	Typ	Série	C-Kz	Spotř.hmot.	Ks	Hmot.	Odečteno	Hmot.	Zůstatek

Příloha 3 – Objemy přetvořeného materiálu
Objemy pro výpočet tloušťky dna:
Prstavec V_{01}



Dno hotového dílu V_{02}

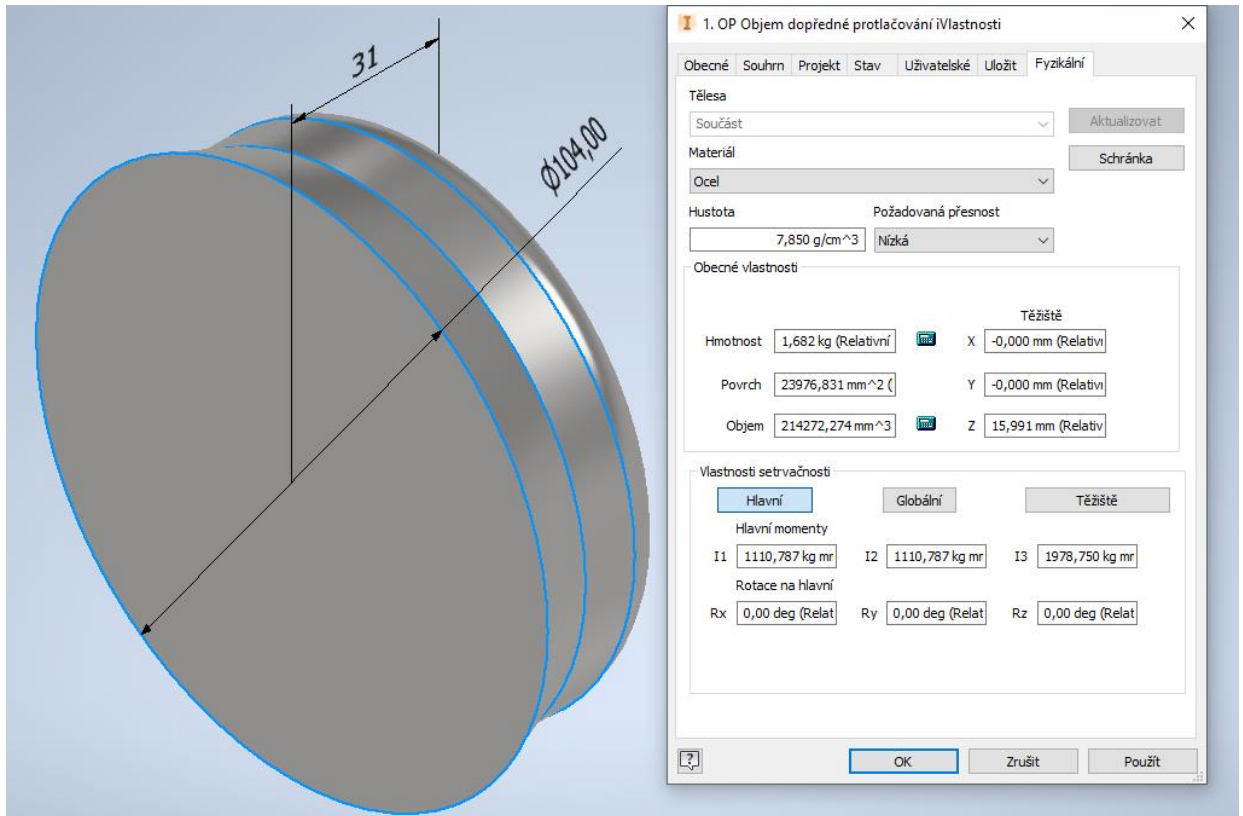


Příloha 3 – Objemy přetvořeného materiálu

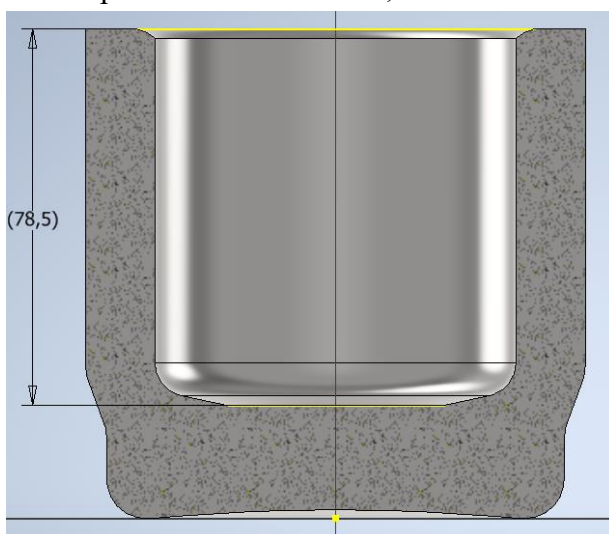
2/5

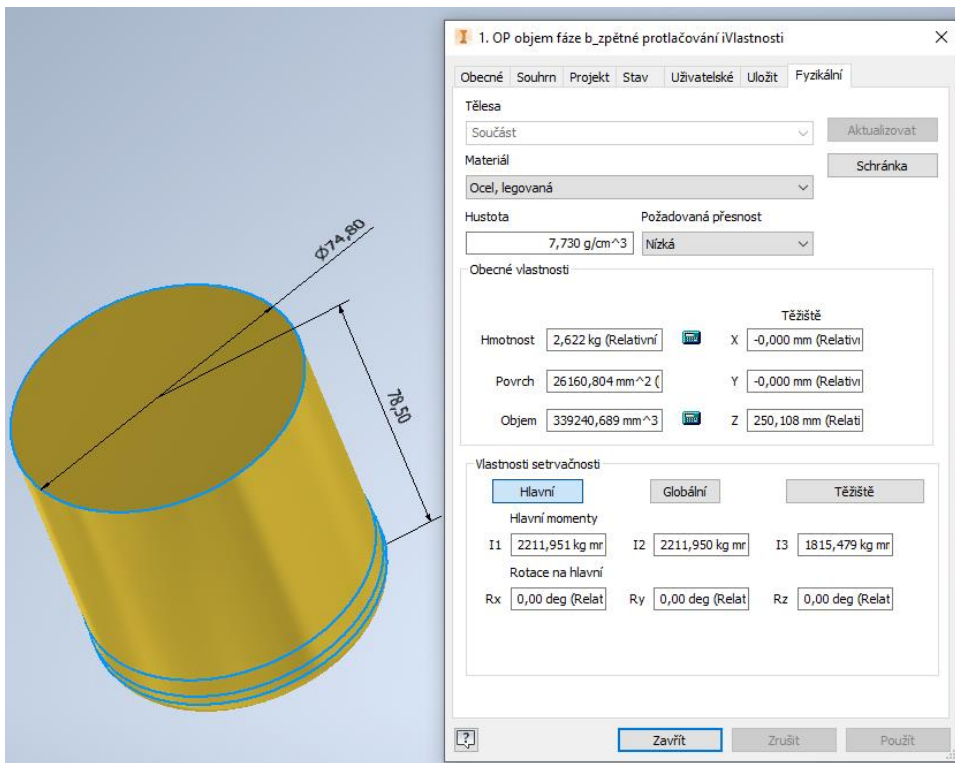
1. Operace:

fáze a) Objem protlačeného materiálu dopředným protlačováním je roven objemu protlačené spodní části protlačku.



