



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NÁVRH VÝROBY HŘÍDELE HYDRAULICKÉHO ČERPADLA

MANUFACTURING OF THE HYDRAULIC PUMP SHAFT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Zbyněk Nečas

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michaela Císařová, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Zbyněk Nečas**
Studijní program: Strojírenská technologie
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Michaela Císařová, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24

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

Návrh výroby hřídele hydraulického čerpadla

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Téma práce je zaměřeno na návrh výroby unášecího hřídele, které je součástí hydraulického čerpadla. V závěrečné práci bude uvedena problematika technologie objemového tváření a proveden návrh výroby zadané součásti.

Cíle diplomové práce:

Zhodnocení současné technologie výroby součástí podobných tvarů. Vypracování literární studie na zvolenou technologii výroby a zpracování postupu výroby doplněné technologickými a kontrolními výpočty. Součástí práce bude i návrh sestavy nástroje a lisovacího stroje včetně výkresové dokumentace.

Seznam doporučené literatury:

GROOVER, Mikell. Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems. Hoboken: JOHN WILEY, 2010. ISBN 978-0470-467002.

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

FELDMANN, Heinz D. Protlačování oceli: určeno pro technology a konstruktéry. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962.

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

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá návrhem technologie výroby unašecí hřídele hydraulického čerpadla, jejíž hlavním prvkem je drážkování uvnitř dutiny hřídele. Zadaná součást bude vyráběna firmou Metaldyne Oslavany, spol. s.r.o., kde byla stanovena výrobní série na 300 000 kusů ročně. Zároveň byl také zadán materiál součásti jako ocel DIN 20CrMo5, která bude pro výrobu nakupována v tyčích o průměru 42 mm. Z nich bude následně řezán polotovar pomocí kotoučových pil. Po zhodnocení zadaných požadavků je na základě provedeného rozboru zadání zvolena technologie výroby pomocí objemového tváření za studena, konkrétně metoda protlačování v kombinaci s pěchováním, na kterou se práce dále zaměřuje. Pro výrobu byly navrženy tři základní postupy, pro které byla ověřena jejich vyrobiteľnost pomocí simulačního softwaru Simufact Forming 2023.4. Pro nejvhodnější výrobní variantu jsou vypočteny přirozené i deformační přetvárné odpory a tvářecí síly ve všech operacích, které byly následně porovnány s výsledky numerické simulace. Podle nejvyšší vypočtené síly byl zvolen vhodný stroj z aktuálního strojového parku firmy, konkrétně konvenční jednooperační hydraulický lis SMG HZPU 320 o jmenovité síle 320 tun. Následně byly navrženy nástrojové sestavy pro každou z tvářecích operací, kdy bylo zjištěno, že ve všech operacích musí být průtláčnice zapouzdřena pomocí dvou objímek. Ke zjištění optimálních stykových průměrů, kontaktních tlaků a dalších parametrů pouzdření byl využit program LP4-Kopřiva.

Klíčová slova

hřídel hydraulického čerpadla, ocel DIN 20CrMo5, objemové tváření za studena, Simufact Forming, hydraulický lis

ABSTRACT

The thesis deals with the design of the production technology of the drive shaft of a hydraulic pump, the main element of which is the groove inside the shaft cavity. This component will be manufactured by Metaldyne Oslavany, spol. s.r.o., where the production series was set at 300,000 pieces per year. The material of the component was also specified as DIN 20CrMo5 steel, which will be purchased for production in bars with a diameter of 42 mm. The workpiece will then be cut from them using circular saws. After evaluating the specified requirements, based on the analysis of the specifications, the cold forming technology is chosen for production, specifically the combination of extrusion and upsetting, which the thesis focus on. Three basic production processes were put in place, for which their manufacturability was verified using the Simufact Forming 2023.4 simulation software. For the most suitable production variant, the flow stress, deformation resistance, and forming forces are calculated for each operation, which were then compared with the results of numerical simulation. According to the highest calculated force, a suitable machine was chosen from the company's current machine park, specifically a conventional single-operation hydraulic press SMG HZPU 320 with a nominal force of 320 tons. Then, tool sets were designed for each of the forming operations, when it was found that in all operations the die must be encapsulated using two clamps. The LP4-Kopřiva program was used to determine the optimal contact diameters, contact pressures and other encapsulation parameters.

Keywords

hydraulic pump shaft, steel DIN 20CrMo5, cold forging, Simufact Forming, hydraulic press

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NEČAS, Zbyněk. *Návrh výroby hřídele hydraulického čerpadla* [online]. Brno, 2024. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157638>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Michaela Císařová.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Návrh výroby hřídele hydraulického čerpadla vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

Brno, 15. 5. 2024

Zbyněk Nečas

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Michaele Císařové, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytla při vypracování diplomové práce. Děkuji také panu Ing. Janu Říháčkovi, Ph.D. za odborné konzultace a pomoc v oblasti numerických simulací. V neposlední řadě chci poděkovat i rodině a přítelkyni za nesmírnou podporu, trpělivost, obětavost a motivaci během celé doby studia.

OBSAH

Zadání práce

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ.....	10
1.1 Variantní řešení výroby	11
2 TECHNOLOGIE OBJEMOVÉHO TVÁŘENÍ ZA STUDENA	14
2.1 Pěchování	15
2.2 Protlačování.....	16
2.3 Tepelné zpracování tvářených materiálů.....	18
2.4 Nástroje pro objemové tváření zastudena.....	19
2.5 Stroje pro objemové tváření za studena.....	23
2.6 Technologicko-konstrukční směrnice a základní výpočty	25
2.6.1 Deformace a rychlost přetvoření	27
2.6.2 Tvářecí odpory.....	29
2.6.3 Tvářecí síla a práce	31
2.7 Tření, maziva a příprava polotovaru	31
2.8 Numerické simulace ve tváření	33
3 NÁVRH VÝROBY SOUČÁSTI	35
3.1 Výpočet objemu a hmotnosti součásti.....	36
3.2 Výroba součásti	38
3.2.1 Varianta výroby A	39
3.2.2 Varianta výroby B	40
3.2.3 Varianta výroby C	41
3.3 Výpočet rozměrů součásti v jednotlivých operacích.....	43
3.4 Výpočet přetvoření a rychlosti deformace	45
3.5 Odpory, síly a práce.....	47
3.6 Volba stroje	52
3.7 Návrh nástrojů	53
3.7.1 Sestavy nástrojů.....	58
ZÁVĚR.....	60

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam příloh

Seznam výkresů

ÚVOD

S rozvojem společnosti současně dochází k vývoji průmyslu, kde je v poslední době vyvíjen tlak na rychlost výroby, a především co nejnižší výrobní náklady. S tímto trendem se potýká také strojírenský průmysl, kde dochází ke zefektivnění a inovacím řady výrobních technologií. Jednou z těch nejstarších je také tváření, které je možné rozdělit na plošné a objemové, kde je materiál deformován v celém svém objemu a tváření zde probíhá převážně za trojosého stavu napjatosti a deformace. Celkově zahrnuje více výrobních technologií jako je například válcování, kování, ražení, protlačování, pěchování nebo kalibrování. Podle teploty, za které výroba probíhá, je možné objemové tváření rozdělit na tváření za tepla a za studena. [1; 2]

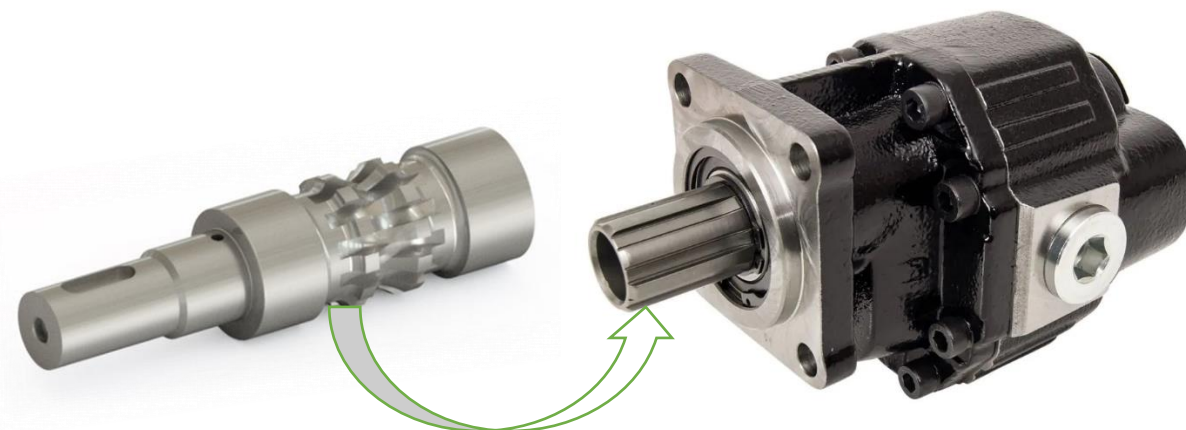
Objemové tváření za studena je obecně kombinací technologií protlačování a pěchování, kdy dochází ke změně tvaru polotovaru ve formě špalíku nebo kaloty, pomocí tlaku vyvolaného nástrojem. Jedná se o jednu z nejefektivnějších výrobních metod, jelikož zde nedochází k úběru materiálu, pouze ke změně jeho tvaru. Dalšími výhodami mohou být vysoká produktivita, nízké výrobní náklady nebo vysoká přesnost zhotovených součástí. Nepopíratelnou výhodou je také zvýšení pevnostních vlastností součástí díky zpevňování materiálu v průběhu výroby. Na obrázku 1 jsou zobrazeny různé typy dílců vyráběných pomocí technologie objemového tváření za studena. [2; 3]



Obr. 1 Příklady součástí zhotovených objemovým tvářením za studena [4; 5].

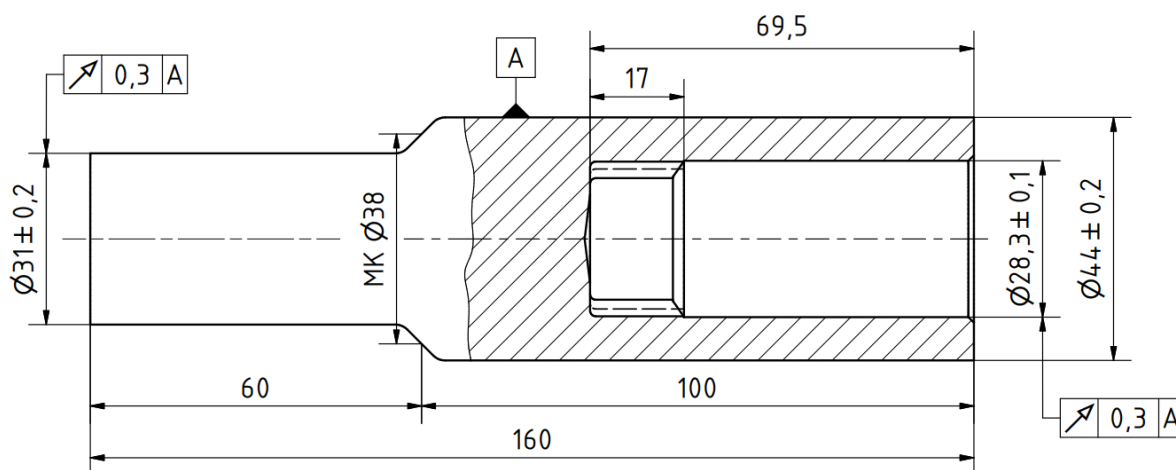
1 ROZBOR ZADÁNÍ

Řešeným dílem je polotovar hřídele, která po následném obrobení funguje jako unašecí hřídel hydraulického zubového čerpadla, viz obrázek 2. Hydraulická čerpadla jsou základem každé hydraulické sestavy a jsou odpovědné za jejich napájení provozní kapalinou se stanoveným tlakem, výkonem a množstvím. Čerpadlo je pak napájeno mechanickou energií dodanou např. ze spalovacího nebo elektrického motoru, která je přes hřídel přenášena na ozubená kola. Zubová čerpadla jsou obecně kompaktní a levná a své využití nacházejí jako součásti různých strojních zařízení především v zemědělském a stavebním průmyslu. [6; 7]



Obr. 2 Unašecí hřídel hydraulického čerpadla [8].

Na hřídele hydraulických čerpadel jsou obecně kladeny různé nároky, jak na jejich mechanické vlastnosti, tak na přesnost nebo povrchovou úpravu. V tomto případě nebyl zadán požadavek na jakoukoli konečnou povrchovou úpravu, z důvodu dalšího obrábění součástí zákazníkem. Rozdíl tlaků na vstupu a výstupu způsobuje boční zatížení na hřídele. Proto je nutné, aby byly hřídele dostatečně dimenzovány na dané zatížení. Tyto požadavky na mechanické vlastnosti součásti byly vyřešeny při zvolení materiálu polotovaru dle požadavků zákazníka. Firmou byl taktéž vydán výkres dílu po objemovém tváření (resp. i po následném obrábění), jehož zjednodušenou verzi je možné vidět na obrázku 3. [7; 9; 10]



Obr. 3 Zjednodušený výkres zadané součásti.

Zadaná součást bude vyráběna firmou Metaldyne Oslavany, spol. s.r.o., která je od roku 2017 součástí nadnárodní korporace American Axle & Manufacturing (AAM) se sídlem v Detroitu. Firma Metaldyne působí v České republice již od roku 1993 a zabývá se výrobou strojních součástí převážně technologií objemového tváření za studena, za tepla a poloohřevu, převážně pro automobilový průmysl, ale také další odvětví strojírenství. [5; 11]

Důležitým faktorem pro výrobu zadaného dílu je také zvolený materiál, který dále ovlivní i možné technologie výroby součástí. Musí taktéž splňovat podmínky pro součásti hydraulických čerpadel, a to především na pevnost a odolnost proti opotřebení. Pro splnění těchto podmínek byl podle požadavků zákazníka zvolen materiál DIN 20CrMo5, jehož ekvivalentem může být ČSN 15 124. Ocel je dostupná ve formě kruhových tyčí o průměru 5,5 až 500 mm. Chemické složení materiálu je popsáno níže v tabulce 1. Tato legovaná ocel je svařitelná běžnými metodami a dobře tvárná i obrobitelná. Využívá se mimo jiné pro strojní součásti s cementovaným povrchem, ozubená kola nebo drážkové hřídele. Mechanické vlastnosti daného materiálu jsou zaznamenány v tabulce 2. Materiálový list zvolené oceli je uveden v příloze č. 1. [9; 12; 13; 14]

Tab. 1 Chemické složení oceli DIN 20CrMo5 [13].

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Mo [%]
0,18 - 0,23	0,15 - 0,35	0,90 - 1,20	max 0,035	max 0,035	1,10 - 1,40	0,20 - 0,30

Tab. 2 Mechanické vlastnosti oceli DIN 20CrMo5 [13].

Mez pevnosti R_m [MPa]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Tažnost A [%]	Kontrakce Z [%]
780 – 1080	540	min. 10	min. 35

1.1 Variantní řešení výroby

Zadanou součástí je polotovár hřídele, který bude dále zpracováván, je tedy možné k jeho výrobě použít řadu různých výrobních technologií. Při návrhu výroby zadaného dílce je nutné brát v úvahu vnitřní drážkování hřídele, jelikož výroba tohoto prvku by pomocí některých výrobních technologií nebyla možná. Návrhy se proto zaměří především na zhotovení vnějšího tvaru součásti. Při volbě metody se musí vzít v potaz také vlastnosti zvoleného materiálu, požadavky na jakost povrchu, rozměrové přesnosti výrobku a v neposlední řadě i velikost zadané výrobní série, která byla stanovena na 300 000 kusů ročně. Nejvhodnějšími metodami pro výrobu dané součásti jsou:

- Odlévání – dochází ke zhotovování výrobků litím roztaveného kovu do forem (obr. 4). Nevýhodou je velké množství nečistot a vad vzniklých po odlití, omezená zabíhavost kovu a hrubozrnná struktura výsledného produktu. Jelikož se zde nedosahuje příliš vysokých přesností a jakosti povrchu, bylo by nutné pro dokončení zadané součásti využít další výrobní technologie, což vede k prodlužování výrobních časů a zvyšování nákladů výroby. Zadaná ocel 20CrMo5 není vhodná k odlévání, proto není možné jej využít k výrobě součásti. [15; 16]



Obr. 4 Technologie odlévání [17].

- Soustružení – je technologie, kdy dojde ke změně tvaru polotovaru pomocí řezného nástroje (obr. 5), kterým postupně dochází k oddělování částic materiálu ve formě třísek. Díky své přesnosti a vysoké jakosti obrobených ploch se využívá především pro výrobu nebo dokončování hotových součástí, případně na výrobu nástrojů pro jiné výrobní technologie. Soustružené dílce dosahují vysokých rozměrových přesností kolem 0,01 mm, což je více než dostatečné pro tolerované rozměry průměrů i zadané geometrické tolerance házení 0,3 mm. Při výrobě by však docházelo k relativně velkému úběru materiálu, což by zapříčinilo zvyšování výrobních nákladů. Je také vhodné zejména pro menší série maximálně do 100 000 kusů, což nevyhovuje zadané výrobní sérii stanovené na 300 000 kusů. [18; 19; 20]



Obr. 5 Třískové obrábění [21].

- Příčné klínové válcování – změna tvaru součásti zde probíhá pomocí silového působení tvarových klínů na polotovar, který se otáčí mezi dvěma rotujícími válci (obr. 6). Klíny pak postupně přemísťují materiál ve směru podélné osy polotovaru, přičemž dochází k prodlužování a tvorbě profilu vývalku. Příčné klínové válcování se využívá především pro zhotovování přesných vývalků podlouhlých tvarů, které následně mohou sloužit jako předkovky pro zápustkové kování nebo třískové obrábění. Rozměrová přesnost produkovaných dílů se pohybuje od 0,01 mm po 0,5 mm. Jsou tedy dostatečně přesné vzhledem k zadaným rozměrovým a geometrickým přesnostem součástí. Firma však nedisponuje potřebným strojem a jeho nákup pouze pro tuto součást by nebyl ekonomicky výhodný. [2; 22; 23]



Obr. 6 Příčné klínové válcování [24].

- Kování – zejména je možné využít zápustkového kování (obr. 7), kdy je materiál přetvářen do požadovaného tvaru v dutině zápustky za kovacích teplot. V důsledku vysokých kovacích teplot má materiál nižší deformační odpor a je tedy možné využít nižší tvářecí síly. Nevýhodou je, že výsledná součást musí být opatřena technologickými přídávky a přídávky na obrábění, což zvyšuje výsledné náklady na materiál. Z důvodu nižší rozměrové a geometrické přesnosti by bylo nutné následně využít třískového obrábění k dokončení dané součásti, především vnitřního drážkování hřídele. Další nevýhodou je velká spotřeba energie na ohřev polotovaru. [16; 18; 25]



Obr. 7 Zápustkové kování [25].

- Objemové tváření za studena – změna tvaru polotovaru zde probíhá pomocí silového působení nástroje na materiál (obr. 8). Hlavními výhodami jsou minimální odpady při výrobě, nízká spotřeba materiálu, dále nízké výrobní časy a s tím spojená vysoká produktivita práce. Díky tomu jsou u této technologie nízké výrobní náklady a dosahuje se také vysoké přesnosti výrobků. Všechny zadané tolerance rozměrů, včetně tolerance házení 0,3 mm, jsou vyrobitelné. Výhodou je také vytvoření vnitřního drážkování, což zkracuje časovou náročnost produkce zadaného dílce. Jelikož tváření probíhá za studena, dochází v materiálu ke zpevňování v závislosti na velikosti deformace v daném místě výlisku. [3; 16; 26]



Obr. 8 Objemové tváření za studena [27].