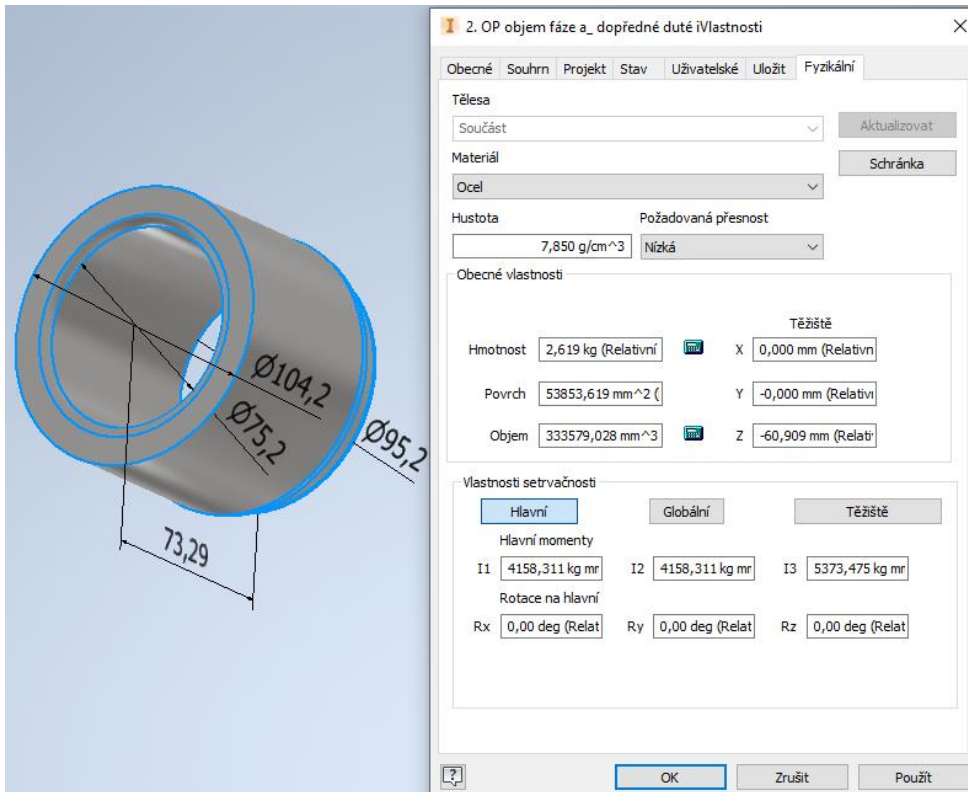
fáze b) Objem protlačeného materiálu zpětným protlačováním je roven objemu spodní části průtlačníku o délce 78,5 mm





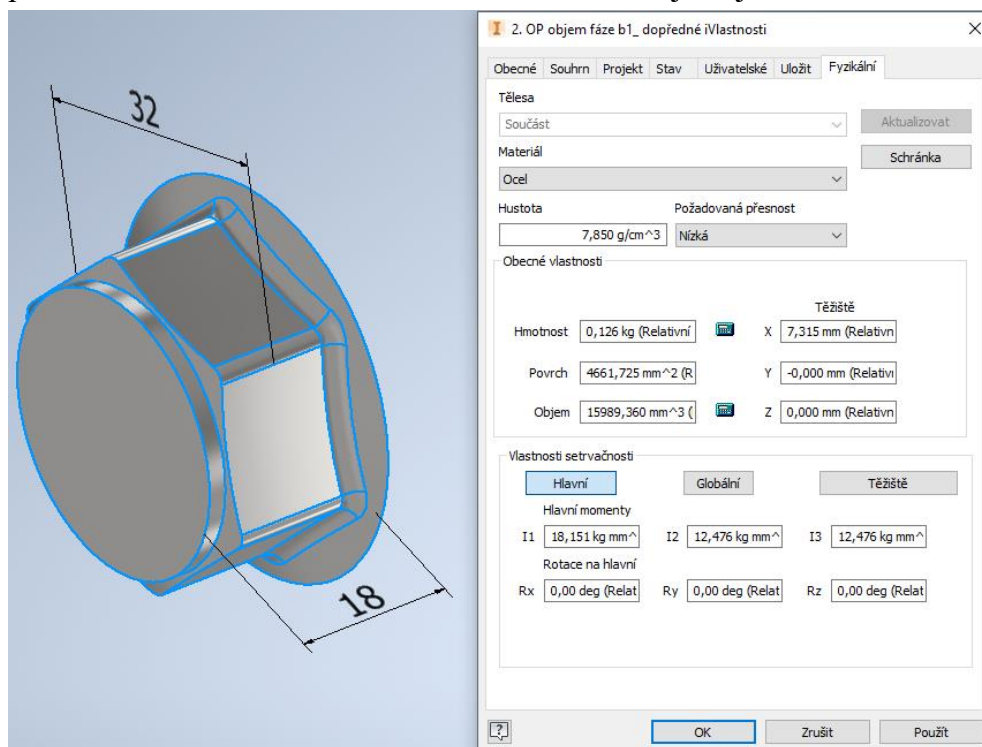
2. Operace:

fáze a) Objem protlačeného materiálu je roven objemu dutého válce s náběhovým kuzelem s úhlem 30° , tedy úhlem $\alpha = 15^\circ$

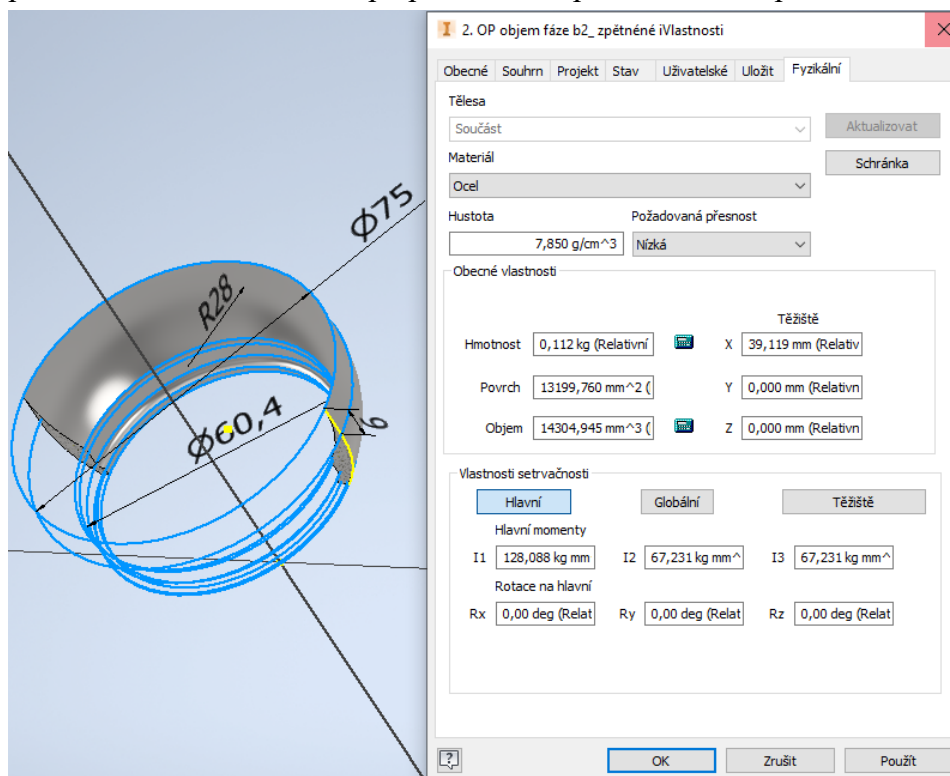


Příloha 3 – Objemy přetvořeného materiálu

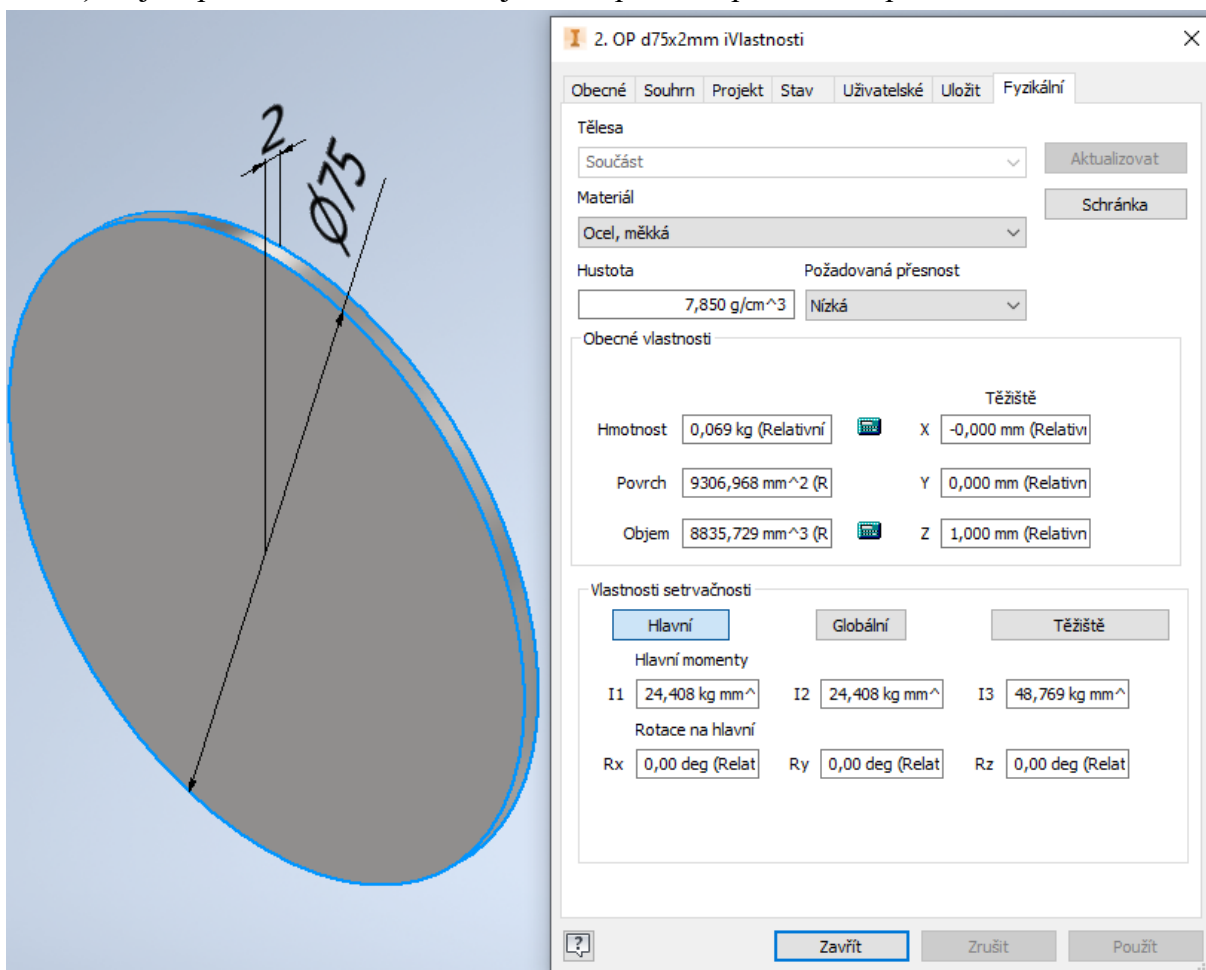
fáze b1) Objem přetvořeného materiálu dopředným protlačováním je roven objemu protlačeného šestihranu o vzdálenosti stran 32 mm, jímž je osazena hlava dílu.



fáze b2) Objem přetvořeného materiálu je roven mezikruží na vnějším tvaru průtláčnicku od průměru 75 mm s rádiusem po průměr 60,4 při délce kroku průtláčnicku 9 mm.



fáze c) Objem přetvořeného materiálu je roven průměru průtláčnicku při délce zdvihu 2 mm.



2. OP d75x2mm iVlastnosti

Obecné | Souhrn | Projekt | Stav | Uživatelské | Uložit | Fyzikální

Tělesa
 Součást: Aktualizovat

Materiál
 Ocel, měkká Schránka

Hustota Požadovaná přesnost
 7,850 g/cm³ Nízká

Obecné vlastnosti

		Těžiště	
Hmotnost	0,069 kg (Relativní)	X	-0,000 mm (Relativní)
Povrch	9306,968 mm ² (R)	Y	0,000 mm (Relativní)
Objem	8835,729 mm ³ (R)	Z	1,000 mm (Relativní)

Vlastnosti setrvačnosti

Hlavní momenty

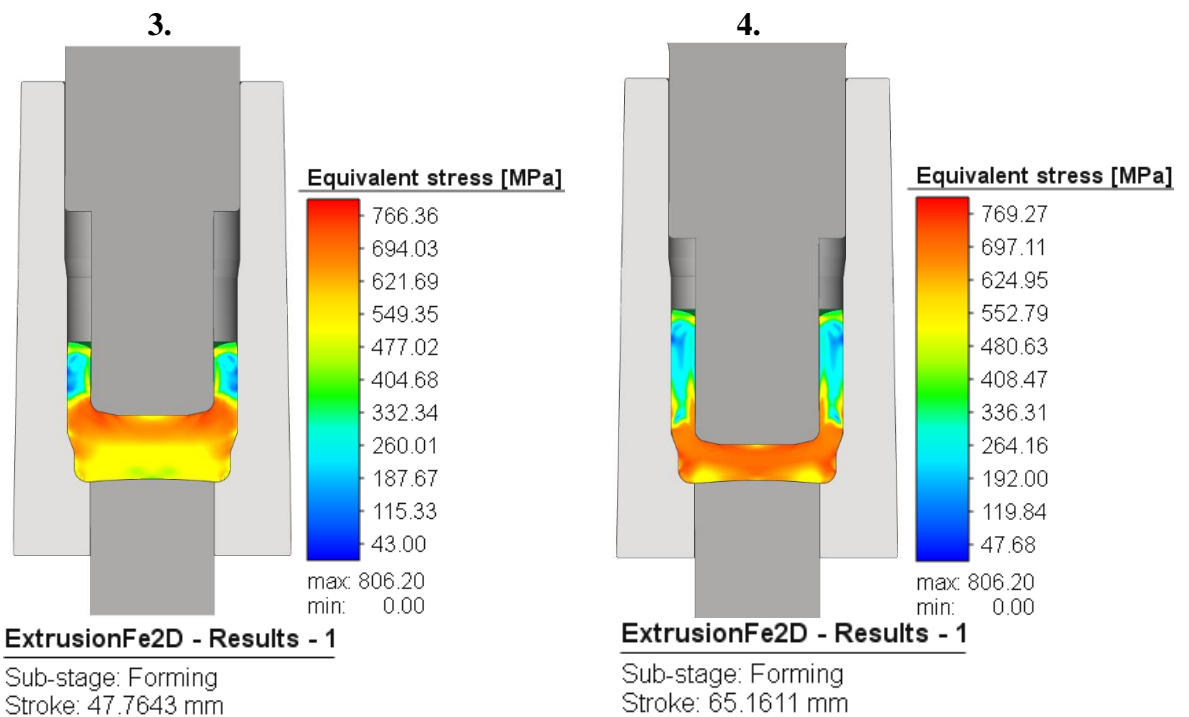
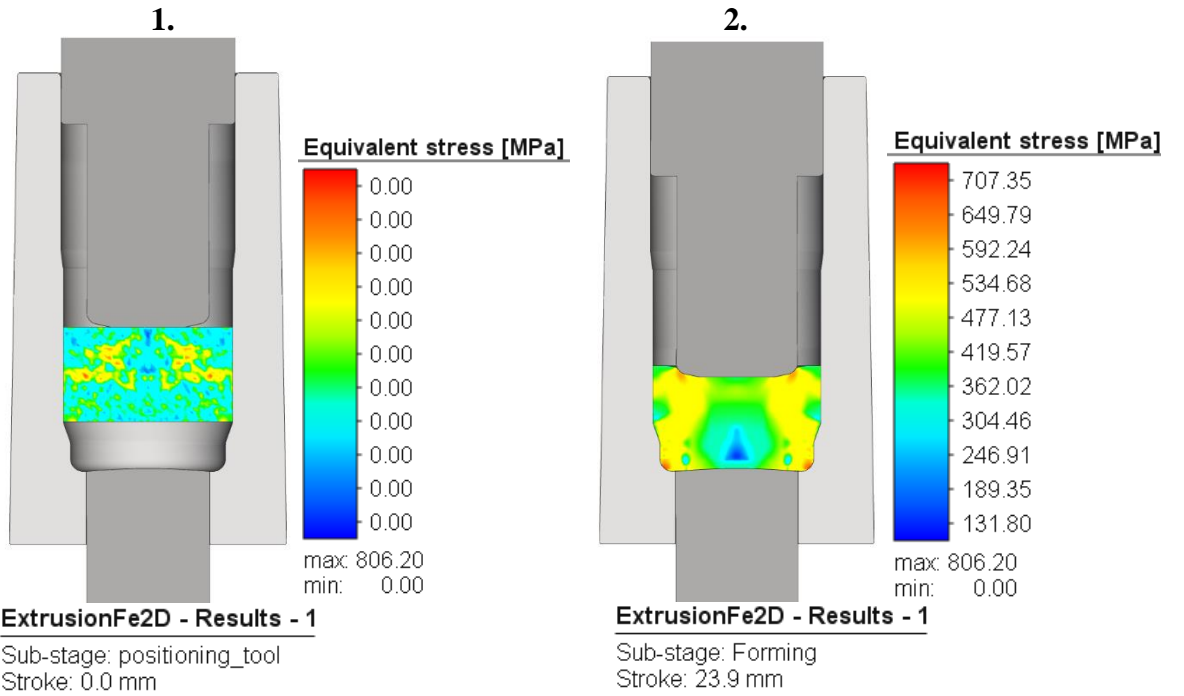
I1	24,408 kg mm ²	I2	24,408 kg mm ²	I3	48,769 kg mm ²
----	---------------------------	----	---------------------------	----	---------------------------