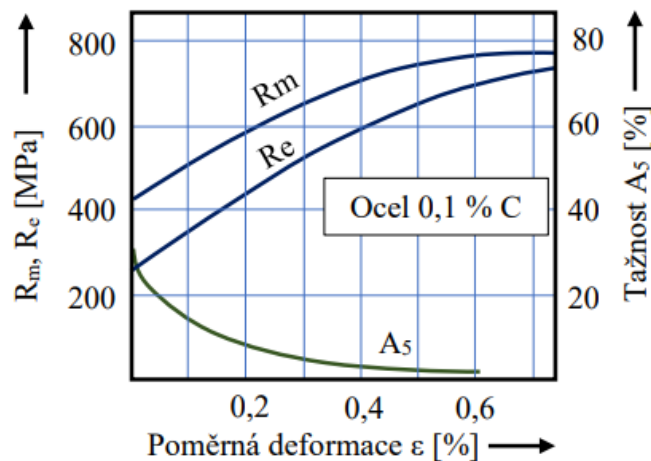
Při posouzení jednotlivých výrobních metod se jeví jako nejvýhodnější použít variantu výroby pomocí objemového tváření za studena. Při zhotovení touto metodou bude zajištěna dobrá kvalita povrchu, vysoká přesnost a také vysoká produktivita výroby. Na zvolenou metodu se zaměří teoretická i praktická část práce.

2 TECHNOLOGIE OBJEMOVÉHO TVÁŘENÍ ZA STUDENA

Metoda objemového tváření se stala jednou ze základních technologických procesů při výrobě součástí v různých oblastech průmyslu a uplatňuje se zejména při sériové a hromadné produkci. Vysoká produktivita a hospodárnost výroby spolu se snahou technologů a konstruktérů nahradit obrábění tvářením zaručuje široké uplatnění objemového tváření za studena. [26]

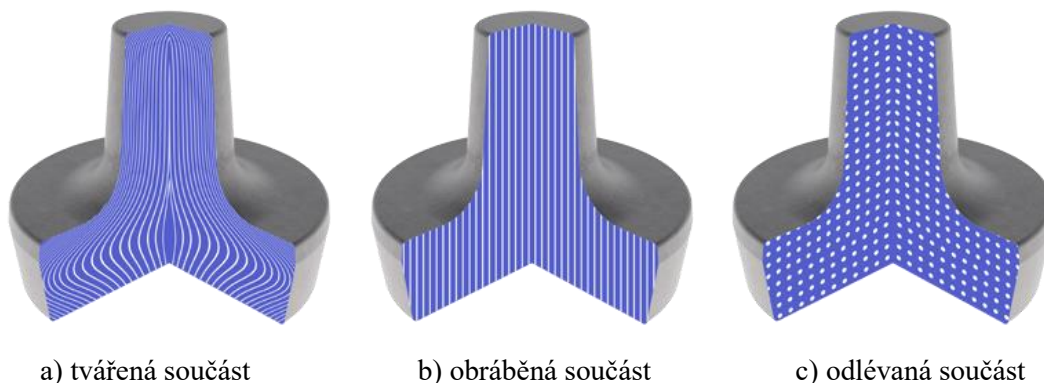
Tvářením za studena se z polotovarů (špalík, kalota...) vyrábí převážně součásti rotačně symetrických tvarů, jako jsou hřídele, náboje nebo šrouby. Při této technologii je materiál tvářen v průtlačnici tlakem průtlačníku za současné změny průřezu výchozího polotovaru. [28]

V porovnání s jinými výrobními metodami probíhá objemové tváření pod rekrystalizační teplotou za působení prostorové napjatosti, která vytváří podmínky pro velké trvalé deformace bez porušení soudržnosti materiálu. Tím jsou dány předpoklady pro maximální využití objemu výchozího polotovaru a zvýšení mechanických vlastností výchozího materiálu. Při objemovém tváření za studena se zvětšuje odpor proti deformaci se vzrůstající deformací polotovaru. Tím dochází ke zpevnění materiálu a přetvářený materiál získává vyšší mez kluzu a mez pevnosti (obr. 9). Z tohoto důvodu lze, pro dané použití součásti, zvolit méně hodnotného výchozího materiálu, tedy materiálu o horších mechanických vlastnostech. [26; 28]



Obr. 9 Změny mechanických vlastností materiálu při tváření [18].

Významné jsou metalurgické vlastnosti tvářených výrobků, jako je nepřerušovaný průběh vláken (obr. 10), zvýšení meze únavy výlisku následkem zpevnění vyvolaného objemovým tvářením za studena. Současné také vznik příznivého systému vnitřních napětí a převládajících tlakových napětí. Další výhodou objemového tváření oproti obrábění bylo umožnění podstatného zkrácení výrobních časů a zkvalitnění výroby díky použití víceoperačního objemového tváření za studena na speciálních tvářecích automatech. [18]



Obr. 10 Schématické zobrazení průběhu vláken [29].

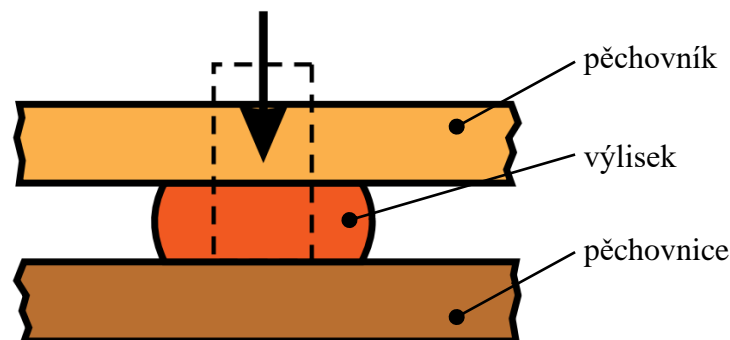
Díky relativně vysokému stupni geometrické přesnosti, kvalitě povrchu a vynikajícím mechanickým vlastnostem, jsou celkové vlastnosti výrobků tvářených za studena velmi dobré. Obecně závisí na fyzikálních faktorech a lze je ovlivnit pouze v omezené míře. Faktory ovlivňující výrobní přesnost produkce je třeba zohlednit při výrobě součástí s přesnou geometrií a danými povrchovými vlastnostmi. V zásadě je primárním požadavkem vysoce přesný a relativně tuhý lis, kterým je možné dosáhnout potřebných tvářecích sil. Dále také přesná konstrukce nástrojů, správné použití maziva, či perfektně připravený polotovár. [30]

Při objemovém tváření se podstatně mění tvar polotovaru, z pravidla kombinací základních způsobů tváření, tedy pěchování a protlačování. Oproti jiným metodám tváření za studena (ohýbání, tažení...) probíhá za působení prostorové napjatosti, která vytváří podmínky pro velké plastické deformace, aniž by se porušila soudržnost tvářeného materiálu. Podle směru a způsobu přemísťování materiálu ve tvářecím nástroji lze objemové tváření kovů za studena dělit na několik hlavních způsobů, které jsou dále podrobněji popsány. [26]

2.1 Pěchování

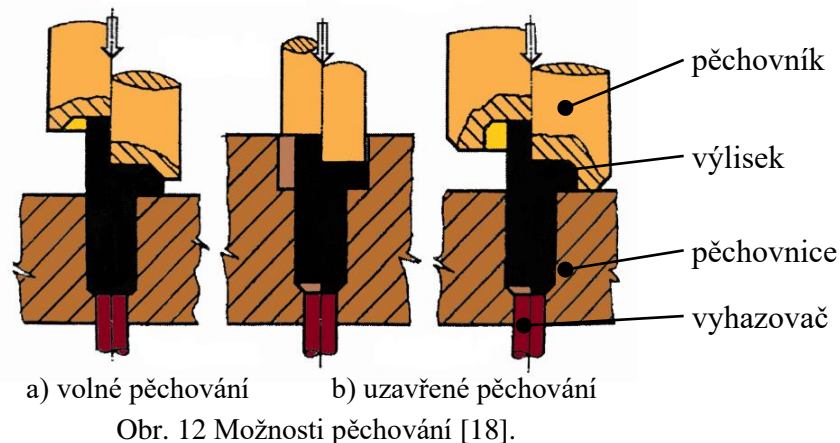
Pěchování je základní operací objemového tváření, při které dochází ke stlačování výchozího polotovaru mezi rovnoběžnými rovinami a dochází tak ke zmenšení výšky polotovaru a zvětšování příčného průřezu součásti. Deformace v celém objemu je v důsledku tření mezi polotovarem a pěchovacím nástrojem nerovnoměrná, vzniká tak typický soudkovitý tvar spěchovaného polotovaru (obr. 11). K zabránění vzniku trhlin v oblasti největšího průměru je polotovár mazán a funkční plochy nástrojů jsou leštěny. Nejčastěji se využívá při výrobě normalizovaných spojovacích součástí, např. šroubů, nýtů apod. Při výrobě složitějších strojních součástí objemovým tvářením se s pěchováním lze setkat při [18; 26; 31]:

- kalibraci výchozího špalíku za účelem zarovnání čel zdeformovaných při stříhu,
- přípravné tvářecí operaci, při které se přizpůsobí tvar i rozměr výchozího polotovaru pro další tvářecí operace,
- víceoperačním tváření jako v samostatné nebo sloučené (kombinované) tvářecí operaci.



Obr. 11 Operace pěchování [30].

Pěchování je možné podle tvaru nástrojů rozdělit na otevřené (obr. 12a) a uzavřené (obr. 12b). Využití pro pěchování je možné nalézt také v oblasti experimentů a měření, např. pěchovací zkoušky se využívá při zjišťování materiálových vlastností. Z pěchovacích zkoušek lze také zjistit například deformační odpor materiálu nebo zhodnotit tření mezi nástrojem a polotovarem. [18; 30; 31]

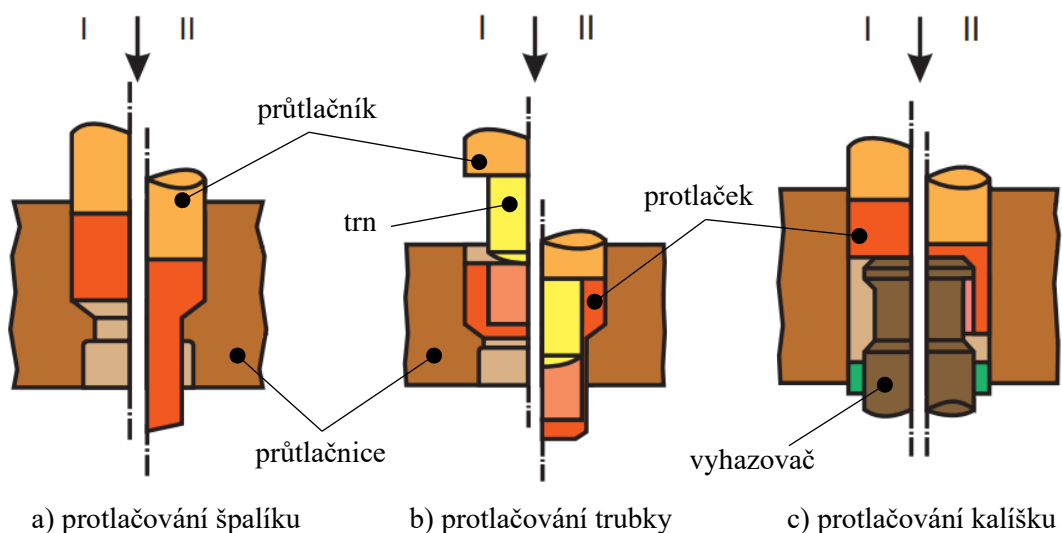


Obr. 12 Možnosti pēchování [18].

2.2 Protlačování

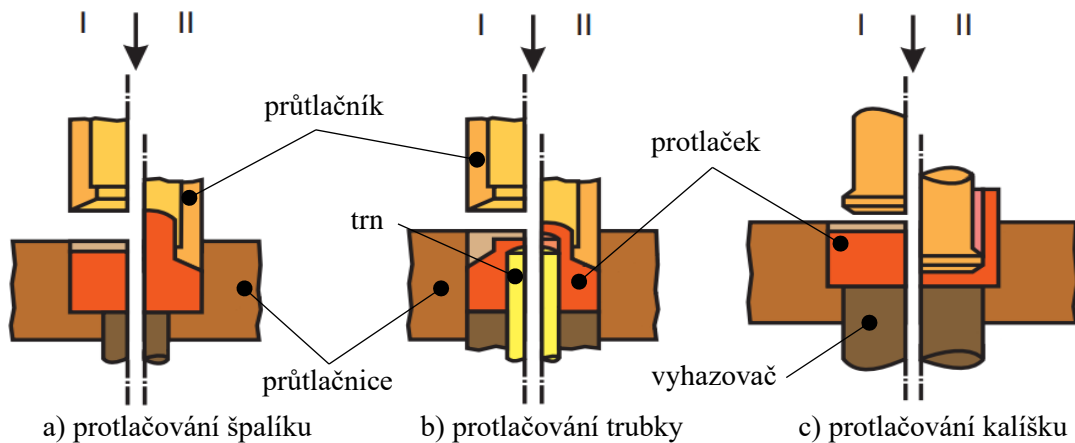
Protlačování je jednou z hlavních technologií objemového tváření za studena, kterou lze vyrábět jak součásti symetrické, jako nádoby, trubky nebo náboje, tak nesymetrická tělesa. Při protlačování se vkládá polotovar za pokojové teploty do otevřené průtláčnice a tlakem průtláčnicku je materiál tlacen cestou nejmenšího odporu, čímž vzniká dutá nádoba, trubka nebo hřídel. V průmyslové praxi se při výrobě dílců používá kombinace i několika druhů protlačování a často i pēchování. Podle kombinace směru toku materiálu a směru pohybu průtláčnicku je možné protlačování rozdělit na několik způsobů [18; 28; 32]:

- dopředné protlačování, při kterém kov teče ve směru pohybu průtláčnicku a vytéká z průtláčnice ve tvaru tyčí či dutých profilů (obr. 13). Konečný tvar profilu tedy udává geometrie průtláčnice. Polotovarem může být jak plný špalík, tak dutý (kalíšek, děrovaný rondel, prsteneček...) materiál. Tato metoda se využívá především pro dutá nebo plná tělesa většinou kruhového průřezu. Lze však zhotovit i součásti jiných pravidelných průřezů. [18; 26; 32]



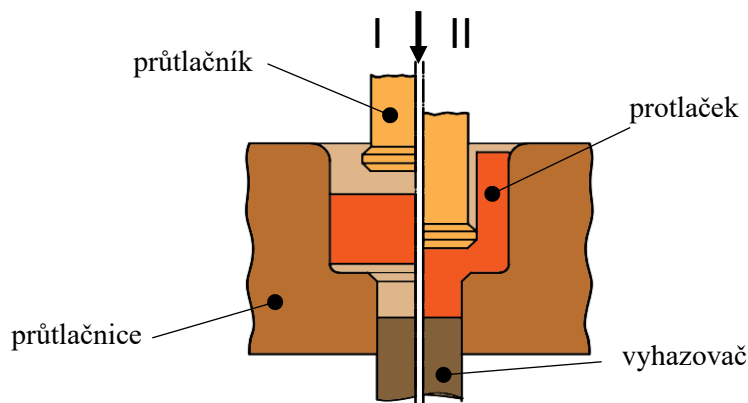
Obr. 13 Dopředné protlačování [30].

- zpětné protlačování, také označované jako protisměrné, je metoda, kdy je polotovar vložen do průtláčnice a tlakem průtláčnicku je materiál přemísťován proti směru jeho pohybu (obr. 14). Tímto způsobem se vyrábí většinou součásti typu kalíšek. Polotovarem bývá špalík nebo tlustostěnný prsteneček. Tímto tvářecím postupem lze vyrábět buď hotové výrobky nebo polotovary pro další tvářecí operace. [18; 26; 33]



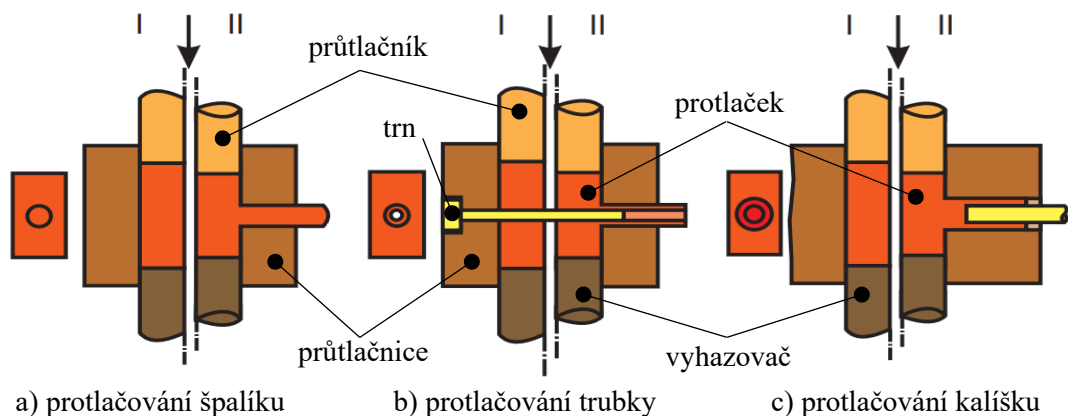
Obr. 14 Zpětné protlačování [30].

- kombinované protlačování, nazýváno také jako sdružené, jelikož sdružuje obě předešlé metody v jedné operaci. Materiál teče ve směru i proti směru pohybu průtlačníku, viz obr. 15. Výchozím polotovarem může být děrovaný rondel, prstenek nebo špalík. Této výrobní metody je vhodné využívat u méně složitých součástí, kde se kombinuje kalíškování a protlačování plné části, nebo kde potřebná hloubka dutiny v jedné části je menší než v druhé. [26; 28]



Obr. 15 Kombinované protlačování [26].

- stranové protlačování, které se od předešlých způsobů protlačování liší směrem hlavního toku materiálu. Hlavní deformace je ve směru kolmém k podélné ose polotovaru, tedy radiálním směru, viz obr. 16. Tohoto druhu protlačování je možno využít např. ke změně průřezu určité části výlisku, nebo při tváření výstupků různého pravidelného nebo nepravidelného průřezu. [26]

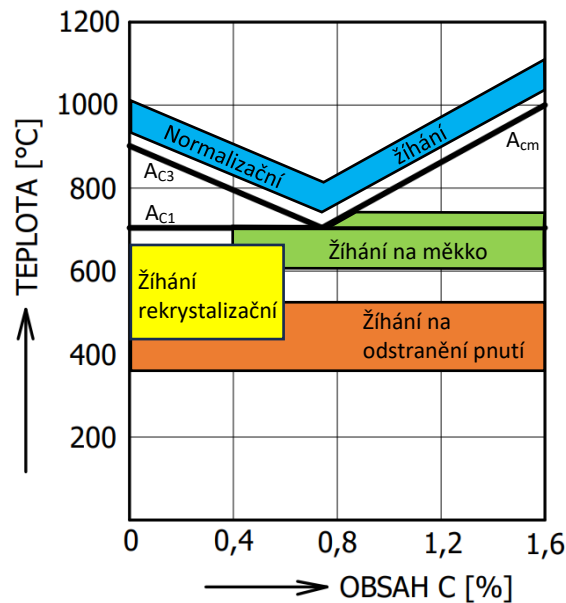


Obr. 16 Stranové protlačování [30].