Rotace na hlavní

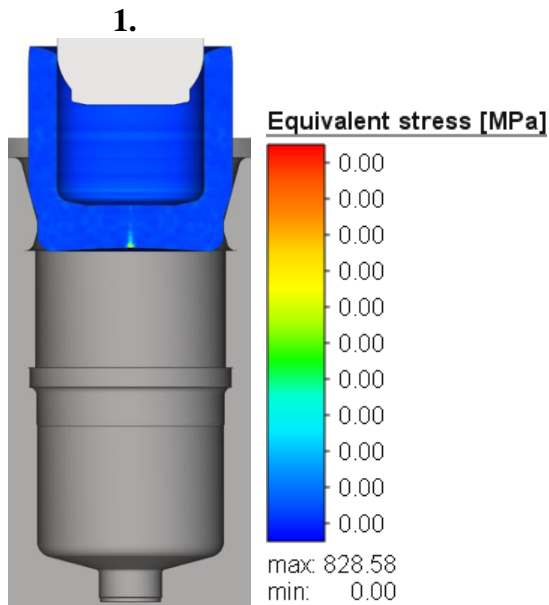
Rx	0,00 deg (Relat)	Ry	0,00 deg (Relat)	Rz	0,00 deg (Relat)
----	------------------	----	------------------	----	------------------

Zavřít | Zrušit | Použít

1. Tvářecí operace

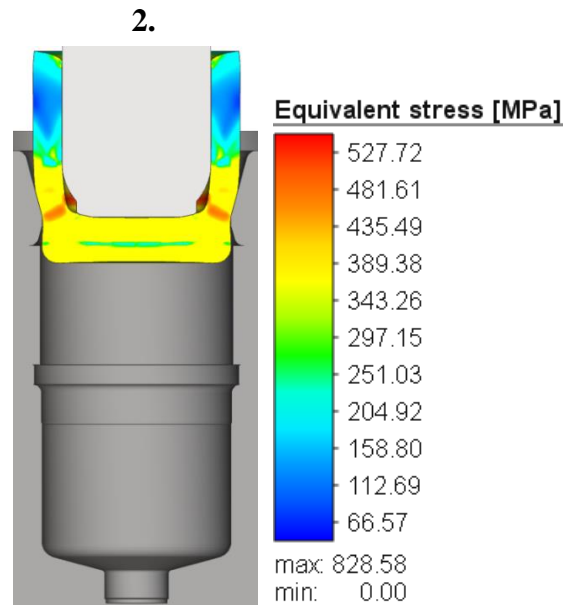


2. Tvářecí operace



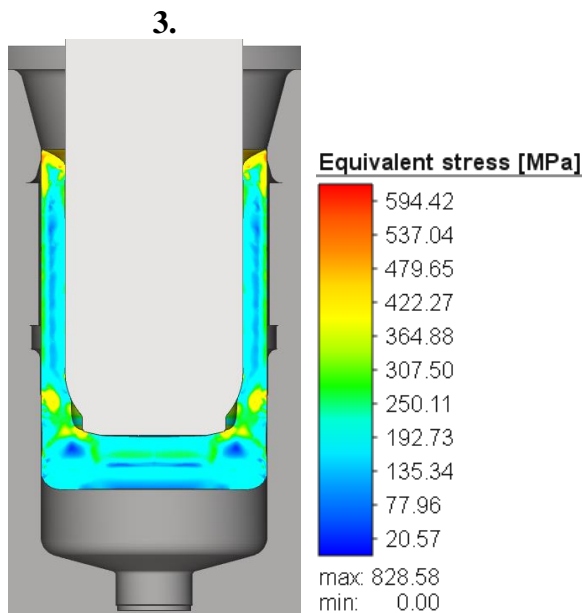
op2-rekrystal-zihani-2 - Results - 2

Sub-stage: positioning_tool
Time: 0.1 s
Stroke: 0.0 mm



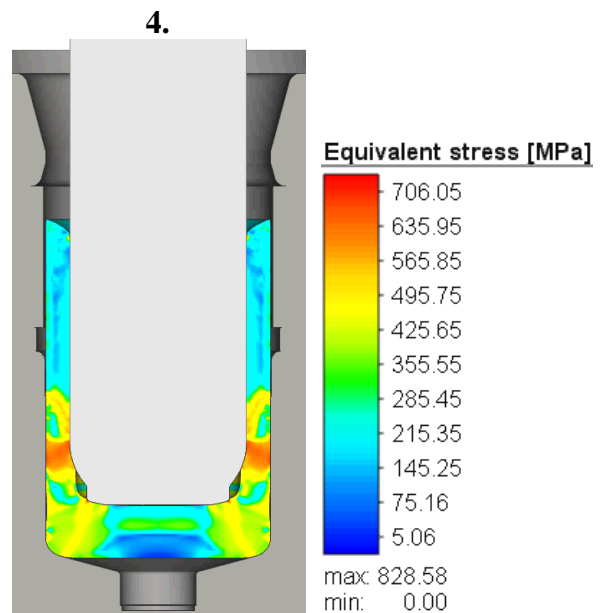
op2-rekrystal-zihani-2 - Results - 2

Sub-stage: Forming
Time: 12.1933 s
Stroke: 60.4666 mm



op2-rekrystal-zihani-2 - Results - 2

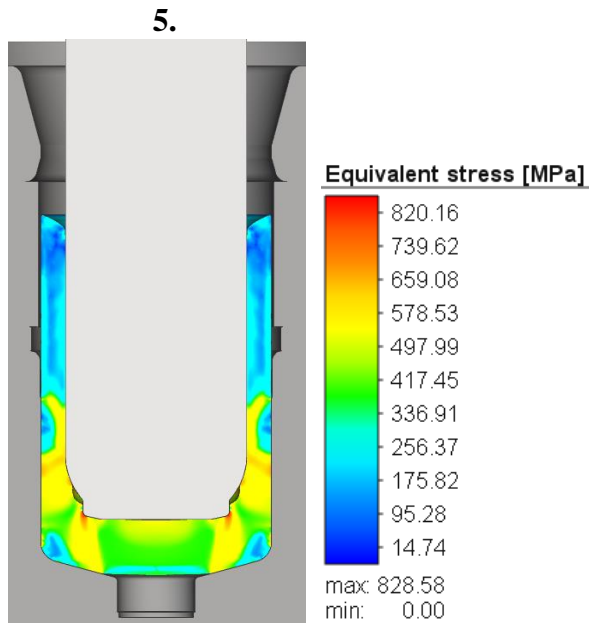
Sub-stage: Forming
Time: 36.3502 s
Stroke: 181.251 mm



op2-rekrystal-zihani-2 - Results - 2

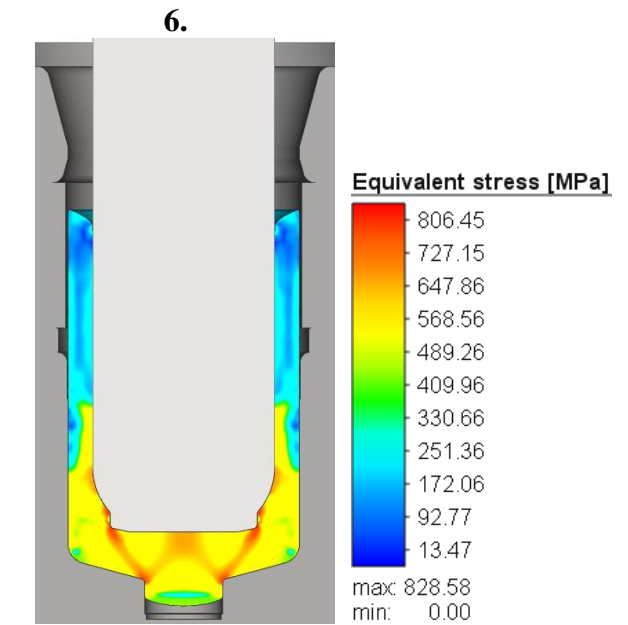
Sub-stage: Forming
Time: 42.1574 s
Stroke: 210.287 mm

2. Tvářecí operace



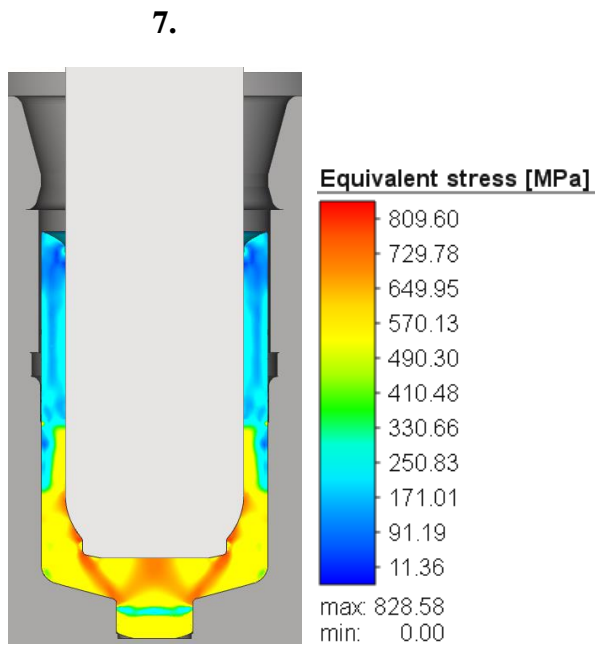
op2-rekrystral-zihani-2 - Results - 2

Sub-stage: Forming
Time: 43.0308 s
Stroke: 214.654 mm



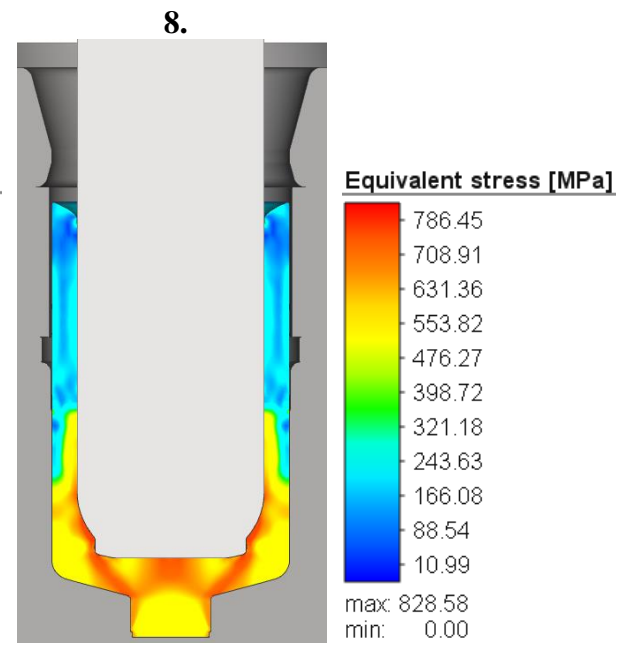
op2-rekrystal-zihani-2 - Results - 2

Sub-stage: Forming
Time: 43.9127 s
Stroke: 219.064 mm



op2-rekrystal-zihani-2 - Results - 2

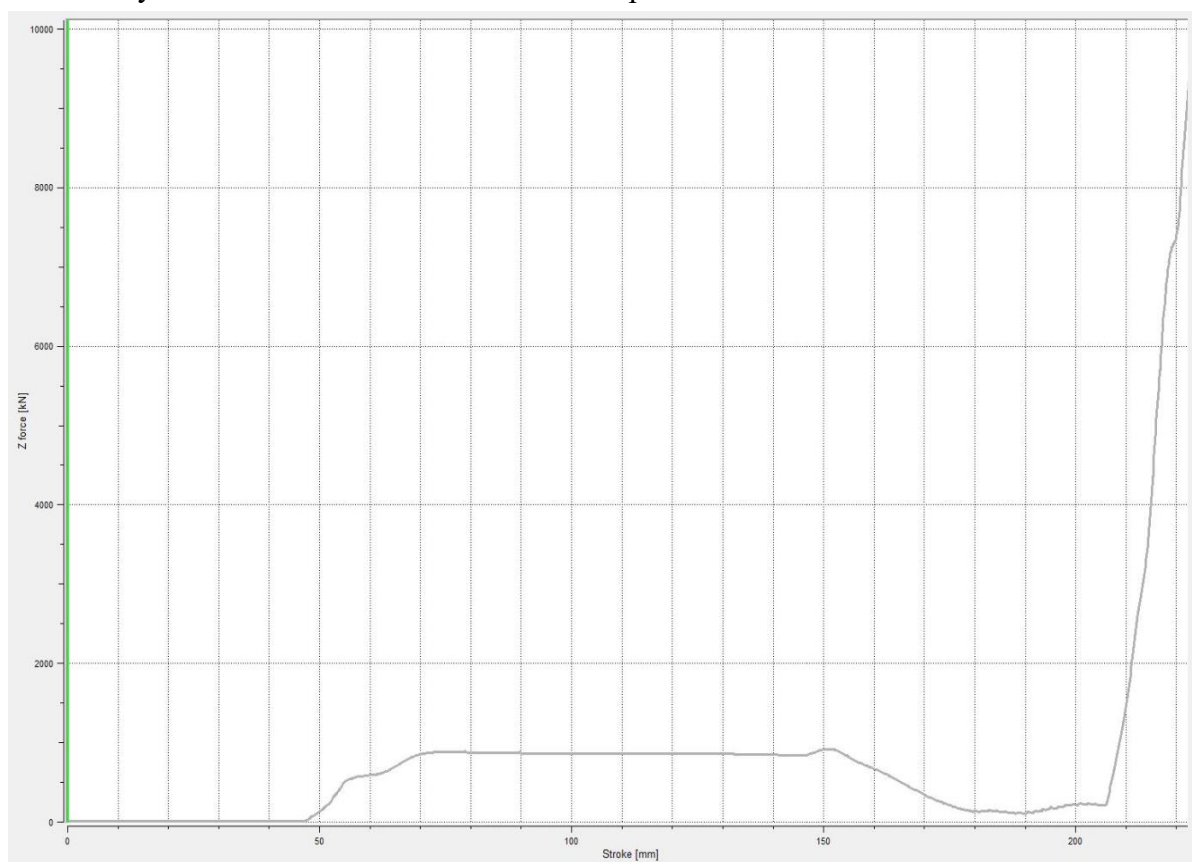
Sub-stage: Forming
Time: 44.3754 s
Stroke: 221.377 mm



op2-rekrystal-zihani-2 - Results - 2

Sub-stage: Forming
Time: 44.7991 s
Stroke: 223.495 mm

Průběh síly v závislosti na zdvihu ve 2. tvářecí operaci



d) Dopředné protlačování dutého tělesa (obr. 30),

kde: $\varnothing d_0 = 104,2 \text{ mm}$,
 $\varnothing d_1 = 95,2 \text{ mm}$,
 $\varnothing D_2 = 75 \text{ mm}$,
 $V = 333\,579 \text{ mm}^3$,
 $f_1 = f_2 = 0,05$,
 $\alpha = 15^\circ$.