2.3 Tepelné zpracování tvářených materiálů

Při tváření za studena často dochází ke vzniku velkých plastických deformací a materiál je strukturně nestálý, stav zrn je nestabilní. Proto je ve velkém množství případů nutné použití tepelného zpracování materiálu po tváření součásti nebo i mezi jednotlivými operacemi. Tím se rozumí ohřev materiálu na určitou teplotu a ochlazování předem stanovenou rychlostí. Při ohřevu a ochlazování za různých podmínek dochází v oceli k přeměnám v tuhém stavu, čímž se ovlivňuje struktura i mechanické vlastnosti zpracovávané oceli. Pro objemové tváření je obvyklé využití tepelného zpracování pro výchozí materiál, z něhož je vyroben polotovár a pro polotovár mezi tvářecími operacemi, v ojedinělých případech se tepelné zpracování používá i pro hotové součásti, aby byly splněny podmínky (materiálové vlastnosti) požadované zákazníkem. Pro objemově tvářené součásti zastudena tedy rozlišujeme tyto možnosti tepelného zpracování [28; 34]:

- Normalizační žíhání – spočívá v ohřevu materiálu nad horní teplotu přeměny A_{C3} a následném vychladnutí na vzduchu o pokojové teplotě. Účelem normalizačního žíhání je odstranění hrubé a nestejnorodé struktury vzniklé buď při lití, tváření za tepla při příliš vysokých teplotách, nebo žíhání při vysoké teplotě. Normalizačním žíháním lze odstranit všechny účinky tváření za studena, ať už jde o deformaci zrna a zpevnění mechanickým zpracováním za studena, nebo o nebezpečí stárnutí, jež úzce souvisí právě s tvářením zastudena, neboť jde o mimořádně hrubou rekrystalizaci. Rovněž je možné odstranit nežádoucí tvorbu vláken a často lze také dosáhnout zlepšení příčné vrubové houževnatosti. [28; 34]
- Žíhání na měkko – je tepelným zpracováním, které se vyznačuje ohřátím materiálu a delším udržováním na teplotě blízko pod A_{C1} nebo při kolísající teplotě kolem A_{C1} a následující pomalé ochlazování, aby bylo dosaženo co největší měkkości polotovaru. Dosáhne se zrnitého perlitu, a tím největší měkkości, houževnatosti a opracovatelnosti oceli daného chemického složení. U ocelí k protlačování s obsahem uhlíku nad 0,2 % a pro legované oceli, které mají dostatek cementitu, má toto žíhání velký význam. Pro tyto materiály se doporučuje polotovár vždy žíhat na měkko a podle potřeby i žíhat mezi jednotlivými tvářecími operacemi. Doporučuje se však používat před žíháním na měkko také žíhání normalizační. [28; 34]
- Rekrystalizační žíhání – je nejpoužívanější metodou tepelného zpracování při protlačování za studena. Používá se pro výchozí polotovár i pro žíhání mezi jednotlivými operacemi. Podle zvolené teploty mohou nastat dva děje, zotavení (tj. zánik mřížkových deformací a napětí) a rekrystalizace, tedy vznik zárodků a růst nových zrn). Zotavení a rekrystalizace je závislá na teplotě a na předchozím stupni tváření. Rekrystalizace může nastat jen při dosažení teploty rekrystalizace, která je empiricky stanovena na 35 až 40 % teploty tání daného kovu. Během rekrystalizace se netvoří struktura nové fáze, pouze nová struktura stejné fáze, místo tvářením zdeformované původní struktury. Zotavením dochází k uspořádání dislokací a ke snižování deformační energie, mez pevnosti a mez kluzu klesá a tažnost se zvyšuje (prakticky klesá vnitřní napětí). Rychlost zotavení je závislá na teplotě a na čase. Během rekrystalizace vznikají zárodky nových krystalů (primární rekrystalizace), které rostou na úkor původních deformovaných zrn a zpevnění zaniká (sekundární rekrystalizace). [28; 34]
- Žíhání k odstranění vnitřních napětí – provádí se při teplotě pod eutektoidní přeměnou A_{C1} , nejčastěji pod teplotou 550 °C, viz obr. 17. Po ohřevu na uvedenou teplotu následuje pomalé ochlazování. Tohoto žíhání se využívá tam, kde vzniká ve vyráběné součásti vnitřní napětí a má toto napětí odstranit. Dále se používá k odstranění napětí vzniklých při protlačování ocelí za studena nebo za tepla. [28; 34]



Obr. 17 Pásma teplot tepelných zpracování [35].

2.4 Nástroje pro objemové tváření zastudena

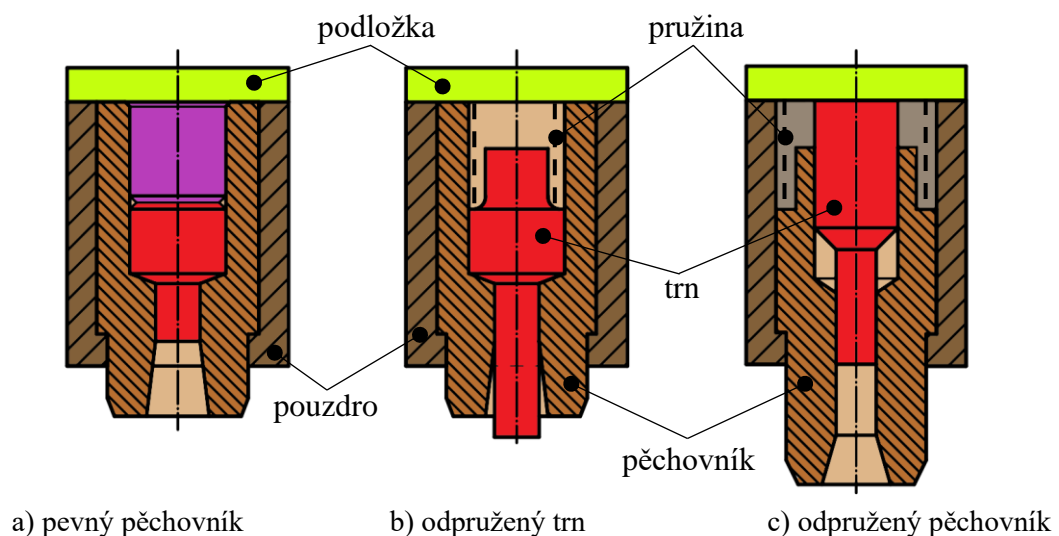
Jedním z nejdůležitějších činitelů při praktickém využívání technologie objemového tváření je stálost, bezporuchovost, jednoduchost a pořizovací i udržovací cena tvářecích nástrojů. Tyto vlastnosti tvářecích nástrojů jsou do jisté míry ovlivňovány druhem zpracovávaného materiálu, jeho povrchovou úpravou, mazáním, velikostí dosažené deformace, volbou tvářecího procesu a dalšími technologickými parametry. Neméně důležitým činitelem je také požadovaná přesnost rozměrů konečného vylisku. [26]

Při konstrukci tvářecích nástrojů je nutno přihlížet k velkému zatížení a namáhání, která jsou na něj kladena. Deformační odpor materiálu při objemovém tváření může být tak vysoký, že pokud se neučiní potřebná opatření, nástroje se mohou deformovat nebo i prasknout. Všeobecně by se měly při konstrukci tvářecích nástrojů dodržovat tyto hlavní zásady [26]:

- zajistit dostatečnou tuhost tvářecího nástroje, tedy zamezit jakémukoli pružení funkčních částí, které by vedlo k nedodržení požadovaných přesností vylisku,
- zaručit požadovanou souosost všech dutin s povrchem nebo odstupňovanými částmi vylisku. Je také nutné zajistit přesné vedení funkčních částí nástroje,
- opatřit tvářecí nástroje spolehlivým zařízením pro vyhazování vylisků z průtlačnice (vyhazovačem) i jeho stírání z průtlačníku, aby se zabránilo poruchám funkčních částí, vzniklých neodstraněním vylisku z funkčního prostoru nástroje,
- umožnit jednoduchou a snadnou montáž i rychlou výměnu funkčních částí nástroje. Pokud je to možné, volit sestavování nástrojů mimo pracovní prostor lisu a po vložení sestavené dílčí části nástroje zajistit její rychlé a bezpečné upnutí do upínací dutiny,
- pro zvýšení hospodárné životnosti funkčních částí nástrojů se doporučuje volit optimální stupeň deformace v jednotlivých tvářecích operacích. Pokud někde stupeň deformace překračuje přípustnou hranici, je lepší volit větší počet tvářecích operací,
- chlazení a mazání funkčních částí nástroje je nezbytné u všech tvářecích nástrojů, u kterých je použito mechanického vkládání výchozího polotovaru. Při tváření se materiál rychle zahřívá a přenáší vzniklé teplo na funkční části nástrojů, které je proto nutné řádně chladit.

Rozhodujícím podkladem pro návrh tvářecího nástroje je technologický postup výroby, skládající se ze základních tvářecích operací nebo jejich kombinací. Konstrukční řešení tvářecích nástrojů bude rozdílné pro použití v jednooperačním kovací stroji, lisu, tvářecím automatu nebo víceoperačním stroji. [18] Nástroje pro objemové tváření za studena je možné rozdělit podle metody tváření takto:

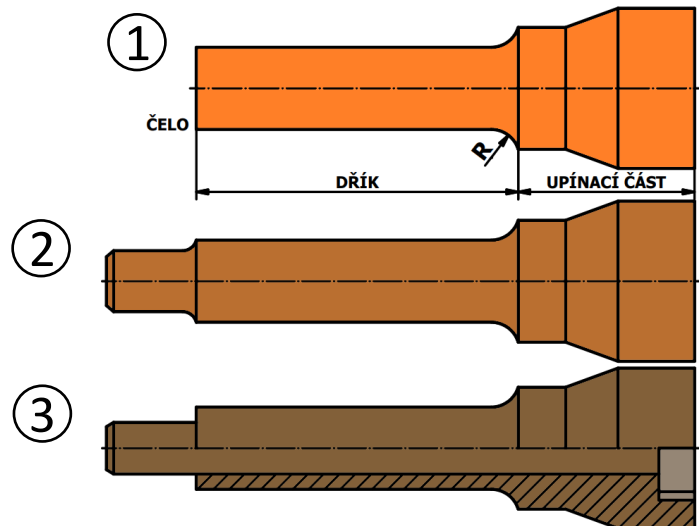
- Pěchovníky – slouží k napěchování požadovaného tvaru nebo k předpěchování polotovaru do daných rozměrů pro další tvářecí operace. Tvar dutiny pěchovníku odpovídá tvaru hlavy součásti, např. hlavy šroubu. Aby nebylo nutné kvůli opotřebení měnit celý nástroj, bývají tyto nástroje často vložkované, kdy pěchovací vložka je vyrobena buď z kvalitní nástrojové oceli nebo ze slinutého karbidu a je zapouzdřena s přesahem do objímky. Pro obě tyto varianty se používají lehce odlišné geometrie, kdy ocelové vložky bývají ve tvaru kužele ($1 \div 3^\circ$) a vložky ze slinutých karbidů ve tvaru válce. Pro zarovnání čel ostřížených polotovarů v průtlačnici se používají průtlačníky s rovným čelem, pokud je nutné středění polotovaru využije se pěchovníku se zahlobením. Využití odpružených kolíků se objevuje při výrobě na postupových strojích, a to jak při zavádění polotovaru, tak i pro stírání výlisku z pěchovníku. Nejčastější provedení pevného pěchovníku je ze tří snadno vyrobitelných a vyměnitelných částí, kterými jsou podložka, trn a pěchovník, který může být uložen v pouzdru. Pevný pěchovník s odpruženým trnem je používán pro výrobu krátkých součástí. Odpružený trn usnadňuje zavedení ústřížku do pěchovnice a ulehčuje správný odchod přenášecích elementů. Odpružený pěchovník se využívá k pěchování dlouhých dřívků a umožňuje předpěchování z výchozího rozměru pro pěchovací poměr $L_0/D_0 > 2,3$. Varianty konstrukčního provedení pěchovníků jsou zobrazeny na obr. 18, doporučený tvar dutiny pěchovníku pak v příloze č. 2. [18; 28]



Obr. 18 Konstrukční varianty pěchovníků [18].

- Nástroje pro dopředné protlačování – nejdůležitějším geometrickým parametrem průtlačnice pro dopředné protlačování je tvar redukční části. Nejčastěji používaným typem je redukční kužel, který je nejjednodušší na výrobu. Tvar redukčního kužele výrazně ovlivňuje velikost výsledného deformačního odporu. Nejvhodnější úhly redukční části průtlačnice α jsou mezi 25° a 35° . Při těchto úhlech se dosahuje nejnižšího tření a tvářecí síla a přetvárná práce jsou minimální. Funkční plochy průtlačnice i průtlačníku jsou broušeny, z důvodu dosažení co nejnižšího tření mezi materiálem a nástrojem. Povrchová úprava tvářecích nástrojů vyžaduje zvláštní péči při broušení po zušlechtnění a stejně tak při lapování a leštění. [18]

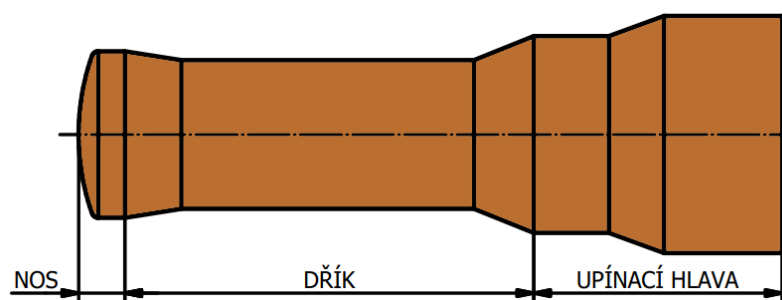
Průtlačníky pro dopředné protlačování mívají obvykle tvar dle obr. 18. Pro protlačování plných součástí jsou z pravidla z jednoho kusu s upínací částí. Pro upnutí se používá nejčastěji osazení pomocí kuželové nebo válcové hlavy. Přejít mezi dříkem a upínací částí musí být pozvolný, aby se zabránilo místní koncentraci napětí. Tvar průtlačníku pro dopředné protlačování dutých součástí je znázorněn na obr. 19 označen čísly 2 a 3. Doporučený tvar a rozměry nástrojů pro dopředné protlačování jsou přesněji popsány v příloze č. 3. [18]



Obr. 19 Tvary průtlačníků a jejich části [18].

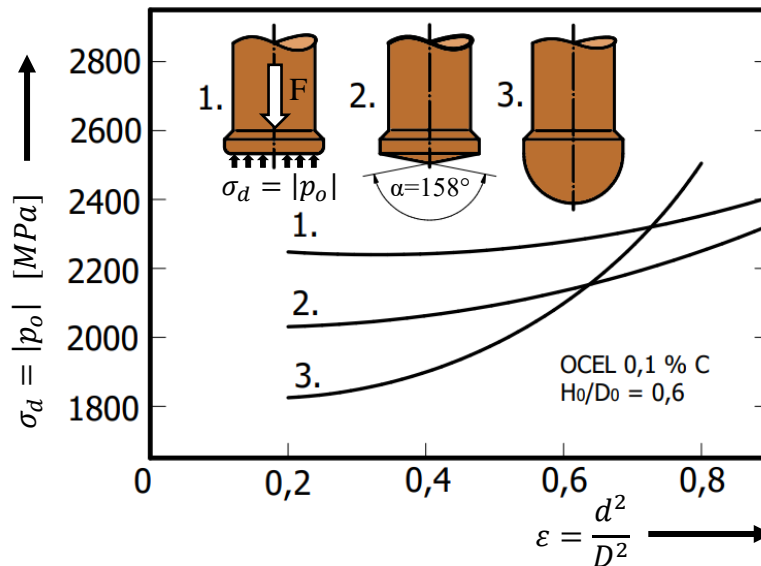
Průtlačnice pro dopředné protlačování se obvykle využívají buď celistvé, příčně dělené nebo vložkované. Příčným dělením průtlačnice v oblasti přechodu válcové části do kuželové lze snížit vrubový účinek. Pro zabránění zatékání materiálu do dělicí roviny je nutné zajistit těsný styk obou částí průtlačnice. Výhodou průtlačnice s vložkou, která je zalisována s přesahem, je její snadná výměna po opotřebení. Ke zvýšení únosnosti průtlačnice jsou používány objímky, do nichž je průtlačnice zapouzdřena s přesahem na kuželovou plochu nebo s ohřevem na plochu válcovou. Používané přesahy se pohybují v rozmezí 4,5 až 5,5 μm na milimetr stykového průměru. Průtlačnici s jednou objímkou lze obecně použít pro vnitřní radiální tlaky až do 1600 MPa. [18]

- Nástroje pro zpětné protlačování – zde má největší vliv tvar čela průtlačníku a podstatně ovlivňuje velikost a průběh tvářecí síly. V praxi se nejlépe osvědčil tvar průtlačníku podle obr. 20, kdy je čelní plocha průtlačníku mírně kuželovitěho tvaru a úhel α je nutné volit nejen s ohledem na tvar průtlačníku, ale především s ohledem na tvářecí teplotu. Doporučený tvar a rozměry nástrojů pro zpětné protlačování v závislosti na teplotě tváření je uveden v příloze č. 4. [18]



Obr. 20 Tvar a části průtlačníku pro zpětné protlačování [18].

Největším problémem u zpětného protlačování je tření mezi povrchem průtlačníku a stěnou vystupujícího kalíšku. Toto tření se výrazně snižuje odlehčením průtlačníku za čelem nástroje. V tomto případě se stěna kalíšku dále nedotýká plochy průtlačníku, pouze dutiny průtlačnice. Zásadní vliv tvaru čela průtlačníku na deformační odpor v závislosti na poměrné deformaci je zřetelný na obr. 21. [18]



Obr. 21 Vliv tvaru čela průtlačníku na deformační odpor [18].

Funkční dutina průtlačnice pro zpětné protlačování je nejčastěji daná vnějším tvarem protlačované součásti. Ústí pracovní dutiny je opatřeno zaoblením nebo kuželovitým náběhem pro usnadnění zavádění polotovaru. Zaoblením hrany u dna průtlačnice je možné výrazně snížit velikost vzniklých radiálních napětí. Pro usnadnění vyhazování protlačku je využíváno otevření dutiny průtlačnice s mírnou kuželovitostí (asi 1:1000), čímž dojde k eliminaci tření a velkých osových sil. Funkční povrch dutiny je broušen a lapován. Únosnost průtlačnice lze zvýšit radiálním předpětím pomocí jedné nebo více objímek. [18]

Materiály používané na nástroje pro tváření za studena musí mít vysokou pevnost, houževnatost a tvrdost. Pro jejich ekonomickou životnost, je nutná vysoká odolnost proti opotřebení a popouštění. Měly by být zvoleny tak, aby byla zajištěna i dobrá obrobiteľnosť a v důsledku toho i nízké výrobní náklady. Obecně se v praxi využívají tvářecí nástroje vyráběné z nástrojové oceli nebo slinutých karbidů. [30]

Druh nástrojové oceli se volí podle použité technologie, podle druhu a stavu tvářeného materiálu, tvaru a velikosti výrobku, výrobní série a druhu nástroje. U nástrojů pro objemové tváření je také důležité jejich tepelné zpracování, kdy je vhodné před vlastním kalením upravit výchozí strukturu pro tepelné zpracování vyžeháním. Kalicí teplota závisí na chemickém složení, zejména na obsahu uhlíku. Po zakalení mají součásti tvářecích nástrojů vysokou tvrdost ale zároveň i velká vnitřní napětí. Proto musí následovat popouštění, aby se zvýšila jejich houževnatost a odstranila tato napětí. Velikost kalících teplot ovlivňuje fyzikální i mechanické vlastnosti oceli. [26; 28]

Nástroje ze slinutých karbidů jsou značně dražší než nástroje z nástrojové oceli. K tomu je nutné brát v úvahu, že provozní manipulace s nimi, tedy při montáži a seřizování stroje, je obtížnější a náročnější a musí se při ní postupovat s největší pečlivostí. Výhodou těchto nástrojů je delší trvanlivost (průměrně 10 až 40krát delší) a tím je zaručena méně častá výměna a manipulace s nástrojem. Výběr základních druhů slinutých karbidů a nástrojových ocelí využívaných na nástroje pro objemové tváření jsou uvedeny v příloze č. 5. [28]

2.5 Stroje pro objemové tváření za studena

Kritériem pro volbu rozměrů a tvarů většiny součástí tvářecích strojů je jejich největší dovolená pružná deformace. Měřítkem odolnosti proti pružným deformacím je tzv. tuhost, která je definovaná jako poměr mezi zatížením a přetvořením v místě zatížení. Rozeznávají se různé druhy tuhosti – tuhost statická nebo dynamická, tuhost v posunutí, v natočení, tuhost v tahu nebo tlaku a další. [36]

Pro výběr nejvhodnějšího lisu pro tváření je nutné zohlednit několik faktorů výroby [36]:

- geometrie a materiál součásti,
- velikost výrobní série
- aktuální strojový park (např. žihací a fosfátovací linky).