- Logaritmičké přetvoření je vypočteno dle vztahu (2.6)

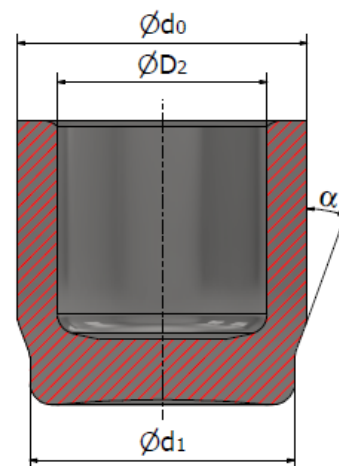
$$\varphi_{2a} = \ln \frac{d_0^2 - D_2^2}{d_1^2 - D_2^2} = \ln \frac{104,2^2 - 75^2}{95,2^2 - 75^2} = 0,42$$

- Podmínka maximálního přetvoření

$$\varphi_{2a} = 0,42 \in \langle 0; 1,64 \rangle \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

- Změna příčného průřezu je vypočtena dle vztahu (2.7)

$$\varepsilon_{2a} = \frac{d_0^2 - d_1^2}{d_0^2 - D_2^2} \cdot 100 = \frac{104,2^2 - 95,2^2}{104,2^2 - 75^2} \cdot 100 = 34 \%$$



Obr. 30 Dopředné protlačování 2. OP, fáze a)

Pro logaritmičké přetvoření u zpětného protlačování $\varphi_{2a} =$

0,42 byly z grafu přetvárných odporů odečteny hodnoty $\sigma_p = 750 \text{ MPa}$ a měrné přetvárné práce $A_j = 0,28 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}$

- Deformační odpor pro dopředné protlačování dutého tělesa podle Feldmana. Plnicí kontejner zde slouží k založení polotovaru, ale nedochází k žádnému tření mezi materiálem a jeho stěnami, k tomu dochází pouze v redukčním očku průtláčnice. Proto je část rovnice, pro kontejner nulová.

$$\begin{aligned} \sigma_d &= \sigma_p \cdot \varphi_{2a} \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\frac{\pi \cdot \alpha}{180}}{\varphi_{2a}} + 2 \cdot \frac{f_2}{\frac{\pi \cdot \alpha}{180}} \right) + \pi \cdot d_0 \cdot L_1 \cdot \frac{f_1}{S_0} \cdot \sigma_{p1} \\ &= 750 \cdot 0,42 \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\frac{\pi \cdot 15}{180}}{0,42} + 2 \cdot \frac{0,05}{\frac{\pi \cdot 15}{180}} \right) + 0 = 586,84 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Vypočtená hodnota deformačního odporu σ_d je zaokrouhlena na 587 MPa.

- Tvářecí síla pro dopředné protlačování ve fázi a) je vypočtena dle vztahu (2.11)

$$F_{p2a} = S_p \cdot \sigma_d = \frac{\pi \cdot 104,2^2}{4} \cdot 587 = 5\,005\,683,89 \text{ N}$$

Vypočtená tvářecí síla F_{p2a} je zaokrouhlena na 5 006 kN.

- Přetvárná práce pro dopředné protlačování ve fázi a) je vypočtena dle vztahu (2.12)

$$A_{2a} = V \cdot \int_0^z \sigma_d \cdot d\varphi = A_j \cdot V = 0,28 \cdot 333\,579 = 93\,402,12 \text{ J}$$

Vypočtená přetvárná práce A_{2a} je zaokrouhlena na 93,4 kJ

LIS P100 EITEL 1250

NP 00199-00P001

1. Úvod

Tento návod k používání je nutno považovat za součást stroje. Dodavatelům jak nových, tak i repasovaných strojů se doporučuje, aby si uschovali dokumentovaný doklad o tom, že byl tento návod k používání dodán se strojem.

Výstražný bezpečnostní symbol



Tento výstražný bezpečnostní symbol označuje důležitá sdělení v tomto návodu k používání. Kdykoli uvidíte tento symbol, dejte pozor na nebezpečí zranění, pečlivě přečtěte následující sdělení a informujte ostatní obsluhující.

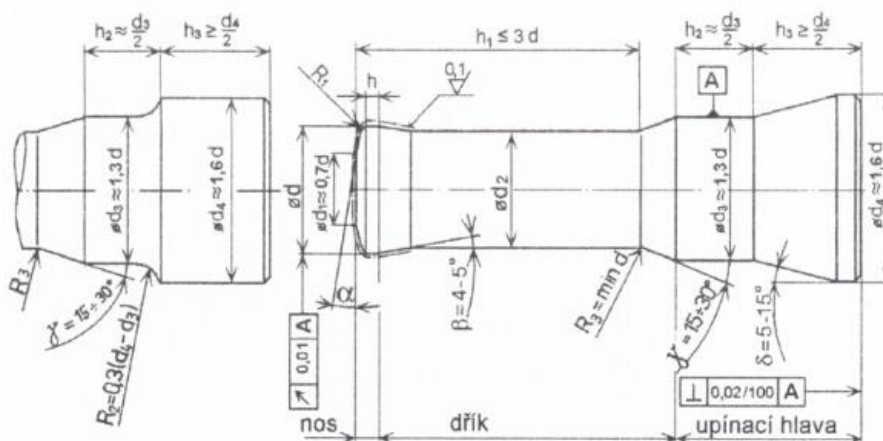
2. Technické údaje

2.1. Technické parametry, rozměry

Jmenovitá lisovací síla	kN	12500
Zpětná síla	kN	2018
Pracovní tlak	bar	315
Zdvih beranu	mm	1000
Rychlost beranu:		
- Lisovací rychlost	mm/s	65-125
- Přibližovací rychlost	mm/s	600
- Zpětná rychlost	mm/s	577
Pracovní kapalina	hydraulický olej	ISO VG 46
Objem olejové nádrže	dm ³	10620
Hydraulický akumulátor – plnicí plyn DUSÍK, plnicí tlak	bar	40
Příkon - celkový	kW	920
Spodní vyhazovač:		
Jmenovitá vyhazovací síla	kN	2500
Zpětná síla	kN	1500
Rychlost vysouvání - vyhazování	mm/s	153
Rychlost zasouvání	mm/s	252
Rychlost rychlého vysouvání (max. síla 990kN)	mm/s	392
Pracovní tlak ve vyhazovači	bar	315
Zdvih válce vyhazovače	mm	600
Chladicí obvod		
připojení chladicí vody		DN100 PN16
min. průtok chladicí vody	dm ³ /min	250
max. teplota chladicí vody na vstupu chladiče	°C	23
Okolní teplota:		
-provozní	°C	5 až +35
-skladovací		-10 až +50

8.2.3. Nástroje pro zpětné protlačování [2], [17], [22], [29].

Tvar čela průtlačníku pro zpětné protlačování je rozhodující a podstatně ovlivňuje velikost a průběh protlačovací síly. V praxi se nejlépe osvědčil tvar průtlačníku podle obr. 8.26. Čelní plocha je mírně kuželovitého tvaru a úhel α se volí nejen s ohledem na tvar průtlačku, ale především s ohledem na tvářecí teplotu, viz Tab.6



Obr.8.26 Doporučený tvar s rozměry průtlačníku pro zpětné protlačování

Tab.6 Geometrické parametry průtlačníků

	TEPLOTA ZPĚTNÉHO PROTLAČOVÁNÍ			
	20°C	200 až 400°C	400 až 700°C	700°C a více
ød	d-(0,1až 0,2)	d-(0,2 až 0,5)	d-(0,3 až 0,6)	d-(0,4 až 1,0)
h	0,5√d	2 až 3 mm	3 až 5 mm	5 až 20 mm
α	5 až 8°	5 až 15°	5 až 15°	20°
R ₁	(0,05 až 0,1)d	1 až 3 mm	1 až 4 mm	2 až 10 mm
d ₁	d-(2R ₁ + 0,2d) ≈ 0,7 d			

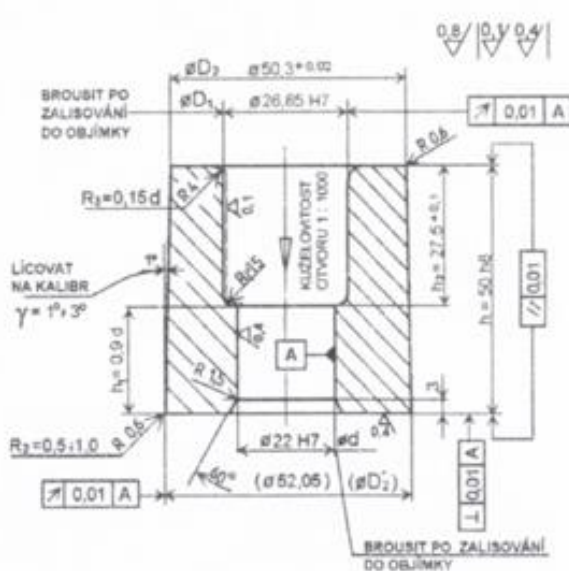
Průtlačnice

Funkční dutina průtlačnic pro zpětné protlačování je daná tvarem protlačované součásti. Ústí pracovní dutiny je buď zaobleno nebo s kuželovým náběhem pro usnadnění zavádění polotovaru. Zaoblením R₁ snižujeme koncentraci radiálních napětí. Otevření dutiny s mírnou kuželovitostí (asi 1:1000) je potřebné k zabránění velkých osových tahů při vyhazování průtlačků. Funkční povrch dutiny je broušen a lapován. Průtlačnice pro zpětné protlačování a pechovnice mají přibližně stený tvar. Vliv teploty na uložení vyhazovače v průtlačnici je zřejmý z Tab.7.

Tab.7 Vliv teploty na uložení vyhazovače

TEPLOTA TVÁŘENÍ [°C]	ULOŽENÍ ød VYHAZOVAČE
20	H7/f7
200 až 400	H8/f8
400 až 700	H8/e9
700 a více	H8/e9

Průtlačnice

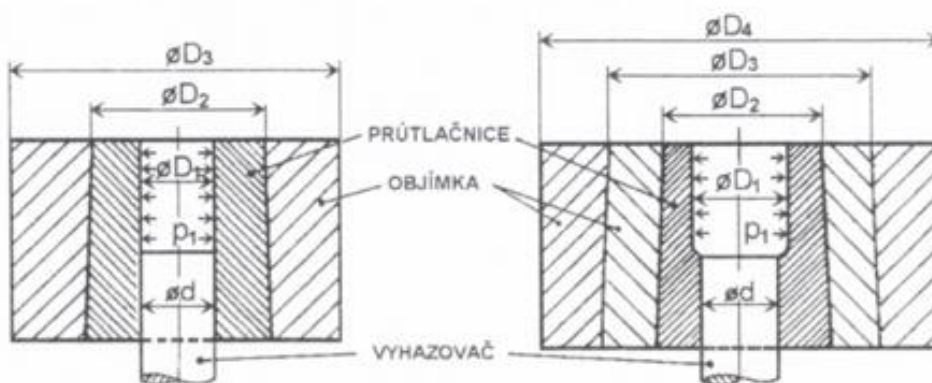


Tab.7 Vliv teploty na uložení vyhazovače

TEPLOTA TVÁŘENÍ [°C]	ULOŽENÍ od VYHAZOVAČE
20	H7/f7
200 až 400	H8/f8
400 až 700	H8/e9
700 a více	H8/e9

Únosnost průtlačnic se zvyšuje radiálním předpětím pomocí jedné nebo více objímek, obr.8.30. Jednoduchou průtlačnicí bez objímky lze použít pro radiální tlaky do 1000 MPa. Tloušťka stěny je dána optimálním poměrem $D_2/D_1=4$. Rozsah zatižení a doporučené geometrické parametry složených průtlačnic jsou uvedeny v Tab.8.

Obr.8.29 Průtlačnice pro zpětné protlačování.



Obr. 8. 30 Typické tvary průtlačnic a jejich pouzření objímkami

Tab.8 Geometrické parametry průtlačnic

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

ČSN 41 9830	Rychlořezná výkonná Mo-W ocel	OCEL
STN 41 9830	s vysokou houževnatostí	19 830

Chemické složení [hm. %]

C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	W	V
0,80–0,90	max 0,45	max 0,45	max 0,035	max 0,035	3,80–4,60	4,50–5,50	5,50–7,00	1,50–2,20

Polotovary

- [1] tyče válcované nebo kované za tepla [3] výkovky
 [2] tyče broušené [4] plechy

Mechanické vlastnosti ¹⁾

Polotovaz	[1] [2]
Rozměr d [mm]	20
Stav	kalený a popouštěný
Tvrdość HRC	65–66 (K. t. 1 200 °C/olej; P. t. 550–580 °C/3× 1 h)
Mez kluzu v tlaku R _{el} [MPa]	3 500–3 600 (při tvrdości 66–65 HRC)
Pevnosť v ohybu R _{m0} [MPa]	4 400 (při tvrdości cca 65 HRC)

Fyzikální vlastnosti ²⁾

Hustota ρ [kg . m ⁻³]	Měrná tepelná kapacita c _p [J . kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Teplotní součinitel roztlačnosti α [K ⁻¹]	Tepelná vodivost λ _t [W . m ⁻¹ . K ⁻¹]	Konduktivita λ _s [MS . m ⁻¹]
8 100	–	11,1.10 ⁻⁶	30	–

Odolnosť proti degrađačním procesům

ODOLNOST PROTI KOROZI malá	ODOLNOST PROTI KŘEHKÉMU LOMU malá
-------------------------------	--------------------------------------

Technologické údaje**TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ**

žhání na měkko	800–840 °C	ochlazování v peci; max tvrdość 270 HB
žhání ke snížení prnutí	700–750 °C	ochlazování v peci
kalení	a) 1 220–1 250 °C	ochlazování v oleji
	b) 1 190–1 220 °C	ochlazování v solné lázni 500–550 °C
	c) 1 150–1 170 °C	nebo ochlazování dmých. vzduchem
prokalitelnosti popouštění	v celém průřezu používaných nástrojů	
tvrdość	a) 560–580 °C	min 3× 1/2 až 2 h
	b) 550–570 °C	min 3× 1/2 až 2 h
	c) 150–300 °C	min 1 až 2 h
teploty přeměn	obvykle 65–66 HRC nebo podle potřeby	
závislost tvrdości na popouštěcí teplotě	A _{c1} ~ 820–870 °C	M _s ~ 155–165

teplota [°C]	520	540	560	580	600	620
tvrdość HRC	63	65	66	65	64	62


TVAŘITELNOST

obtížně tvařitelná teploty tváření 1 100–900 °C

SVÁŘITELNOST					
obtížná					
OBROBITELNOST					
	třída obrobitelnosti pro stav .3				
soustružení a hoblování	9b				
frézování a vrtání	9b				
broušení	6b				
Použití					
<p>Řezné nástroje. Výkonné nástroje se zvětšenou houževnatostí, zejména pro obrábění kovových materiálů o střední a menší pevnosti (asi do 900 MPa), jako např. různé druhy nožů, frézy, vrtáky, výstružníky, výhrubníky, závitníky, závitové čelisti, obražecí nože na ozubení, dále protahovací a protlačovací trny, pilové kotouče, pilové listy, řezací a vysekávací nože a další.</p> <p>Nástroje pro stříhání za studena. Velmi značně namáhané nástroje s velkou výkonností a životností pro stříhání a děrování materiálů malých tlouštěk (asi 1 až 2 mm), zejména pro velké série výrobků a větší požadavky na houževnatost.</p> <p>Nástroje pro tváření za studena. Velmi namáhané, tvarově jednodušší nástroje pro ražení materiálů menších tlouštěk, vlačovací a protlačovací trny pro největší měrné tlaky, dále menší hladké a profilové válce.</p> <p>Nástroje pro tváření za tepla. Velmi tepelně a mechanicky namáhané vložky lisovacích nástrojů a kováčka rotačního tváření. Ruční nástroje – pilové listy na kovy.</p>					
Ostatní vlastnosti					
Druh oceli podle způsobu výroby	Barevné značení podle ČSN 42 0010	Třída odpadu podle ČSN 42 0030			
elektroocel	hnědá–černá–stříbrná	051			
Porovnání se zahraničními materiály					
<i>ISO</i>		<i>EURO</i>		<i>Německo</i>	
HS 6-5-2	ISO 4957	HS 6-5-2	EN 96-79	HS 6-5-2	DIN 17350-80
				X82WMoCrV654	DIN 17230
<i>Francie</i>		<i>Velká Británie</i>		<i>Rusko</i>	
Z85WDCV06-05-04-02	NF A35-590-78	BM2	BS 4659-89	R6M5	GOST 19265-73
HS6-5-2	NF A35-590-92				
<i>USA</i>		<i>Japonsko</i>		<i>Kanada</i>	
M2	AISI	SKH51	JIS G4403-83	–	–
M2	SAE J438b				
M2	ASTM A600				
T11302	UNS				
<i>Itálie</i>		<i>Rakousko</i>		<i>Švédsko</i>	
HS 6-5-2	UNI 2955-82	S600	VEW-78	2722	SS 142722
<i>Polsko</i>		<i>Maďarsko</i>		<i>Norsko</i>	
SW7M	PN H85022-86	R6	MSZ 4351-84	–	–
<i>Finsko</i>		<i>Švýcarsko</i>		<i>Španělsko</i>	
916	SFS-916	–	–	HS 6-5-2	UNE 36018-94
<i>Čína</i>		<i>Rumunsko</i>		<i>Bulharsko</i>	
W6Mo5Cr4V2	GB 9943-88	Rp5	STAS 7382-88	R6M5	BDS 7008-86
<i>Brazílie</i>		–		–	
VWM-2	Br. 800	–	–	–	–
Poznámky					
1) hodnoty tvrdosti platí pro referenční vzorky $\varnothing 20 \times 20$ mm					
2) fyzikální vlastnosti jsou uvedeny pro žháný stav na měkko a pro teplotu 20-100 °C					
a) tvarově jednoduché, hrubovací nástroje					
b) tvarově složité nebo jemnobřité nástroje					
c) nejjemnější řezné nebo tvářecí a střížné nástroje					