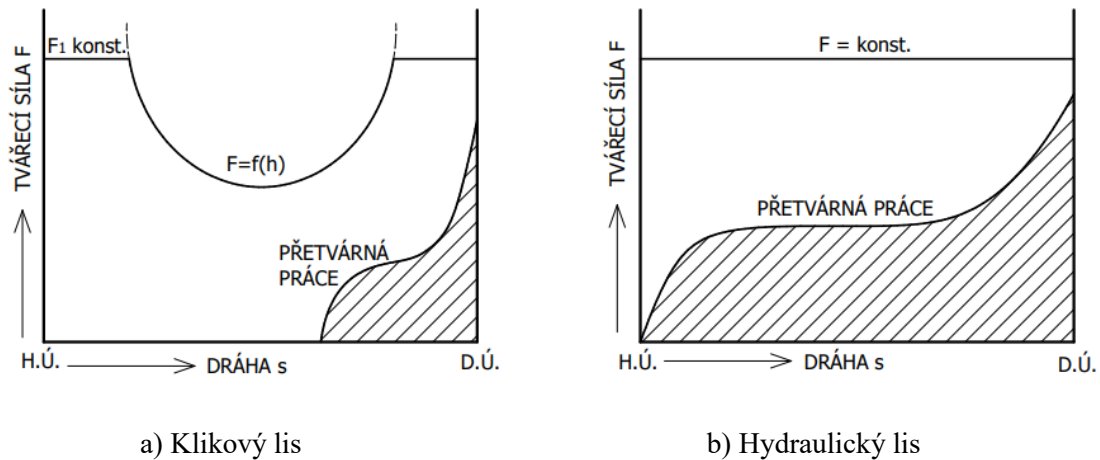
K objemovému tváření kovů se dnes používají lisy různé konstrukce nebo speciální tvářecí stroje. Lisovací síla se pohybuje od 300 až do 120000 kN. [28; 34] Stroje používané k tváření lze rozdělit na několik druhů:

- Mechanické lisy jsou vhodné především pro objemové tváření velkých výlisků, kdy je třeba vyvinutí velkých tvářecích sil. Dále pro součásti, jejichž výrobní série jsou malé pro výrobu na postupových lisech, pro výlisky k jejichž výrobě stačí jedna maximálně dvě tvářecí operace a také pro výlisky, vyžadující tepelné zpracování mezi jednotlivými operacemi. Za největší výhodu mechanických lisů lze považovat jejich vysokou tuhost, která má velký vliv na účinnost tváření, přesnost a na životnost nástrojů i samotného stroje. Mechanické lisy jsou nejčastěji poháněny elektromotorem a je možné je dle způsobu pohybu beranu rozdělit na tyto druhy [26; 28; 36]:
 - Klikové lisy – lis je poháněn elektromotorem, který pohybuje pomocí převodu ozubených kol, spojky, klikového hřídele a ojnice beranem lisu, v němž je upevněn nástroj. Tyto lisy mají většinou dvoustojanovou konstrukci.
 - Kolenové lisy – u kterých se krouticí moment elektromotoru přenáší na setrvačnickou spojku a klikovým hřídelem na kolenové ústrojí, které pohybuje beranem. Stojan lisu je ve většině případů celistvý ocelový odlitek.
 - Výstředníkové lisy – zde beranem lisu pohybuje výstředník, který je uváděn v pohyb přes spojku elektromotorem. Lis může mít jednostojanovou nebo dvoustojanovou konstrukci.
- Hydraulické lisy jsou vhodné k tváření rozměrných, a především dlouhých výlisků. Snadno se na nich dosahuje velkých tvářecích sil na dlouhé pracovní dráze. Pohyb beranu je zde umožněn pomocí hydraulického pístu, který je poháněn buď tlakovou kapalinou z akumulátoru, nebo přímo z čerpadla. Pracovní kapalinou je nejčastěji voda nebo hydraulické oleje. [26; 28; 36]

Zatím co u klikových lisů se dá využít jmenovité tvářecí síly průměrně jen 30° natočení kliky před mrtvou polohou (při 90° lze využít zhruba jen polovinu a u kolenových lisů jen asi pětinu tvářecí síly), je možné u hydraulických lisů využít jmenovité tvářecí síly téměř po celý zdvih. Další výhodou hydraulických lisů je také to, že lze dosáhnout jednak velké přibližovací rychlosti a zpětné rychlosti, ale zároveň i malé dosedací rychlosti nástroje na materiál. Nevýhodou je však menší počet zdvihů a poměrně malá pracovní rychlost, na které závisí plynulý tok materiálu. Tato pracovní rychlost je oproti mechanickým lisům zhruba 5 až 10krát menší. [26; 28; 36]

Na obrázku 22 jsou pro porovnání zobrazeny charakteristiky klikového a hydraulického lisu, a to průběh síly a práce v závislosti na dráze beranu. Nejdůležitější charakteristické veličiny u lisů jsou lisovací síla, práce a zdvih beranu. Nejvyšší lisovací síla znamená,

že rám lisu vydrží tuto sílu bez nebezpečí prasknutí, a aniž by došlo k jeho nepřijatelné deformaci. [26; 28; 36]



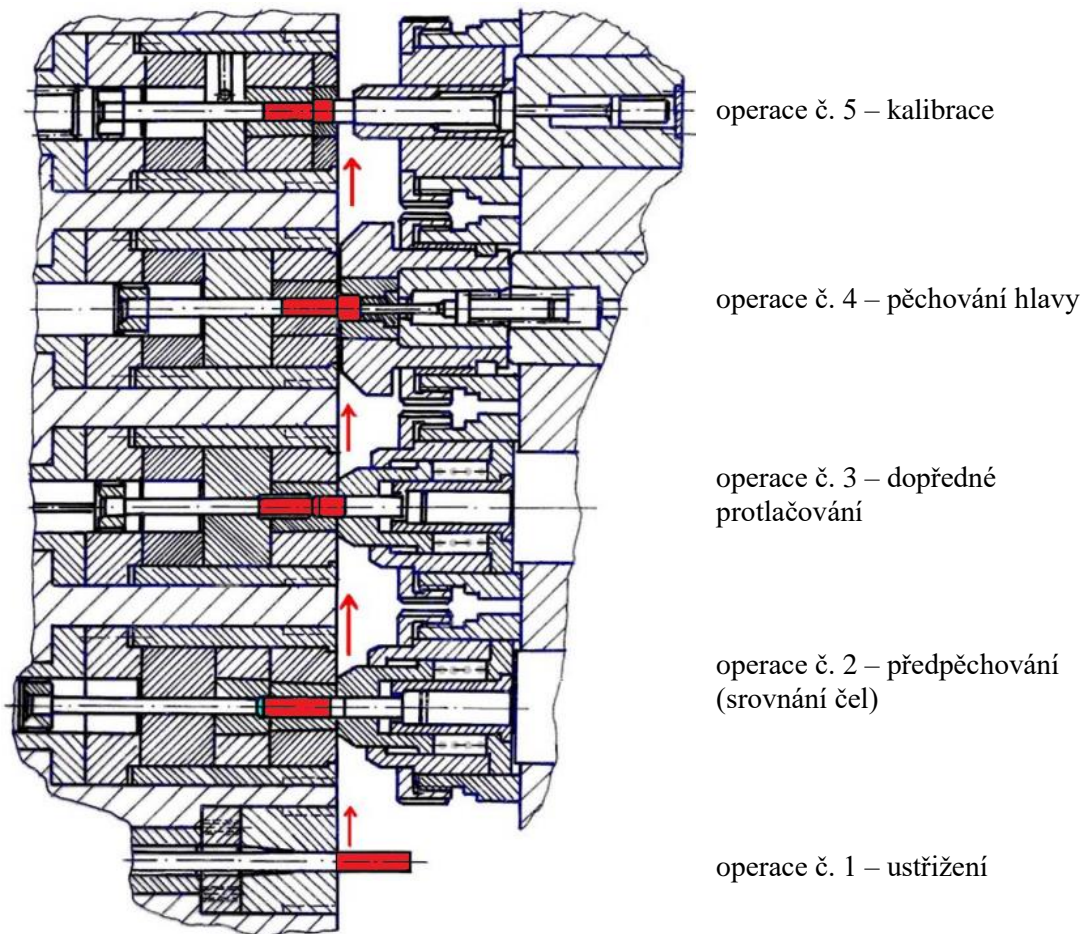
Obr. 22 Průběhy síly a práce klikového a hydraulického lisu [37].

- Víceoperační objemové tváření je převážně kombinací protlačování a pýchování v několika po sobě jdoucích operacích. K přednostem této technologie patří využití vzniklého přetvárného tepla z předchozí operace. Víceoperační tváření se uplatňuje především pro velkosériovou a hromadnou výrobu, a to na speciálních tvářecích automatech, aby nebylo nutné pro každou operaci měnit lisovnice a lisovníky. Proto se nejčastěji využívají automatické postupové lisu, které tvářejí výlisek postupně v sadě několika nástrojů, přičemž je polotovár přenášen mezi jednotlivými operacemi zvláštním zařízením. [26]

Výchozím materiálem pro tyto stroje jsou většinou svítky drátu, u větších průměrů je možné použít i tyče. Produktivita tvářecích automatů se pohybuje ve stovkách výlisků za minutu, často se u menších produktů dosahuje hodnot i 1000 zdvihů za minutu. [26]

Velký počet zdvihů za minutu a tím i rázové zatížení tvářecích automatů způsobují, že funkční části podléhají značnému trvalému dynamickému zatížení. Proto konstrukce automatických tvářecích strojů musí odpovídat všem požadavkům na moderní stroje pro hospodárné tváření. Požaduje se především velká provozní spolehlivost, trvanlivost, jednoduchá obsluha a údržba, bezpečnost a čistota práce. Zvláštní pozornost je nutno věnovat tuhosti automatů, jež brání nežádoucím deformacím v průběhu tváření a zvyšuje tak přesnost výlisku jako i trvanlivost nástrojů. [26]

Nejčastějšími výrobky tvářenými na postupových automatech jsou především normalizované strojní a spojovací součásti jako šrouby a matice. Tvářecí nástroje pro víceoperační tvářecí automaty se sestavují do bloků. Využívají se dva druhy uspořádání matriční desky a to buď tzv. horizontální (obr. 23), jehož výhodou je snadné zavádění polotovaru ve formě dlouhých tyčí nebo svítku drátu, nebo vertikální. [16; 18; 26; 38]

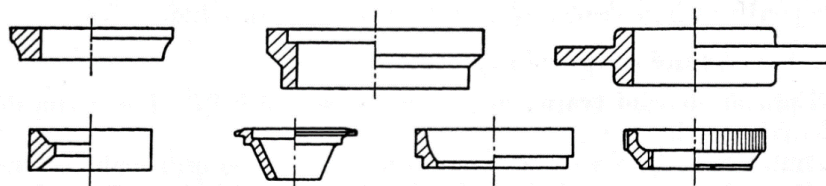


Obr. 23 Postupový tvářecí automat [38].

2.6 Technologicko-konstrukční směrnice a základní výpočty

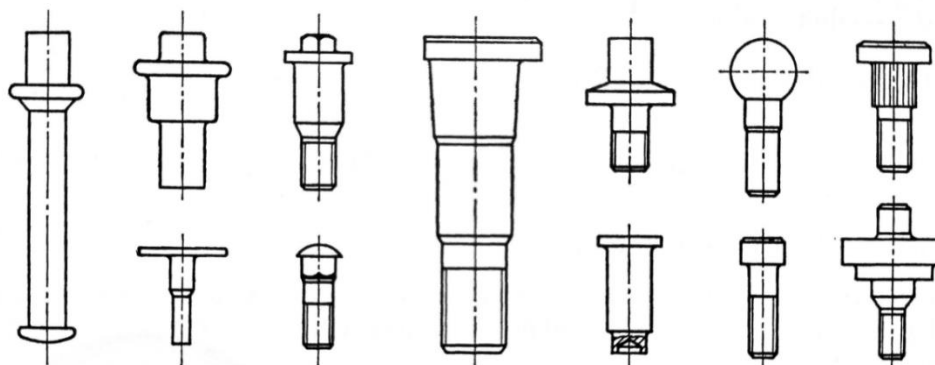
Tváření za studena je výrobní postup vhodný pro velkosériovou a hromadnou výrobu. Čím větší je množství výrobků, tím je požití této výrobní metody hospodárnější. Podle velikosti strojového parku výrobního závodu, především velikosti lisů a zařízení pro tepelné zpracování a povrchovou úpravu, lze touto metodou vyrábět, jak menší součásti od 1 do 20 kg, tak i součásti větších rozměrů až do hmotnosti 35 kg. Objemovým tvářením za studena je možné vyrábět také velké množství různých tvarů dílců, které se ale doporučuje při návrhu upravit tak, aby byly vhodné pro danou technologii výroby. Tyto díly je možné rozdělit do několika charakteristických skupin dle jejich tvarových znaků [26; 28]:

- nízké rotační součásti s průchozím otvorem (obr. 24), zhotovené kombinací některých základních způsobů objemového tvářením za studena,



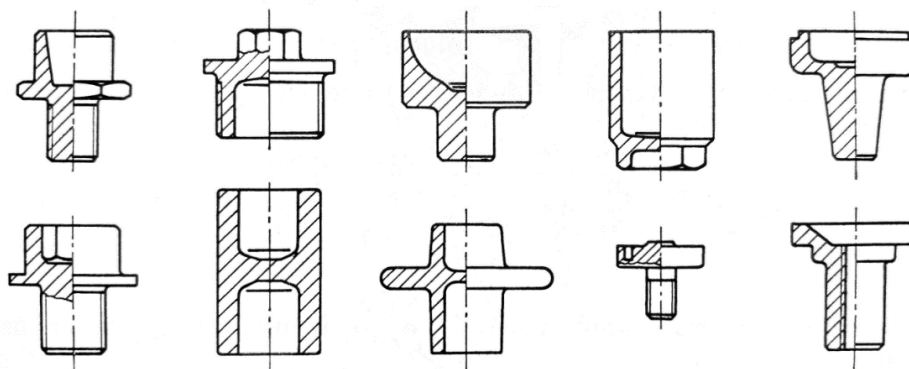
Obr. 24 Nízké rotační součásti s průchozím otvorem [26].

- součásti čepového tvaru (obr. 25), vyráběné především pěchováním, stranovým nebo dopředným protlačováním,



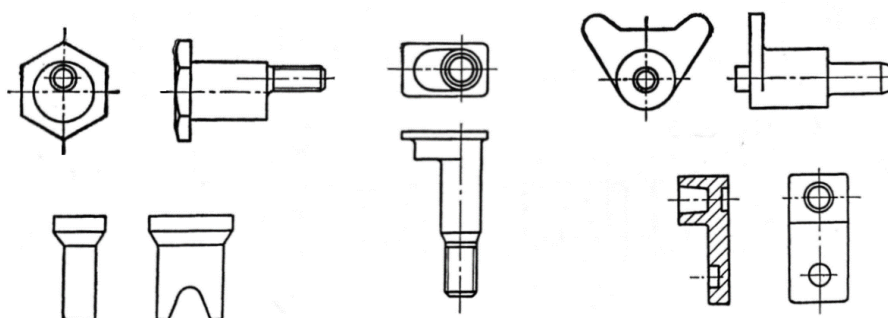
Obr. 25 Součásti čepového tvaru [26].

- součásti kalíškovitého typu (obr. 26), které se vyrábějí především zpětným, případně kombinací s dopředným protlačováním,



Obr. 26 Součásti kalíškovitého tvaru [26].

- součásti nepravidelných tvarů (obr. 27), vyráběné ojediněle kvůli obtížné vyrobiteľnosti metodami objemového tváření za studena.



Obr. 27 Součásti nepravidelného tvaru [26].

Při konstrukčním řešení tvaru výsledných výlisků je také nutné brát v úvahu tvary vhodné a nevhodné pro metody tváření za studena. Pokud je to možné, doporučuje se vyhnout následujícím tvarům [28]:

- Nahromadění materiálu – je nutné vyvarovat se hlavně nesymetrickému nahromadění materiálu.
- Ostré přechody – doporučuje se vyhnout náhlým přechodům, ostrým hranám a rohům, aby materiál v průběhu tváření nevytvářel zbytečný odpor. Rohy a hrany vyráběné součásti je vhodné zaoblit podle jmenovitého průměru poloměrem od 1,5 do 20 mm.

- Místní zúžení – je nezbytné vyhnout se místnímu zúžení za všech okolností u protlačovaných součástí. I jednodušší místní zúžení zvyšuje náklady na nástroje, jelikož by bylo nutné použít postranní razníky pro tvorbu těchto zúžení.
- Kuželovitost – v některých případech je možné vyrábět kuželovité součásti protlačováním za studena. Pak ovšem záleží na požadovaném úhlu kužele. Jsou-li úhly kužele příliš velké, stává se protlačování kužele nevhodným a je ekonomičtější protlačovat válcovou součást a následně vyrábět kužel pomocí obrábění.

2.6.1 Deformace a rychlost přetvoření

Rozměrové změny při tváření se v technické praxi nejčastěji vyjadřují pomocí poměrné ε a skutečné (logaritmické) φ deformace. Stupeň přetvoření (deformace) je limitován zpevněním materiálu a je proto nutné zachovat určitou hodnotu přetvoření, aby nenastalo porušení celistvosti vylisku. Při zvětšování uvažovaného rozměru vylisku nabývají zmíněné veličiny záporných hodnot, naopak při zmenšování daného rozměru vycházejí hodnoty kladné. Například u pěchování tedy vycházejí hodnoty kladné pro deformaci výšky vzorku a záporné hodnoty pro přetvoření sledovaného průřezu. U technologie protlačování se sleduje především průřez tvářeného vylisku. [16; 18]

Poměrná deformace průřezu pro pěchování válcového tvaru [39]:

$$\varepsilon = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \cdot 100 = \frac{D_0^2 - D_1^2}{D_0^2} \cdot 100, \quad (2.1)$$

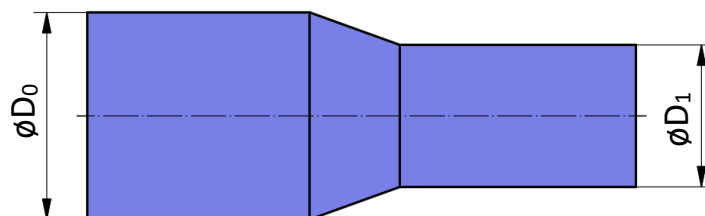
kde: S_0 – výchozí průřez dílce [mm²],
 S_1 – konečný průřez dílce [mm²],
 D_0 – výchozí průměr dílce [mm],
 D_1 – konečný průměr dílce [mm].

Častěji se však u objemového tváření (pěchování a protlačování) používá logaritmické deformace. Je zde možné sčítat více po sobě jdoucích deformací daného tělesa neboli sčítat deformace vzniklé v jednotlivých tvářecích operacích.

Logaritmické přetvoření průřezu pěchovaného válcového dílce se vypočte [39]:

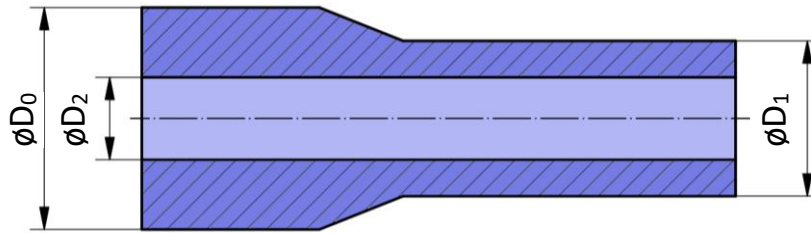
$$\varphi = \ln\left(\frac{S_0}{S_1}\right) = \ln\left(\frac{D_0^2}{D_1^2}\right). \quad (2.2)$$

Stejných vzorců se využívá také u dopředného protlačování plných dílců. Zde však dochází naopak ke zmenšování průřezu polotovaru (obr. 28) a v důsledku toho vycházejí kladné hodnoty deformací příčného průřezu.



Obr. 28 Geometrické parametry dopředného protlačování plného tělesa [39].

Změna nastává u dopředného protlačování dutých součástí, kdy je nutné ve vzorci brát v potaz dutou část průřezu dílu. Rozměry užitá ve vzorci jsou zobrazeny na obrázku 29.



Obr. 29 Geometrické parametry dopředného protlačování dutého tělesa [39].

Poměrná deformace průřezu při dopředném protlačování dutého tělesa [39]:

$$\varepsilon = \frac{(S_0 - S_2) - (S_1 - S_2)}{(S_0 - S_2)} \cdot 100 = \frac{S_0 - S_1}{S_0 - S_2} \cdot 100 = \frac{D_0^2 - D_1^2}{D_0^2 - D_2^2} \cdot 100, \quad (2.3)$$

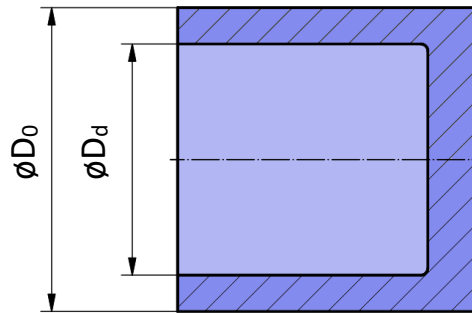
kde: S_2 – průřez otvoru dílce [mm^2],

D_2 – průměr otvoru dílce [mm].

Logaritmičké přetvoření průřezu při dopředném protlačování dutého tělesa [39]:

$$\varphi = \ln\left(\frac{S_0 - S_2}{S_1 - S_2}\right) = \ln\left(\frac{D_0^2 - D_2^2}{D_1^2 - D_2^2}\right). \quad (2.4)$$

Při zpětném protlačování se dutá část objevuje pouze v konečném průřezu dílce, viz obr. 30.



Obr. 30 Geometrické parametry zpětného protlačování [39].

Vzorec pro stanovení poměrné deformace při zpětném protlačování [39]:

$$\varepsilon = \frac{S_0 - (S_0 - S_d)}{S_0} \cdot 100 = \frac{S_d}{S_0} \cdot 100 = \frac{D_d^2}{D_0^2} \cdot 100, \quad (2.5)$$

kde: S_d – průřez vnitřní dutiny dílce [mm^2],

D_d – průměr vnitřní dutiny dílce [mm].

Logaritmičké přetvoření průřezu při zpětném protlačování [39]:

$$\varphi = \ln\left(\frac{S_0}{S_0 - S_d}\right) = \ln\left(\frac{D_0^2}{D_0^2 - D_d^2}\right). \quad (2.6)$$

Při tváření se nástroj pohybuje určitou rychlostí závisící na druhu použitého stroje, viz tabulka 3. Rychlost přetvoření je definována jako změna logaritmičké deformace za jednotku času vztahem [39]:

$$\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{dh}{h} \cdot \frac{1}{dt} = \frac{v_n}{h}, \quad (2.7)$$

kde: v_n – okamžitá rychlost pohybu nástroje [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

h – okamžitá výška [mm],

$d\varphi$ – přírůstek logaritmičké deformace [-],

dt – přírůstek času [s],

dh – změna výšky tvářené součásti [mm].

Rychlost přetvoření je tedy rychlost, kterou se k sobě přibližují dva průřezy tvářeného kovu vzdálené od sebe o jednotku délky. Závisí tedy nejen na rychlosti pohybu nástroje, ale i na stlačované výšce.

Tab. 3 Rychlosti tvářecích nástrojů [18].

Tvářecí stroj	v_n [m·s ⁻¹]	$\dot{\varphi}$ [s ⁻¹]
Hydraulické lisy	0,02 ÷ 0,25	0,01 ÷ 10
Klikové a vřetenové lisy	0,3 ÷ 0,6	4 ÷ 25
Buchary	5 ÷ 8	40 ÷ 60
Vysokorychlostní buchary	20 ÷ 40	200 ÷ 1000

2.6.2 Tvářecí odpory

Přirozený přetvárný odpor σ_p je odpor materiálu proti působení vnějších sil za podmínek jednoosého stavu napjatosti. Závisí obecně na chemickém složení a struktuře daného materiálu, velikosti a rychlosti deformace a teplotě tváření. Stanovuje se zejména tahovou zkouškou materiálu, kdy je docíleno požadovaného jednoosého stavu napjatosti. [16; 39]

Deformační odpor σ_a představuje napětí, které je třeba překonat při deformaci konkrétního materiálu v určitých podmínkách technologického postupu tváření. Deformační odpor je souhrnem všech napětí v deformovaném materiálu, které působí proti napětí vyvolaném vnějšími silami. Deformační odpor je roven součtu hodnot přirozeného přetvárného odporu σ_p a pasivních odporů (zejména tření). [16]

Mezi pasivní odpory, mimo tření, patří i geometrie tvářeného dílce, vliv odlišnosti mezi reálnou rychlostí deformace a rychlostí užitou pro stanovení σ_p . Dále vliv nerovnoměrného rozložení napětí v důsledku komplikovaného tvaru tvářeného dílce, nebo nehomogennou teplotního pole. Také je třeba brát v úvahu i změnu napjatosti při reálném tvářecím procesu a experimentálním zjišťování σ_p . [16]

Pro zjištění deformačního odporu při pěchování válcového polotovaru je možné použít vztah dle Siebela [39]:

$$\sigma_a = \sigma_p \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot D_1}{h} \right), \quad (2.8)$$

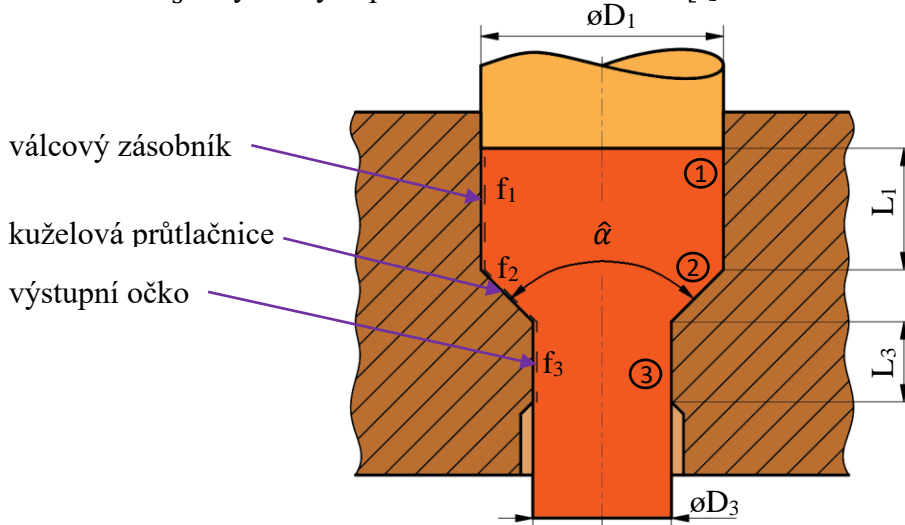
kde: σ_p – přirozený přetvárný odpor [MPa],
 f – součinitel tření mezi nástrojem a materiálem [-],
 h – spěchovaná výška [-].

Při výpočtu deformačního odporu pro dopředné protlačování je nutné průtlačnici rozdělit na tři části, a to na výstupní očko, kuželovou redukční část a válcový zásobník, jak je vyznačeno na obrázku 31. Všechny tyto části se objevují ve výsledném vzorci pro výpočet deformačního odporu dle Gubkina [39]:

$$\sigma_a = \sigma_{ps} \cdot \left[\left(4 \cdot f_3 \cdot \frac{L_3}{D_3} \cdot \frac{\sigma_{ps}}{\sigma_{p3}} + \frac{\tan \alpha}{f_2} + 1 \right) \cdot \left(\frac{D_3}{D_3} \right)^{\frac{2 \cdot f_2}{\tan \alpha}} - \frac{\tan \alpha}{f_2} - 1 \right] \cdot e^{0,43 \cdot 4 \cdot f_1 \cdot \frac{L_1}{D_1}}, \quad (2.9)$$

kde: σ_{ps} – střední hodnota přirozeného přetvárného odporu [MPa],
 f_1 – součinitel tření ve válcovém zásobníku [-],
 f_2 – součinitel tření v kuželové průtlačnici [-],
 f_3 – součinitel tření ve výstupním očku [-],
 α – vrcholový úhel redukčního kužele [°],

L_1 – výška válcového zásobníku [-],
 L_3 – výška výstupního kalibračního očka [-].



Obr. 31 Geometrický model dopředného protlačování [39].

Případně je možné ověřit nebo zpřesnit výsledek použitím vztahu dle Feldmanna, který je doplněn o vliv tření ve výstupní očku a válcovém zásobníku [39]:

$$\sigma_d = \sigma_{ps} \cdot \left[\left(1 + \frac{f_2}{\hat{\alpha}} \right) \cdot \ln \left(\frac{D_1}{D_3} \right)^2 + \frac{2}{3} \cdot \hat{\alpha} \right] + 4 \cdot f_3 \cdot \frac{L_3}{D_3} \cdot \sigma_{ps} + 4 \cdot f_1 \cdot \frac{L_1}{D_1} \cdot \sigma_{p1}, \quad (2.10)$$

kde: σ_{p1} – přirozený přetvárný odpor ve válcovém zásobníku [MPa],

$\hat{\alpha}$ – vrcholový úhel redukčního kužele [rad].

U zpětného protlačování se geometrický model opět dělí do třech částí dle obr. 32. Pro výpočet deformačního odporu se zde využívá vztahu dle Dippera [39]:

$$\sigma_d = \sigma_{p1} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot f_1 \cdot \frac{d}{b} \right) + \sigma_{p2s} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot f_{2s}}{D - d} \cdot b \right), \quad (2.11)$$

kde: σ_{p1} – přirozený přetvárný odpor na dně průtlačnice [MPa],

σ_{p2s} – střední hodnota přirozeného přetvárného odporu v druhé oblasti [MPa],

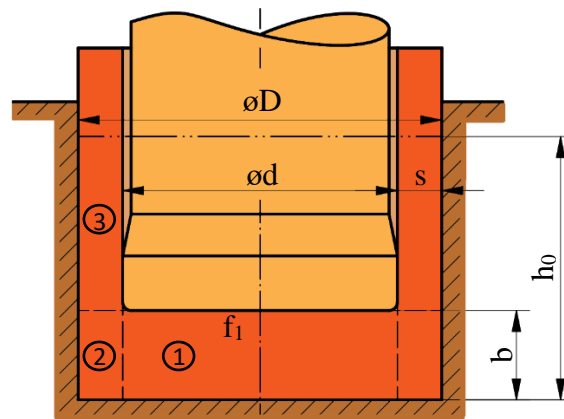
f_1 – součinitel tření pod průtlačníkem [-],

$f_{2s} = \frac{1}{2} \cdot (f_1 + 0,5)$ – střední součinitel tření [-],

D – průměr polotovaru (průtlačnice) [mm],

d – průměr průtlačníku [mm],

b – hloubka dna výlisku [mm].



Obr. 32 Geometrický model zpětného protlačování [39].

2.6.3 Tvářecí síla a práce

Díky deformačnímu odporu je dále možné stanovit potřebnou tvářecí sílu. Ta je definována jako součin deformačního odporu a plochy dotyku materiálu s lisovníkem. Stanovení tvářecích sil je nutné pro správné dimenzování tvářecích nástrojů a ke kontrole jmenovité síly zvoleného lisu. Aby nedošlo k porušení činných částí nástroje (průtláčník, průtláčnice, ...) nesmí hodnota deformačního odporu σ_d překročit dovolené namáhání v tlaku materiálu nástrojů. [3; 39]

$$F = \sigma_d \cdot S \quad (2.12)$$

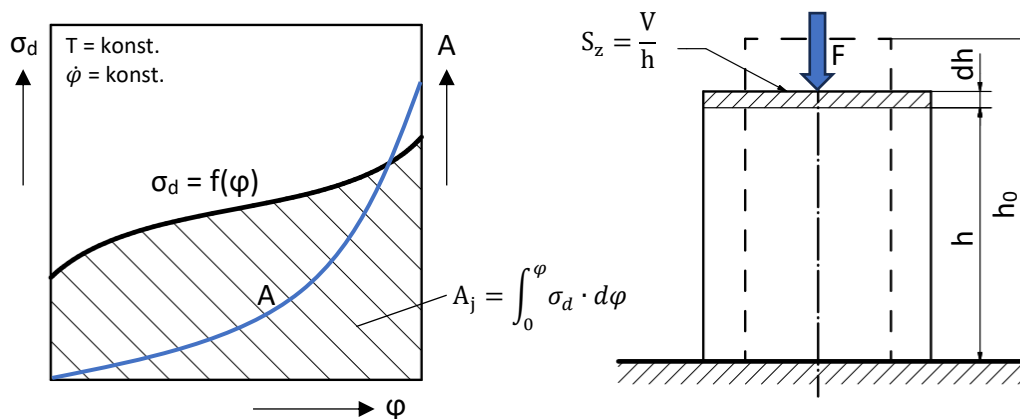
kde: σ_d – deformační přetvárný odpor [MPa],
 S – plocha styku nástroje s materiálem [mm²].

Z tvářecí síly lze následně stanovit přetvárnou práci, která je definována pomocí tvářecí síly působící na celkové dráze nástroje. Lze ji odvodit pomocí vzorce [39]:

$$A = F \cdot z_n = \int_0^h \sigma_d \cdot S \cdot dh = \int_0^h \sigma_d \cdot \frac{V}{h} \cdot dh = V \cdot \int_0^\varphi \sigma_d \cdot d\varphi = V \cdot A_j \quad (2.13)$$

kde: z_n – okamžitá dráha pohybu nástroje [mm],
 h – okamžitá výška [mm],
 $d\varphi = \frac{dh}{h}$ – přírůstek logaritmické deformace [-],
 dh – změna výšky tvářené součásti [mm],
 V – objem protlačku [mm³],
 A_j – měrná přetvárná práce [J·mm⁻³].

Měrná přetvárná práce je vztažena na jednotku objemu a představuje plochu pod křivkou deformačního odporu, viz obrázek 33. [39]



Obr. 33 Schéma vyhodnocení měrné přetvárné práce [39].

2.7 Tření, maziva a příprava polotovaru

Vnější tření mezi tvářeným materiálem a nástrojem je průvodním jevem všech tvářecích pochodů. Tření je definováno jako odpor proti relativnímu pohybu dvou stýkajících se těles. Při rozboru tvářecích procesů je třeba stanovit, zda se sekundární síly od tření uplatňují aktivním nebo pasivním způsobem. Každopádně mají vliv na velikost tvářecích sil, a proto i volbu tvářecího stroje s potřebnou jmenovitou silou. Obecně je tření definováno podle Coulombova zákona smykovým kontaktním napětím, které je součinem normální složky napětí a součinitele tření f . [39]

Hodnoty součinitele tření f jsou v konkrétních podmínkách plastického přetvoření vyšší než u běžných třecích podmínek strojních součástí. Vnější tření ve tváření plní většinou úlohu

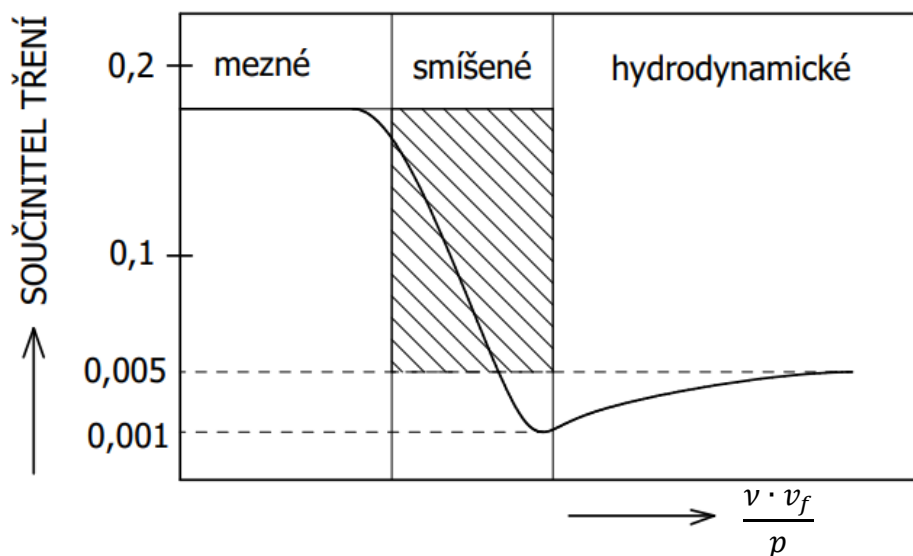
pasivního činitele, který brzdí pohyb tvářeného materiálu a tím zpomaluje rozvoj plastického přetvoření, zvyšuje potřebnou přetvárnou práci a způsobuje opotřebení nástrojů. Obecně je možné rozdělit tření na několik druhů [18]:

- Suché tření – nastává při přímém styku povrchových nerovností bez přítomnosti maziva (f se pohybuje 1 až 1,5). Při tváření se téměř nevyskytuje, protože stykové plochy jsou obvykle znečištěny.
- Mezní tření – je charakterizováno přítomností velmi tenké vrstvy maziva (cca 1 μm) mezi stýkajícími se povrchovými nerovnostmi. Dochází k částečnému kovovému styku hrotů nerovností a porušení tenkého mazacího filmu. Tenký hraniční film mazadla je pod vlivem mezimolekulárních sil, neřídí se zákony hydrauliky, ale snižuje tření a omezuje možnost vzniku svarů. Hodnoty součinitele tření se pohybují od 0,05 do 0,2.
- Hydrodynamické tření – vzniká při dokonalém oddělení povrchů vrstvou maziva, která podléhá zákonům hydrodynamiky. Hydrodynamický součinitel tření f_{dyn} je definován vztahem (2.10) s konstantní kluzovou rychlostí v_f , koeficientem dynamické viskozity ν , měrným tlakem p a tloušťkou vrstvy maziva h_m .

$$f_{dyn} = \frac{\nu \cdot v_f}{p \cdot h_m} \quad (2.10)$$

Hydrodynamické tření je u běžných tvářecích procesů výjimkou. Častěji se objevuje polokapalinné tření, hraničící s mezním třením, kdy se f pohybuje od 0,005 do 0,05.

- Smíšené tření – jako kombinace mezního a hydrodynamického tření je nejtypičtějším druhem tření při tvářecích procesech., které bylo prokázáno u všech technologií tváření za studena. Podle Striebeckova diagramu na obr. 34 je zřejmé, že velikost součinitele tření se může měnit v širokém rozsahu. Podle druhu použitého maziva, druhu a jakosti třecích ploch se může při tváření za studena pohybovat f v rozmezí hodnot 0,2 až 0,04.



Obr. 34 Striebeckův diagram oblastí tření [39].

Rozhodující vliv z technologických podmínek na velikost součinitele tření mají především teplota, rychlost přetvoření a měrný tlak. Při objemovém tváření za studena s běžným mazáním se pohybuje v rozmezí 0,04 až 0,08. Při zhoršení podmínek mazání vzroste a při hodnotách 0,1 až 0,15 začíná docházet k nežádoucímu zadírání. [18]

Velmi závažným a nežádoucím jevem při tváření je, že za konkrétních podmínek suchého tření může dojít k tzv. svaru – zaklesnutí povrchových nerovností a vzniku intermetalického spoje.

Tomu lze zabránit vyšší kvalitou broušení a lapování funkčních povrchů nástrojů a vhodnou volbou použitého maziva. [18]

Pro zabránění přímého styku činné části nástroje s tvářeným materiálem je nutné vytvořit na polotovaru mazací film o dostatečné tloušťce. Mazivo zároveň pomáhá k chlazení nástroje, které je nezbytné zejména při tváření na mechanických lisech nebo automatech, kdy probíhá tváření za vysokých rychlostí. Při tváření za studena se nejčastěji využívá těchto maziv[3]:

- ve vodě rozpustná mýdla,
- neemulgující minerální oleje,
- živočišné a rostlinné tuky,
- grafit nebo molikot (MoS_2),
- případně maziva na bázi skla.