ČSN 41 9437		Nástrojová vysokolegovaná Cr-W-V					OCEL		
STN 41 9437		ocel pro práci za studena					19 437		
Chemické složení [hm. %]									
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	W	V	
1,80–2,05	0,20–0,45	0,20–0,45	max 0,030	max 0,035	11,00–12,50	max 0,50	0,60–1,00	0,15–0,30	
Polotovary									
[1] tyče kované nebo válcované za tepla									
[2] tyče broušené nebo broušené a leštěné									
[3] výkovky									
Mechanické vlastnosti ¹⁾									
Polotovar					[1]				
Rozměr t, d [mm]					20				
Stav					kalený a popuštěný				
Mez kluzu R_e nebo $R_p 0,2$ [MPa]					–				
Mez pevnosti R_m [MPa]					–				
Tažnost A_5 [%]					–				
Kontrakce Z [%]					–				
Vrubová houževnatost KCU 2 [J.cm ⁻²]					–				
Tvrdost HRC					58–64 (K.t. 980 °C/olej; Pt. 100–300 °C/1×2 h)				
Mez kluzu v tlaku R_{et} [MPa]					2 750–3 000 (při HRC 58–64)				
Pevnost v ohybu R_{mo} [MPa]					~3 750 (při HRC 62)				
Fyzikální vlastnosti									
Hustota		Měrná tepelná kapacita		Teplotní součinitel roztažnosti		Tepelná vodivost		Rezistivita	
ρ [kg . m ⁻³]		c_p [J . kg ⁻¹ .K ⁻¹]		α [K ⁻¹]		λ_t [W . m ⁻¹ . K ⁻¹]		ρ [Ω . m]	
7 730		–		12,1 . 10 ⁻⁶		29,5		–	
Odolnost proti degradačním procesům									
ODOLNOST PROTI KOROZI									
relativně malá									
ODOLNOST PROTI KŘEHKÉMU LOMU									
velmi malá									
Technologické údaje									
TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ									
žihání na měkko		750–780 °C		ochlazovat v peci – max 250 HB					
žihání ke snížení pnutí		600–650 °C		ochlazovat v peci					
kalení		960–1 000 °C ³⁾		ochlazovat v oleji, na vzduchu nebo termálně – min 62 HRC					
		1 040–1 080 °C ⁴⁾		ochlazovat v lázni o teplotě asi 450 °C					
popuštění primární		100–300 °C		ochlazovat na vzduchu					
sekundární		520–540 °C		ochlazovat na vzduchu					

prokalitelnost	v celém průřezu používaných nástrojů				
tvrdost	primární	58–64 HRC			
	sekundární	59–61 HRC			
teploty přeměn	$A_{c1} \sim 800\text{--}830\text{ }^{\circ}\text{C}$ $M_s \sim 190\text{ }^{\circ}\text{C}$				
závislost tvrdosti na popouštěcí teplotě					
popouštěcí teplota [$^{\circ}\text{C}$]	100	150	200	250	300
tvrdost HRC	64	63	62	60	58
TVAŘITELNOST					
tvářitelnost za tepla	– obtížná				
teploty tváření	1 050–850 $^{\circ}\text{C}$				
SVAŘITELNOST					
obtížná					
OBROBITELNOST					
stav .3	soustružení, hoblování	frézování, vrtání	broušení		
	9 b	9 b	5 b		
Použití					
Nástroje pro stříhání za studena – prostřihovací a děrovací nástroje s nejvyšší výkonností pro stříhání materiálů o vysoké pevnosti a malých tloušťkách (např. transformátorové plechy ve velkých svíticích), nože nůžek pro stříhání materiálů, např. drátů o vysoké pevnosti a malé tloušťce (asi do 4 mm).					
Nástroje pro tváření za studena – malé nástroje (trny) pro tlačení hlubokých tvarů vysokými spec. tlaky, malé nástroje pro tažení a průvlak, jednoduché nástroje na protlačování se zvýšenou odolností proti opotřebení.					
Nástroje řezné – protahovací a protlačovací trny, tvarové nože a frézy pro menší rychlosti, zejména pro obrábění nekovových a abrazivních materiálů.					
Formy – malé formy a vložky s vysokou životností pro lisování abrazivních práškových hmot, porcelánu, keramických materiálů, plastických hmot s abrazivními plnidly.					
Ostatní vlastnosti					
Druh oceli podle způsobu výroby	Barevné značení podle ČSN 42 0010		Třída odpadu podle ČSN 42 0030		
elektroocel	hnědá–černá–bílá		006		
Porovnání se zahraničními materiály					
ISO		EURO		Německo	
X210CrW12	ISO 4957	X210CrW 12-1	EN 96-79	X210CrW12	DIN 17350-80
Francie		Velká Británie		Rusko	
X210CrW 12-1	NF A35-590-92	–	–	–	–
Z210CrW 12-01	NF A35-590-78				
USA		Japonsko		Kanada	
–	–	–	–	–	–
Itálie		Rakousko		Švédsko	
215CrW 12-1KU	UNI 2955-82	–	–	2312	SS142312
Polsko		Maďarsko		Norsko	
–	–	–	–	–	–
Finsko		Švýcarsko		Španělsko	
–	–	–	–	X210CrW12 F.5213	UNE 36018-94 UNE 36018-94
Poznámky					
1) mechanické vlastnosti platí pro referenční vzorky $\varnothing 20$ mm					
2) fyzikální vlastnosti jsou uvedeny pro stav žháný na měkko					
3) obvyklé teploty kalení s popouštěním na primární tvrdosti					
4) teploty kalení vhodné pro sekundární popouštění umožňující nitridování nástrojů					

		Název dílu:			
VÝROBNÍ POSTUP		OBAL FILTRU			
Číslo koneč./zákaz. výkresu	Materiál		Zákaznické číslo		Index
BP2021_002	C15R +U; KR104 x 6000		BP 2021		1
Vypracoval :		Datum:		Číslo výkresu:	
Lukáš Podloucký		12.4.2022		BP2021_003	
Krok	Pracoviště:	Stroj:	Pracovní operace	Označení nástroje	Materiál nástroje
00	Řezárna	-	Přípravit materiál pro řezání	-	-
01	Řezárna	Pásová pila Pegas 230x280 SHI-LR	Upnout, řezat na pásové pile na přířezy Ø104 x 57,9	N1	HSS
02	LPÚ	LPÚ 3	Fosfátovat, mýdlovat	-	-
03	Lisovna	Eitel 1250	Lisovat 1. operaci dle postupového výkresu	BPS1.OP	-
04	Tepelná zpracování	IPSEN	Rekrystalizačně žíhat 700°C / 20 min	-	-
05	LPÚ	LPÚ 3	Fosfátovat, mýdlovat	-	-
06	Lisovna	Eitel 1250	Lisovat 2. operaci dle postupového výkresu	BPS2.OP	-
07	LPÚ	LPÚ 2	Fosfátovat Zn + olejovat	-	-
08	Výstupní kontrola	-	Kontrolovat na naraženiny šestihranu, vnitřní průměr, min 135	-	-
09	Výstupní kontrola	-	Balit dle balíčního předpisu pro BP2021_002, expedovat	-	-