Správná příprava polotovaru a jeho povrchová úprava je zásadní pro hospodárnost tvářecího procesu a pro kvalitu tvářených výrobků. Příprava polotovaru běžně zahrnuje tento sled technologických operací [16; 18; 40]:

- Příprava rovnáním na válcových rovnačkách.
- Mechanické odstranění povrchových vad a zabezpečení přesného rozměru materiálu. Využívají se technologie loupání, broušení, tryskání či leštění.
- Dělení materiálu pomocí stříhání nebo řezání špalíků z tyčí normalizovaných rozměrů, případně vystřihováním z plechu na stříhadle.
- Tepelné zpracování. Uplatňuje se především žíhání oceli naměkko pro snížení pevnosti na minimální hodnoty. Pro hliník a jeho slitiny se využívá homogenizačního žíhání.
- Čištění a úprava povrchu. Jedná se zejména o čištění, odstranění okují po tepelném zpracování v omílacích bubnech.
- Oplachování a moření v kyselinách s následnou neutralizací. Následuje odmaštění před nanášením fosfátové vrstvy.
- Fosfátování – vytvoření nosného povlaku pro mazivo. Fosfátová vrstva je pórovitá a dobře ulpí na povrchu ocelových, popř. hliníkových polotovarů, nasaje do svých pórů mazivo a udržuje jej, aby bylo splněno dostatečné mazání v průběhu celého tvářecího procesu.
- Nanášení maziva – nejčastěji ponořením polotovaru do tekutých maziv nebo nástřikem. Asi jedna čtvrtina až jedna polovina naneseného maziva na fosfátovou vrstvu je setřena při tváření nástrojem. Zbylá část maziva ulpí na polotovaru jako velmi rovný a dokonale hladký povlak. Případně je možné použít ruční nanášení v mazací skříně nebo v bubnech.

2.8 Numerické simulace ve tváření

V praxi se při návrhu tvářecích postupů, a především vizualizaci chování materiálu při tváření, čím dál více využívá výpočtů pomocí numerických simulací. Díky tomu je možné předejít nevhodnému tečení materiálu při tváření nebo také deformaci nástrojů z důvodů nedostatečného dimenzování na zatěžující síly. V mnoha situacích vývoje a návrhu procesů nahradily simulace zkoušky procesů v plném měřítku, čímž se zkrátila doba vývoje a náklady ve srovnání s konvenčními experimentálními iteračními metodami. V některých případech je dokonce možné předpovědět mikrostrukturu a vlastnosti produktu, jako i elastické odpružení a zbytková napětí. Výpočetní software pro simulaci technologických procesů pomocí numerických simulací nabízí řada firem, pro tvářecí procesy se nejčastěji využívají softwary jako Deform3D, FormFEM, ANSYS nebo Simufact forming. Numerické metody se v zásadě dělí na síťové a bezsíťové, ty následně můžeme rozdělit podle stylu řešení úlohy takto [41; 42]:

- metoda konečných diferencí,
- metoda oddělených prvků,
- metoda SPH,
- metoda konečných objemů,
- metoda konečných prvků.

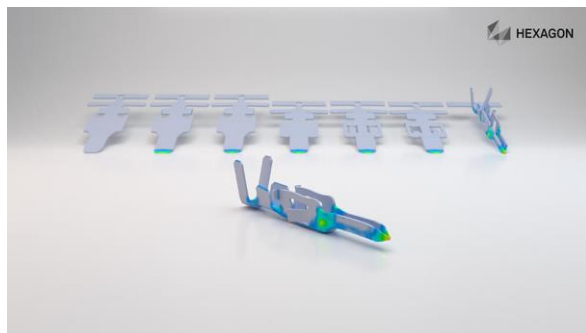
Pro tváření se nejčastěji využívá metoda konečných prvků (MKP), jejíž základem je rozdělení spojitého kontinua (řešeného tělesa) na konečný počet prvků o daných rozměrech. Podle rozměru úlohy se tyto prvky dělí na 1D – lineární, 2D – plošné a 3D – tělesové prvky. Řešené veličiny jsou následně počítány v rozích jednotlivých prvků, tzv. uzlových bodech. Spojením těchto uzlových bodů vzniká výpočetní síť o definované hustotě, která může být strukturovaná nebo nestrukturovaná, která umožňuje zjemnění v požadovaných oblastech, a tedy získání přesnějšího řešení. [41]

Při simulaci tvářecích procesů je nutné správně definovat výpočetní síť o požadované distribuci hustoty sítě. V průběhu tvářecího procesu polotovar prochází velkou plastickou deformací a relativní pohyb mezi deformujícím se materiálem a povrchem formy je výrazný. Proto je nutné vygenerovat novou síť a interpolovat data ze staré sítě do nové sítě, abychom získali přesné výsledky a nedošlo ke zkolabování výpočtu. [42]

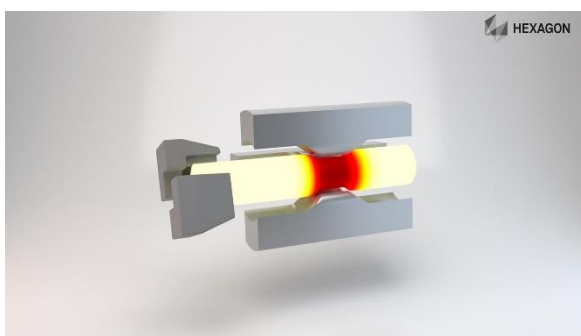
Pro správné provedení numerického výpočtu a dosažení kvalitních výsledků srovnatelných s reálným procesem je nutné vždy zadat přesná vstupní data. Jde především o materiálová data, geometrická data (CAD model), stanovení pohybu nástrojů nebo teplotní ovlivnění nástrojů a materiálu. Příklady využití numerických simulací při modelování technologických procesů je možné zhlédnout na obrázku 35. [43; 44]



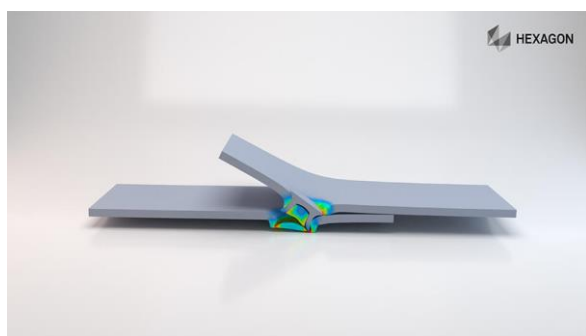
a) protlačování za studena



b) ohýbání



c) volné kování

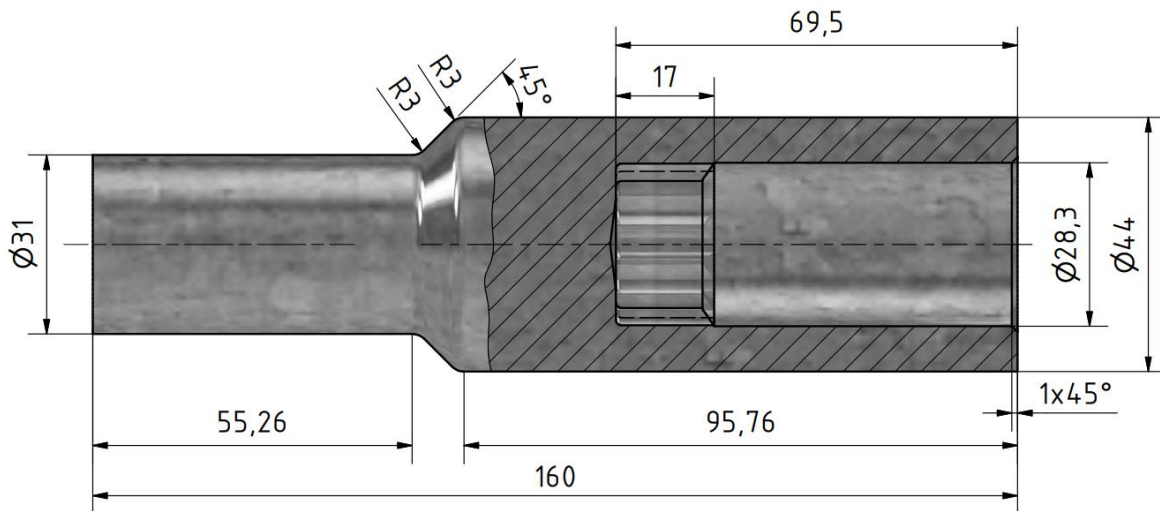


d) spojování

Obr. 35 Příklady použití numerických simulací ve tváření [44].

3 NÁVRH VÝROBY SOUČÁSTI

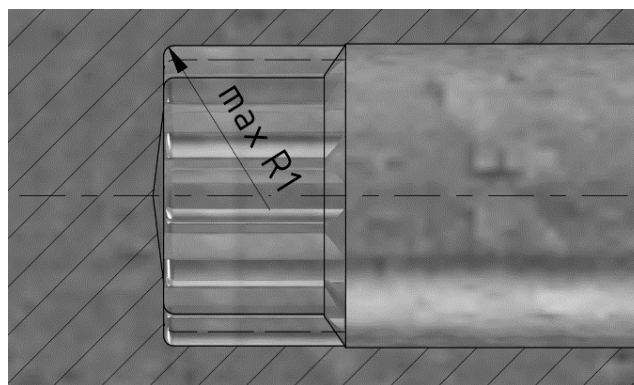
Zadanou součástí je hřídel, znázorněná na obrázku 36, o celkové délce 160 mm a vnějších průměrech 31 mm a 44 mm. Hřídel obsahuje vnitřní dutinu o průměru 28,3 mm v celkové délce 69,5 mm, kdy 17 mm od dna dutiny je vytvořeno drážkování. Součást je opatřena sražením, případně zaoblením na všech přechodech mezi jednotlivými průměry. Všechny přesné rozměry součásti jsou zaznamenány v příloze na výkresu s označením 2024-DP-217475-01.



Obr. 36 Tvar a rozměry zadané součásti.

Hřídel bude vyráběna pomocí objemového tváření za studena, pro které je nejvíce problematickým prvkem na součásti tvorba vnitřního drážkování. Vzhledem k tomu, že se jedná o polotovar pro další technologické zpracování (obrábění), není požadována žádná konečná povrchová úprava součásti ani tepelné zpracování. Tepelné zpracování bude ve výrobě zahrnuto pouze v případě potřeby, a to v podobě normalizačního žíhání k obnově tvařitelnosti materiálu mezi jednotlivými operacemi.

Jedná se o součást rotačně symetrického tvaru, mimo vnitřního drážkování. Dno otvoru má zadaný tvar, kterému není těžké přizpůsobit tvar průtlačníku. Na součásti se neobjevují žádné náhlé přechody, ani ostré hrany, jelikož je součást na přechodech mezi většími průměry opatřena zaoblením. Jeho poloměr 3 mm, splňuje doporučení pro dopředné protlačování, a neměl by tedy bránit toku materiálu. Poloměr zaoblení u dna dutiny (obr. 37) je předepsán max. 1 mm. Dle normy je poloměr zaoblení průtlačníku pro zpětné protlačování stanoven jako (0,05 až 0,1) násobek průměru průtlačníku. Zde by byl tedy nejmenší možný poloměr roven 1,4 mm. Je ale nutné brát v potaz, že v tomto případě se nejedná o válcový průtlačník, ale o tvarový průtlačník pro výrobu drážek. Vhodnost poloměru bude ověřena pomocí simulace.



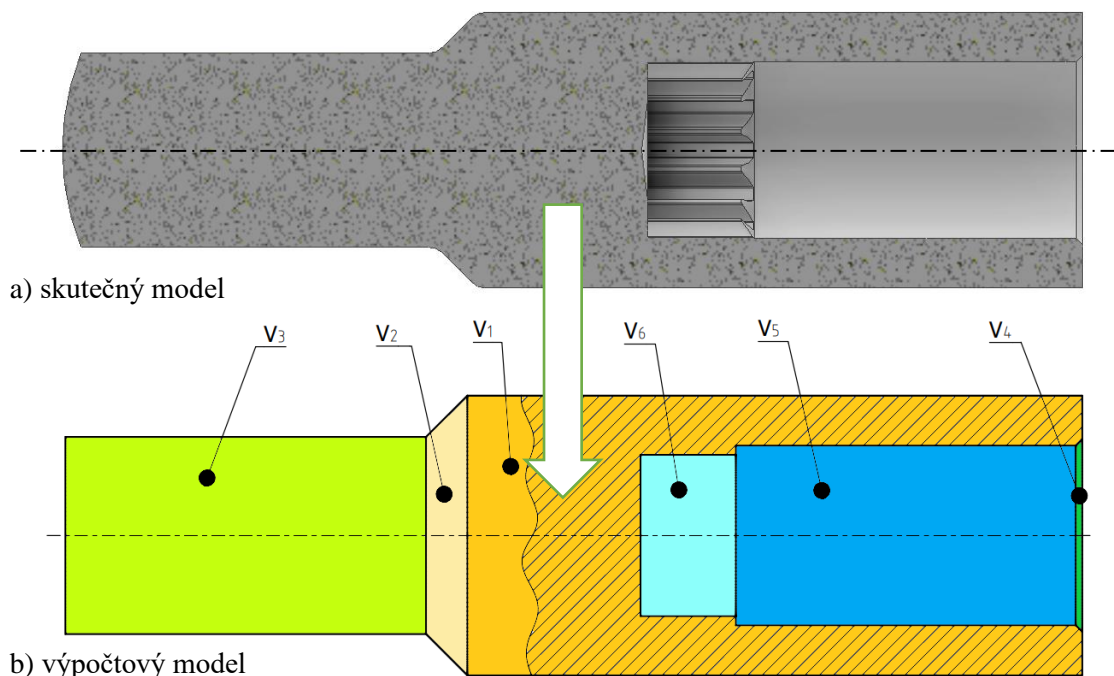
Obr. 37 Poloměr zaoblení dna dutiny.

Vzhledem k tomu, že bude součást následně obráběna, je ve výkresové dokumentaci uveden pouze jeden požadavek na drsnost, a to na vnitřním drážkování, kde je požadována drsnost povrchu Ra 1,6. Dále jsou na výkrese definovány požadavky na rozměrovou a geometrickou přesnost. Při využití zvolené výrobní technologie by mělo být možné všech těchto požadavků dosáhnout. Zadaná výrobní série o ročním objemu 300 000 kusů taktéž vyhovuje navržené výrobní technologii. Pro výrobu bude zvolen jeden z konvenčních lisů (hydraulický nebo mechanický) z aktuálního strojového parku. Důvodem výběru konvenčního lisu je složení strojového parku, kdy firma disponuje pouze jedním automatickým postupovým lisem, a naopak vysokým počtem konvenčních lisů. Také je pravděpodobné, že bude nutné zahrnout do výrobního postupu mezioperační žihání, které je při použití postupových lisů neproveditelné.

Zvoleným materiálem je podle požadavků zákazníka ocel DIN 20CrMo5, která je obecně využívána na více namáhané strojní komponenty jako jsou ozubená kola, spojovací tyče, klikové, vačkové nebo jiné hřídele. Díky svým mechanickým vlastnostem je také vhodná k tváření za studena. Ocel bude nutné před každou operací dostatečně mazat, aby bylo dosaženo co nejnižšího součinitele tření mezi materiálem a nástrojem a nedocházelo k zadírání. Výchozí nakupovaný polotovár bude ve formě tyčí válcovaných za tepla.

3.1 Výpočet objemu a hmotnosti součásti

Při objemovém tváření platí zákon zachování objemu. Proto je, po vypočtení objemu hotové součásti, možné stanovit rozměry výchozího polotovaru. Součást je pro snadnější výpočet nejprve rozdělena na jednoduché geometrické tvary, viz obrázek 38, u kterých se snáze vypočte jejich objem pomocí základních matematických vztahů. Konečný objem součásti je následně určen jako součet těchto dílčích objemů a ověřen pomocí softwaru Autodesk Inventor, ve kterém jsou také vytvořeny modely a výkresy. [3]



Obr. 38 Rozdělení modelu na jednotlivé geometrické tvary.

Pro zjednodušení výpočtu byla zanedbána veškerá zaoblení na součásti a také kuželové dno dutiny, jelikož by tyto části neměly významně ovlivnit výsledný objem součásti. Zároveň byla zjednodušena oblast vnitřního drážkování, která je nahrazena válcovým otvorem o průměru roztečné kružnice drážkování. Použité rozměry pro výpočet objemu jednotlivých částí jsou graficky znázorněny v příloze č. 3. Výpočty objemu dílčích částí jsou následující:

- Objem válcové části o větším průměru V_1 :

$$V_1 = \frac{\pi \cdot D_{V1}^2}{4} \cdot h_{V1} = \frac{\pi \cdot 44^2}{4} \cdot 97 = 147491,492 \text{ mm}^3 \quad (3.1)$$

- Objem kuželové části V_2 :

$$\begin{aligned} V_2 &= \frac{\pi \cdot h_{V2}}{3} \cdot \left[\left(\frac{D_{V1}}{2} \right)^2 + \left(\frac{D_{V1}}{2} \right) \cdot \left(\frac{D_{V3}}{2} \right) + \left(\frac{D_{V3}}{2} \right)^2 \right] = \\ &= \frac{\pi \cdot 6,5}{3} \cdot \left[\left(\frac{44}{2} \right)^2 + \left(\frac{44}{2} \right) \cdot \left(\frac{31}{2} \right) + \left(\frac{31}{2} \right)^2 \right] = 7250,93 \text{ mm}^3 \end{aligned} \quad (3.2)$$

- Objem válcového dřívku V_3 dle (3.1):

$$V_3 = \frac{\pi \cdot D_{V3}^2}{4} \cdot h_{V3} = \frac{\pi \cdot 31^2}{4} \cdot 56,5 = 42644,37 \text{ mm}^3$$

- Objem zkosení u dutiny V_4 podle (3.2):

$$\begin{aligned} V_4 &= \frac{\pi \cdot h_{V4}}{3} \cdot \left[\left(\frac{D_{V4}}{2} \right)^2 + \left(\frac{D_{V4}}{2} \right) \cdot \left(\frac{D_{V5}}{2} \right) + \left(\frac{D_{V5}}{2} \right)^2 \right] = \\ &= \frac{\pi \cdot 1}{3} \cdot \left[\left(\frac{30,3}{2} \right)^2 + \left(\frac{30,3}{2} \right) \cdot \left(\frac{28,3}{2} \right) + \left(\frac{28,3}{2} \right)^2 \right] = 674,52 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

- Objem vnitřní válcové dutiny V_5 dle vztahu (3.1):

$$V_5 = \frac{\pi \cdot D_{V5}^2}{4} \cdot h_{V5} = \frac{\pi \cdot 28,3^2}{4} \cdot 51,5 = 32394,40 \text{ mm}^3$$

- Objem dutiny drážkování V_6 úpravou rovnice (3.1):

$$V_6 = \frac{\pi \cdot D_{V6}^2}{4} \cdot h_{V6} = \frac{\pi \cdot 25,4^2}{4} \cdot 17 = 8614,03 \text{ mm}^3$$

Celkový objem součásti V_C je poté vypočten pomocí rovnice:

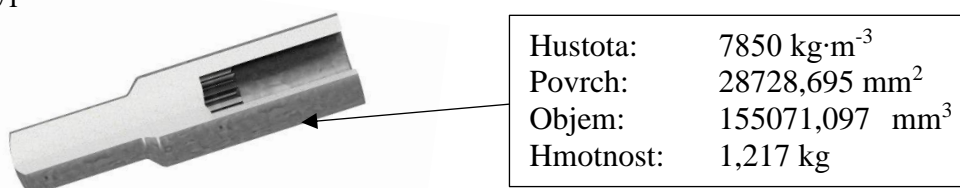
$$\begin{aligned} V_C &= V_1 + V_2 + V_3 - V_4 - V_5 - V_6 = \\ &= 147491,49 + 7250,93 + 42644,37 - 674,52 - 32394,40 - 8614,03 = \\ &= 155703,84 \text{ mm}^3 \end{aligned} \quad (3.3)$$

Následně je možné stanovit hmotnost součásti m :

$$m = V_C \cdot \rho = 155703,84 \cdot 7850 \cdot 10^{-9} = 1,2222 \text{ kg} \quad (3.4)$$

kde: ρ – hustota oceli 20CrMo5; $\rho = 7850 \cdot 10^{-9} \text{ [kg} \cdot \text{mm}^{-3}\text{]}$.

Z důvodu zjednodušení některých tvarů součásti a také zanedbání zaoblení na přechodech mezi průměry je hodnota celkového objemu ověřena pomocí modelu součásti, viz obr. 39, v CAD softwaru Autodesk Inventor. Konečný objem 3D modelu vypočten pomocí programu je $V_C = 155071,097 \text{ mm}^3$. Byla zde také vypočtena hmotnost $m = 1,217 \text{ kg}$. Hodnoty stanovené pomocí programu z 3D modelu součásti jsou přesnější, a proto s nimi bude dále počítáno v dalších výpočtech.



Obr. 39 Model součásti s hodnotami určenými pomocí softwaru Inventor.

3.2 Výroba součásti

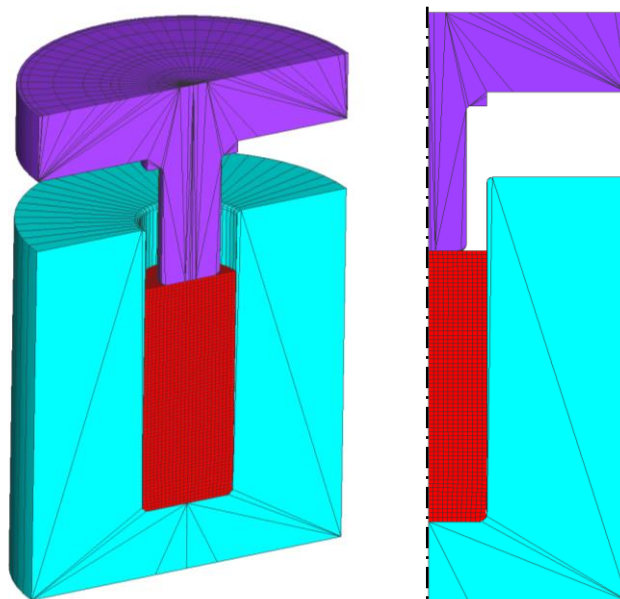
Při navrhování technologického postupu výroby se obecně klade důraz na co nejnižší počet operací, jelikož významně ovlivňují výrobní náklady, především kvůli ceně nástrojů. Dále je vhodné se zaměřit na kontrolu deformací v jednotlivých operacích a snažit se zajistit, aby jejich rozložení v dílčích částech součásti bylo co nejvíce rovnoměrné. Zároveň je třeba posoudit, zda bude nutné provádět mezioperační žíhání pro obnovení tvařitelnosti materiálu.

Postup výroby součásti začíná už při dělení polotovaru z hutní tyče o průměru 42 mm pomocí kotoučové pily AMADA CM 65 (obr. 40). Dále dojde k postupnému odmaštění, vytvoření fosfátové vrstvy na povrchu polotovaru a nanesení maziva ve formě mýdlového roztoku. Následně přichází na řadu samotné tváření součásti, které je možné provádět podle různých postupů.



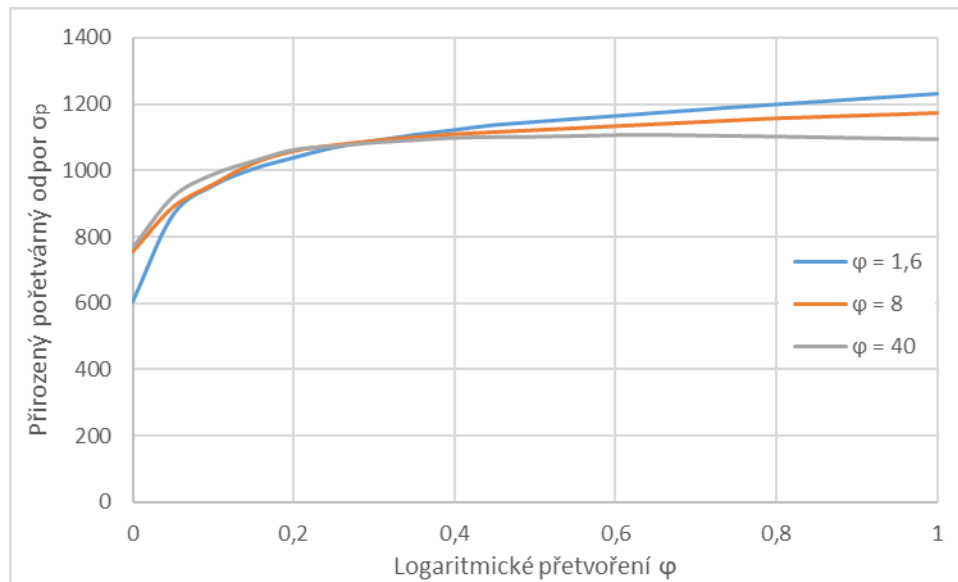
Obr. 40 Kotoučová pila AMADA CM 65

Po posouzení zadané součásti byly navrženy tři základní postupy tváření součásti. U všech variant nejprve dojde ke zpěchování uříznutého polotovaru na špalík o daných rozměrech. Následně proběhne protlačování hrubého tvaru součásti v dalších dvou nebo třech operacích. Poslední operace je vždy zaměřena pouze na vytvoření vnitřního drážkování. Aby bylo možné zhodnotit vyrobiteľnost součásti pomocí jednotlivých variant, je vhodné tyto metody podrobit numerické simulaci (obr. 41), pro které byl zvolen program Simufact Forming.



Obr. 41 Příklad zjednodušeného nástroje pro numerickou simulaci.

Pro výpočty i simulace je předpokládán model tření podle Coulomba s konstantním koeficientem. Zároveň bude pro zjednodušení simulace využito neděleného nástroje (obr. 41), který bude uvažován jako naprosto tuhý. Materiálový model polotovaru je zvolen z knihovny softwaru Simufact Forming 2023.4 a bude použit jak pro simulace, tak pro ruční výpočty uvedené v praktické části práce. Křivky zpevnění zadaného materiálu pro různé rychlosti deformace se nachází na obrázku 42.

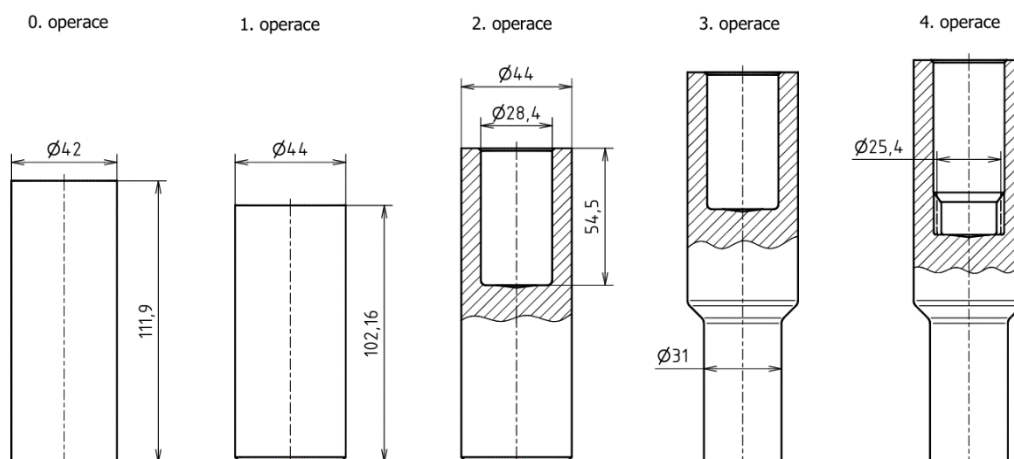


Obr. 42 Křivky zpevnění pro materiál 20CrMo5.

Po tváření zůstávají na součásti různé zbytky fosfátů a maziva, které byly postupně nanášeny na povrch součásti před každou výrobní operací. Zákazník však nepožaduje žádné očištění dílce ani další provedení povrchových úprav. Proto bude výrobek po zhotovení přímo balen a expedován se zbytky fosfátů a maziva.

3.2.1 Varianta výroby A

První varianta výroby „A“ se skládá ze čtyř tvářecích operací, viz obr. 43, kdy nultá operace zahrnuje uříznutí polotovaru o průměru 42 mm a délce 111,9 mm pomocí kotoučové pily. V další operaci dojde k zarovnání čel polotovaru a napěchování na vnější průměr součásti 44 mm. Poté dojde ke zpětnému protlačení válcové dutiny o průměru 28,4 mm, a následně dopřednému protlačení vnějšího průměru 31 mm. Nakonec nastane zpětné protlačování vnitřního drážkování a kalibrace rozměrů dílce.



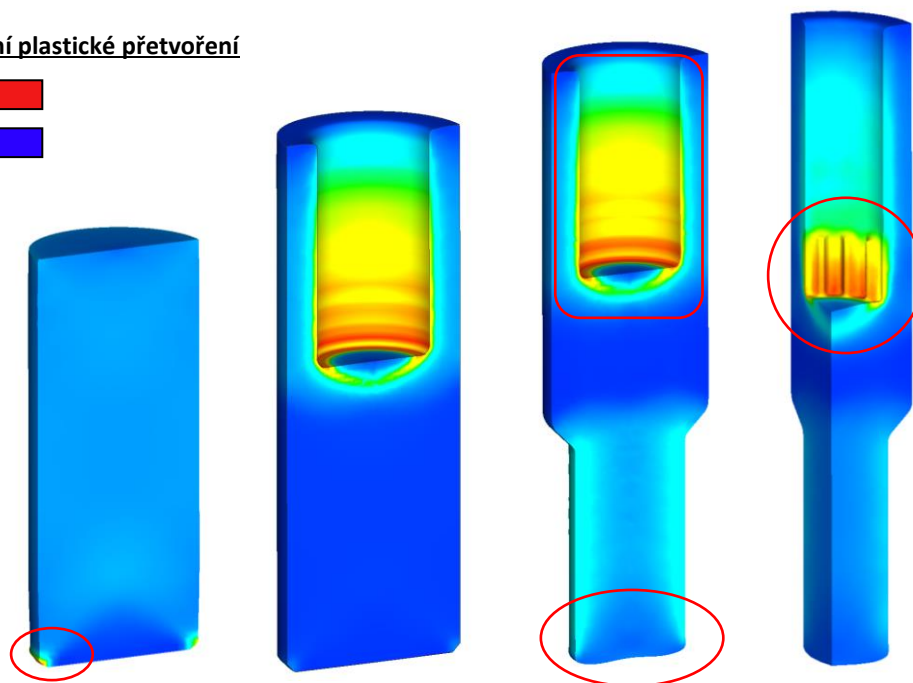
Obr. 43 Postup výroby (varianta A).

Z numerické simulace je patrné, že k největší deformaci dochází především při protlačování dutiny a drážkování, viz obrázek 44. Při dopředném protlačování dojde k mírnému zvlnění čela, které je však kalibrováno v poslední operaci, proto jej není nutné brát jako defekt. V první operaci dojde ke zárodku malé přeložky, ta je však opět deformována v dalších operacích a nedojde ke vzniku přeložky jako takové.

Efektivní plastické přetvoření

max: 

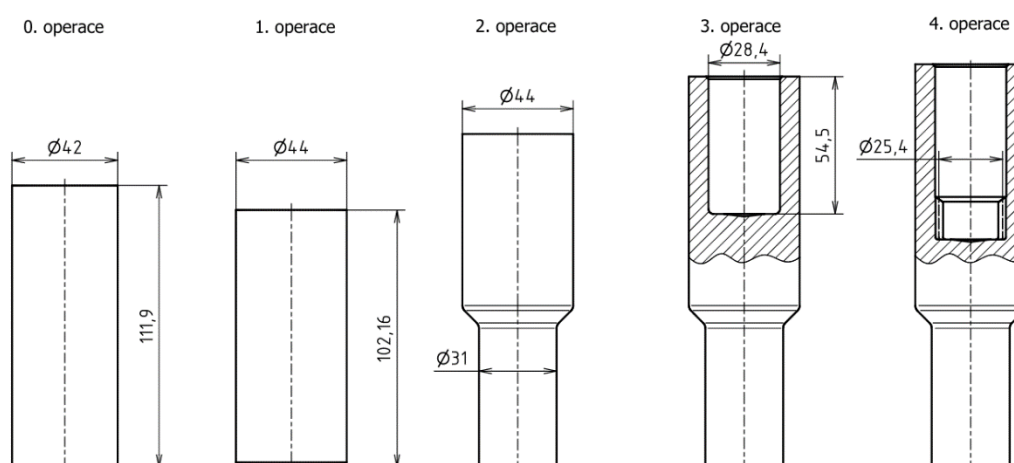
min: 



Obr. 44 Numerická simulace (varianta A).

3.2.2 Varianta výroby B

Varianta výroby „B“ se rovněž skládá ze čtyř tvářecích operací, viz obrázek 45. Po napěchování výchozího špalíku dojde v další operaci k dopřednému protlačení užší části hřídele o průměru 31 mm, a následně ke zpětnému protlačení vnitřní dutiny o průměru 28,4 mm. Nakonec bude provedeno zpětné protlačování vnitřního drážkování a kalibrace.

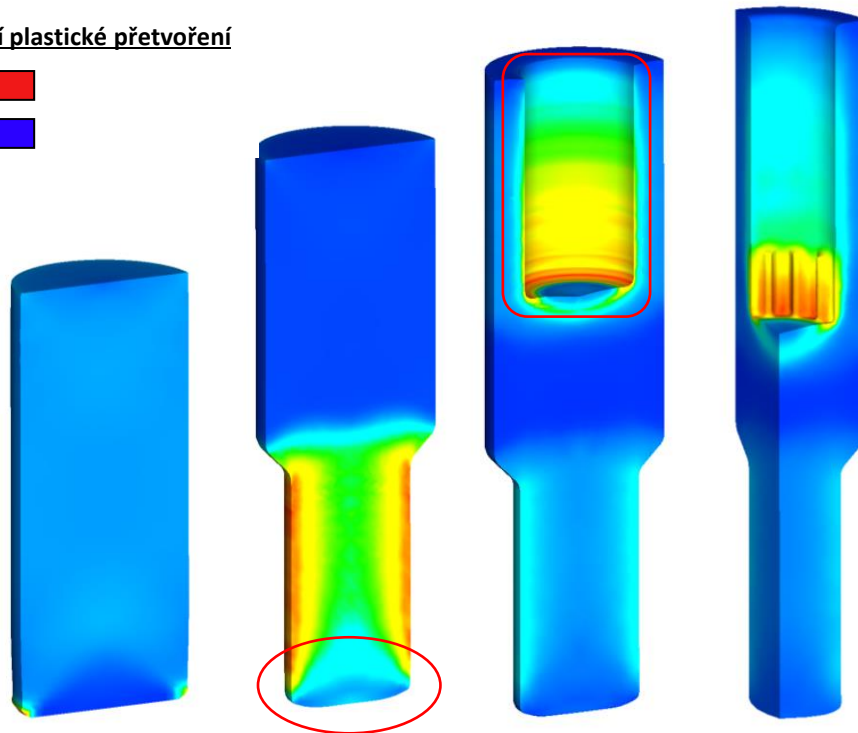


Obr. 45 Postup výroby (varianta B).

Numerická simulace této varianty prokázala kvalitnější protlačení dřívku, především nedochází k tak velkému zvlnění čela dřívku. Zároveň při protlačování vnitřní dutiny nedochází k tak výraznému přetvoření jako v první variantě, viz obr. 46. Simulace poslední operace dopadla obdobně jako ve variantě A, tedy největší přetvoření na bocích drážek.

Efektivní plastické přetvoření

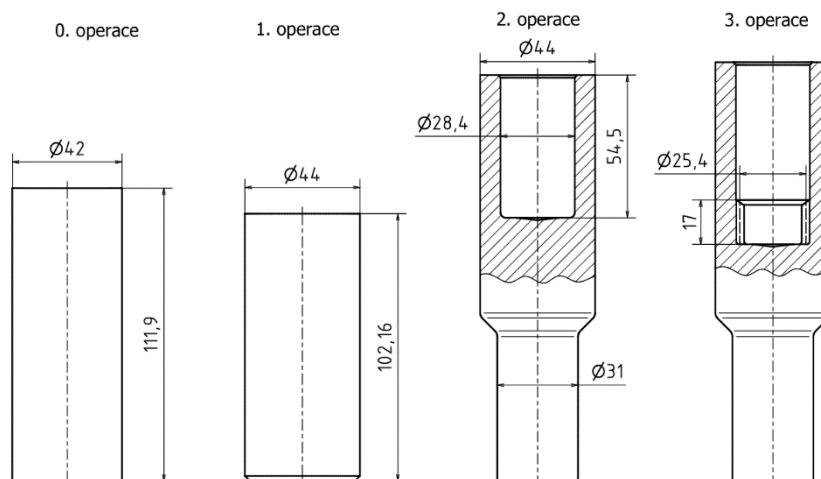
 max: ■

 min: ■


Obr. 46 Přetvoření z numerické simulace.

3.2.3 Varianta výroby C

Varianta „C“ vychází z předchozí varianty a využívá kombinovaného protlačování, kdy dojde v jedné operaci zároveň k dopřednému protlačení užší části hřídele o průměru 31 mm i ke zpětnému protlačení vnitřní dutiny o průměru 28,4 mm. V poslední operaci bude opět zpětně protlačeno vnitřní drážkování a kalibrovány rozměry protlačku. Pomocí této metody dojde ke zkrácení výroby pouze na tři výrobní operace, viz obrázek 47, čímž se zvýší efektivita výroby.

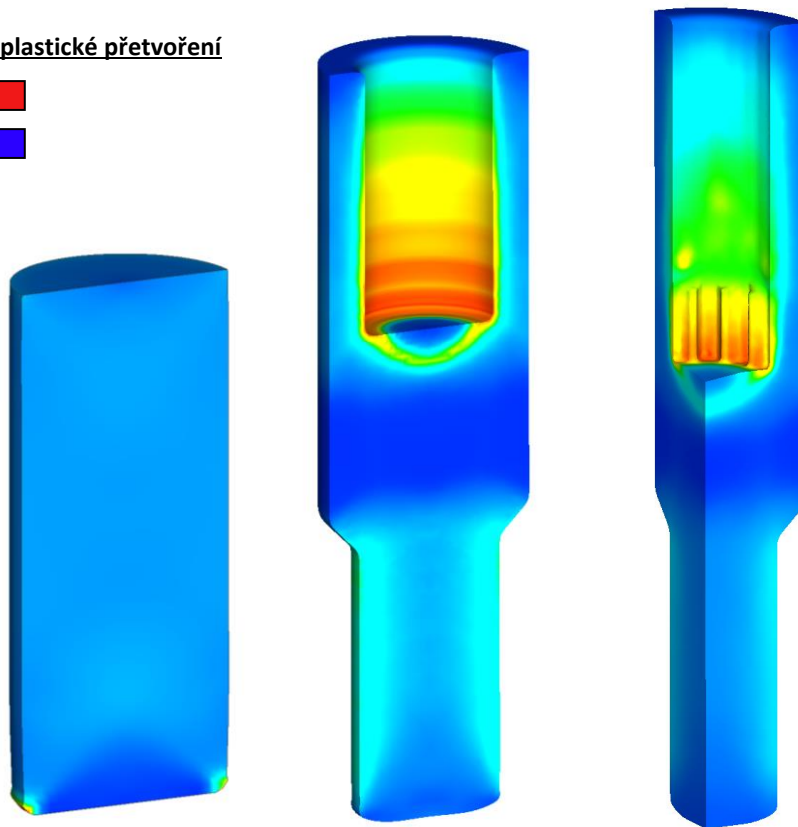


Obr. 47 Postup výroby (varianta C).

Numerickou simulací varianty C byly prokázány obdobné efekty jako u předešlých metod. Největšího přetvoření je opět dosaženo v dutině, a především v oblasti drážkování, což je zřejmé z obrázku 48. Ve druhé operaci, kde je využito kombinovaného protlačování nedojde ke vzniku přeložek, ani jiných významných defektů. Zároveň se také prokázalo, že je možné výrobu provést ve třech výrobních operacích. Proto byla pro výrobu součástí zvolena tato varianta a byly pro ni provedeny podrobné technologické výpočty a návrh nástrojů.

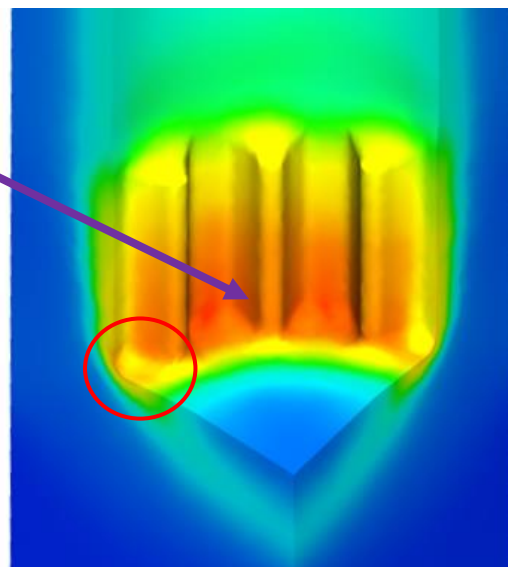
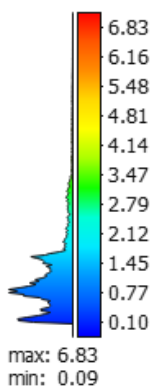
Efektivní plastické přetvoření

 max: 

 min: 


Obr. 48 Numerická simulace (varianta C).

Při bližším pohledu je patrné, že nejvyšších hodnot deformace je opravdu dosaženo v drážkování, resp. v zaoblení na dně dutiny a na bocích vytvořených zubů, viz obr. 49. Zároveň je možné pozorovat správné protlačení zubů až k výběhu do válcového tvaru. Zde se také objevuje jediná oblast, kterou by bylo možné považovat za defekt, a to počátek vzniku malé přeložky. Tento defekt byl postupně zmírněn změnou geometrie průtlačníku v předešlé operaci, kde byl průměr dutiny zvětšen o 0,1 mm. Po smrštění dutiny vlivem tepelné dilatace materiálu, je zde dosaženo dostatečného prostoru, aby nedocházelo k „hrnutí“ materiálu hranou průtlačníku na přechodu drážkování do válcového tvaru. Průměr dutiny se zkalibruje v poslední operaci na požadovaný rozměr

Efektivní plastické přetvoření


Obr. 49 Numerická simulace – drážkování.

3.3 Výpočet rozměrů součásti v jednotlivých operacích

Pro ruční výpočet rozměrů dílce v jednotlivých operacích se opět vychází ze zjednodušeného modelu použitého pro výpočet objemu součásti, kde jsou zanedbána zaoblení na přechodu mezi vnějšími průměry. Dále je zde opět objem drážkované dutiny nahrazen objemem válce o průměru roztečné kružnice. Pro ověření vypočtených hodnot byl také pro každou operaci vytvořen model protlačku v programu Autodesk Inventor, kde je vždy ověřen objem součásti a nejsou zde provedena žádná zanedbání geometrických částí hřídele.

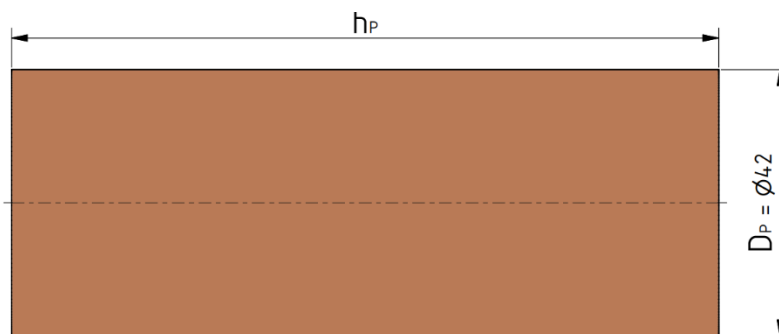
Přesné rozměry dílce v každé operaci jsou vypočteny s využitím zákona zachování objemu, díky kterému je uvažováno, že je objem materiálu v každé operaci totožný. Proto je možné vycházet ze vztahu pro výpočet objemu polotovaru s využitím rovnice (3.1):

$$V_P = V_C = \frac{\pi \cdot D_P^2}{4} \cdot h_P,$$

kde: h_P – výška polotovaru [mm],
 D_P – průměr polotovaru [mm].

Úpravou vztahu je možné vyjádřit výšku výchozího polotovaru h_P (obr. 50):

$$h_P = \frac{4 \cdot V_C}{\pi \cdot D_P^2} = \frac{4 \cdot 155071,097}{\pi \cdot 42^2} = 111,93 \text{ mm}$$



Obr. 50 Rozměry polotovaru.

Výška polotovar uříznutého z tyče o průměru 42 mm byla tedy vypočtena na 111,93 mm.

V první operaci dojde ke zpěchování polotovaru na špalík se sražením spodního čela. Objem polotovaru je zde možné vyjádřit vztahem:

$$V_{P1} = V_C = \frac{\pi \cdot h_S}{3} \cdot \left[\left(\frac{D_{V1}}{2} \right)^2 + \left(\frac{D_{V1}}{2} \right) \cdot \left(\frac{D_{S1}}{2} \right) + \left(\frac{D_{S1}}{2} \right)^2 \right] + \frac{\pi \cdot D_{P1}^2}{4} \cdot h_1, \quad (3.5)$$

kde: h_S – výška sražení čela [mm],
 h_{P1} – výška válcové části v první operaci [mm],
 D_{P1} – vnější průměr součásti v první operaci [mm],
 D_{S1} – průměr sražení na čele [mm].

Výška zbývající válcové části nad sražením h_{P1} , viz obrázek 51, je pak rovna:

$$\begin{aligned} h_{P1} &= \frac{V_C - \frac{\pi \cdot h_S}{3} \cdot \left[\left(\frac{D_{V1}}{2} \right)^2 + \left(\frac{D_{V1}}{2} \right) \cdot \left(\frac{D_{S1}}{2} \right) + \left(\frac{D_{S1}}{2} \right)^2 \right]}{\frac{\pi \cdot D_{P1}^2}{4}} = \\ &= \frac{155071,097 - \frac{\pi \cdot 2}{3} \cdot \left[\left(\frac{44}{2} \right)^2 + \left(\frac{44}{2} \right) \cdot \left(\frac{40}{2} \right) + \left(\frac{40}{2} \right)^2 \right]}{\frac{\pi \cdot 44^2}{4}} = 100,16 \text{ mm} \end{aligned}$$

Celková výška polotovaru v první operaci i se sražením je tedy stanovena na 102,16 mm.



Obr. 51 Rozměry polotovaru v první operaci.

Při stanovení rozměrů součásti v druhé operaci se vychází z předpokladu, že celkový objem součásti je roven součtu objemů dílčích částí uvedených v obrázku 52, které byly vypočteny pomocí tabulkového programu Excel:

$$V_{P2} = V_C = V_3 + V_2 + (V_{V2} - V_4 - V_5) + V_{Z2}, \quad (3.6)$$

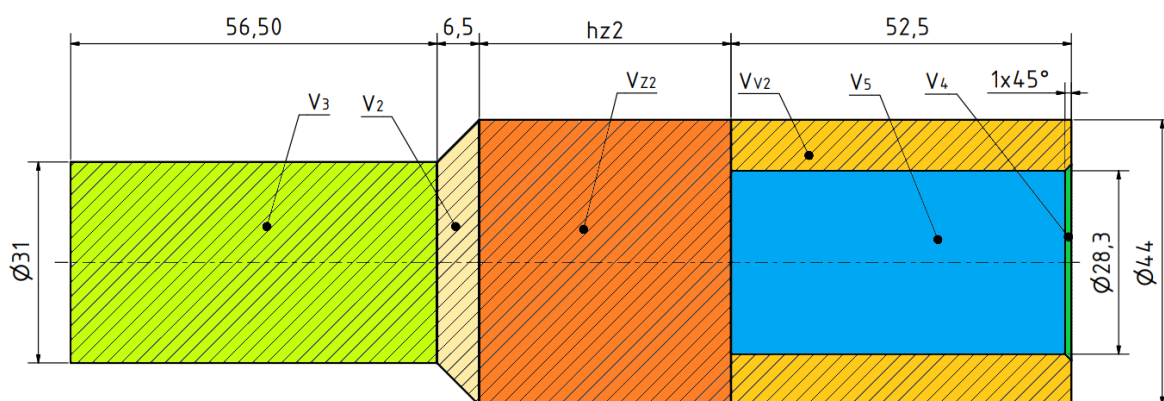
kde: V_{V2} – objem válcové části o výšce dutiny; vypočten na 79827,87 mm³,

V_{Z2} – objem zbývající válcové části [mm³].

Z této rovnice bylo následně možné vyjádřit objem zbývající válcové části a vypočíst jeho výšku h_{z2} s využitím rovnice (3.1):

$$\begin{aligned} h_{z2} &= \frac{V_{Z2}}{\frac{\pi \cdot D_1^2}{4}} = \frac{V_C - [V_3 + V_2 + (V_{V2} - V_4 - V_5)]}{\frac{\pi \cdot D_1^2}{4}} = \\ &= \frac{155071,097 - [42644,37 + 7250,93 + (79827,87 - 674,52 - 32394,4)]}{\frac{\pi \cdot 44^2}{4}} = \\ &= 38,419 \text{ mm} \end{aligned}$$

Výška zbývající plné části hřídele byla následně zaokrouhlena na 38,42 mm.



Obr. 52 Rozměry součásti ve druhé operaci.

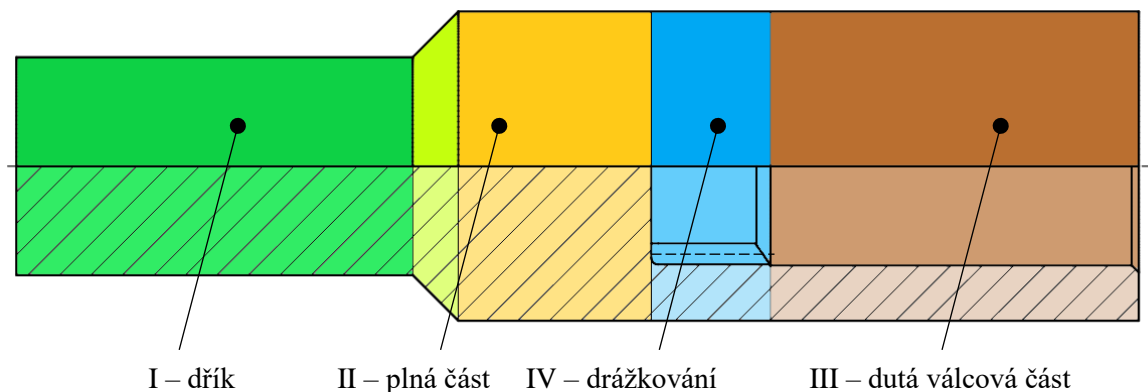
Tento výsledek však může být díky zjednodušení součásti značně nepřesný, proto byl vytvořen model dílce v dané operaci a vypočtena výška zbývající válcové části h_{z2} . Porovnání ručně vypočtených hodnot vypočtených z modelu součásti je uvedeno v tabulce 4. Kde je možné pozorovat velký rozdíl mezi hodnotami, ke kterému dochází z důvodu zanedbání zaoblení všech hran při ručním výpočtu. Pro další výpočty i následný návrh tvářecích nástrojů proto byly použity hodnoty vypočtené z CAD modelů součásti v jednotlivých operacích.

Tab. 4 Porovnání vypočtených hodnot a hodnot za CAD softwaru.

Rozměr	Výpočet	CAD model	Zaokrouhlo
Výška h_{z2} [mm]	38,419	36,319	36,32

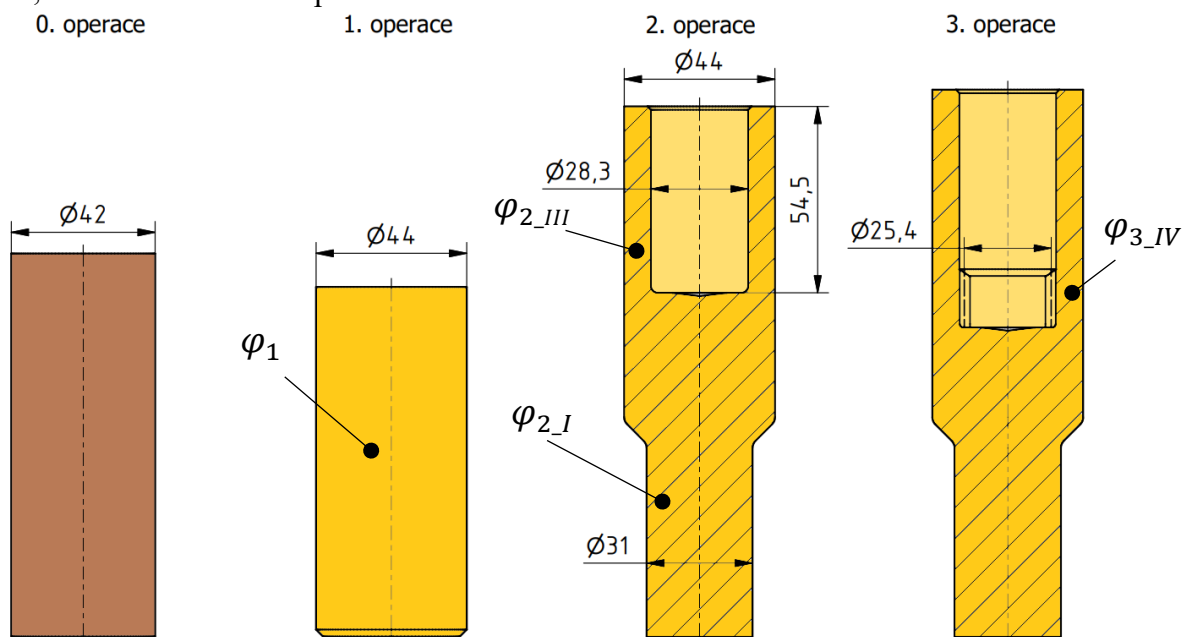
3.4 Výpočet přetvoření a rychlosti deformace

Pro pokračování v technologických výpočtech je nutné nejprve vypočítat logaritmická přetvoření, kterých bude dosaženo v dílčích částech součásti v daných operacích. Pro správné provedení výpočtu je nejdříve nutné rozdělit součást na několik základních částí (obr. 53). Následně se provede výpočet dílčích přetvoření v jednotlivých operacích a jejich součtem bude stanoveno přetvoření součásti v na konci výroby.



Obr. 53 Rozdělení hřídele pro výpočet přetvoření.

Bylo provedeno několik zjednodušení modelu pro výpočet deformací, obdobně jako pro výpočet objemu součásti. Jedná se zejména o zanedbání zaoblení a nahrazení dutiny drážkování válcovou dutinou o průměru roztečné kružnice 25,4 mm. Na obrázku 54 jsou popsány dílčí oblasti přetvoření, které budou dále počítány. Indexy přetvoření odpovídají dané operaci a části hřídele, kde daná deformace působí.



Obr. 54 Popis logaritmických přetvoření v jednotlivých operacích.

Následně byly provedeny výpočty logaritmického přetvoření průřezu v uvedených oblastech, kdy se vždy vychází ze změny průřezu každé části v dané operaci.

Logaritmické přetvoření průřezu při pěchování v první operaci se vypočte pomocí vzorce (2.2):

$$\varphi_1 = \ln\left(\frac{S_0}{S_1}\right) = \ln\left(\frac{D_{V1}^2}{D_P^2}\right) = \ln\left(\frac{44^2}{42^2}\right) = -0,09304$$

Ve druhé operaci dojde k dopřednému protlačení dříku s logaritmickým přetvořením, které se vypočte pomocí vzorce (2.2):

$$\varphi_{2_I} = \ln\left(\frac{S_1}{S_{2_I}}\right) = \ln\left(\frac{D_{V1}^2}{D_{V3}^2}\right) = \ln\left(\frac{44^2}{31^2}\right) = 0,7004$$

Zároveň je zpětně protlačena vnitřní dutina hřídele, kde se logaritmické přetvoření vypočte dle vzorce (2.6):

$$\varphi_{2_{III}} = \ln\left(\frac{S_1}{S_1 - S_5}\right) = \ln\left(\frac{D_{V1}^2}{D_{V1}^2 - D_{V5}^2}\right) = \ln\left(\frac{44^2}{44^2 - 28,3^2}\right) = 0,5339$$

V poslední operaci je zpětně protlačena dutina drážkování, jejíž průřez je pro zjednodušení nahrazen kruhovým průřezem o průměru roztečné kružnice a logaritmické přetvoření se zde vypočte dle vztahu (2.6):

$$\varphi_{3_{IV}} = \ln\left(\frac{S_1}{S_1 - S_6}\right) = \ln\left(\frac{D_{V1}^2}{D_{V1}^2 - D_{V6}^2}\right) = \ln\left(\frac{44^2}{44^2 - 25,4^2}\right) = 0,40533$$

Celkové přetvoření dílčích částí hřídele během celého tvářecího procesu je dále vypočteno součtem absolutních hodnot deformací vzniklých v jednotlivých operacích:

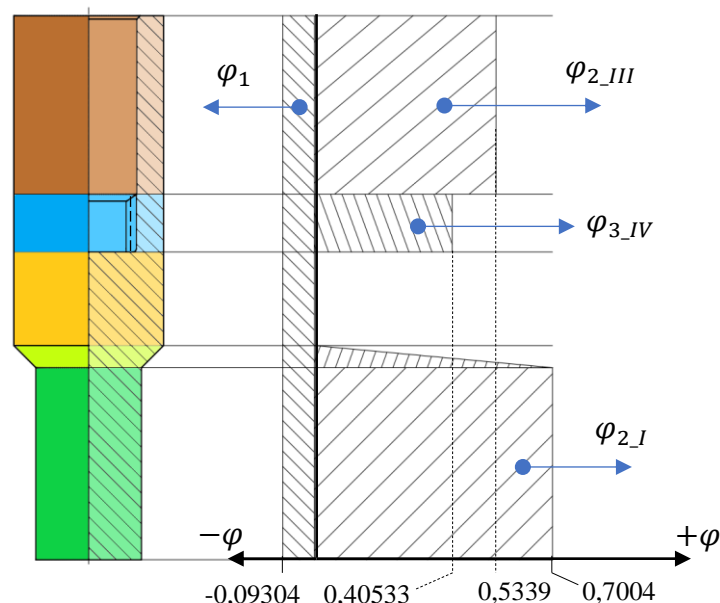
$$\varphi_{C_I} = |\varphi_1| + |\varphi_{2_I}| = |-0,09304| + 0,7004 = 0,793445 \quad (3.7)$$

$$\varphi_{C_{II}} = |\varphi_1| = |-0,09304| = 0,09304 \quad (3.8)$$

$$\varphi_{C_{III}} = |\varphi_1| + |\varphi_{2_{III}}| = |-0,09304| + 0,5339 = 0,626934 \quad (3.9)$$

$$\varphi_{C_{IV}} = |\varphi_1| + |\varphi_{3_{IV}}| = |-0,09304| + 0,40533 = 0,49837 \quad (3.10)$$

Vypočtené výsledky jsou graficky znázorněny na obrázku 55, kde jsou vynesena jednotlivá přetvoření v dílčích částech hřídele. Z provedených výpočtů je patrné, že největšího přetvoření je dosaženo v oblasti dříku. K menšímu přetvoření dojde v oblasti válcové dutiny a dutiny drážkování. Nejmenšího přetvoření, a tedy i zpevnění, je dosaženo v plně válcové části, kde došlo pouze k napěchování v první operaci.



Obr. 55 Rozložení přetvoření po délce hřídele.

Znalost rychlosti deformace je nutná především pro rychloběžné tvářecí stroje, a zejména tvářecí automaty, kdy se dosahuje vysokých rychlostí a tím dochází i k většímu zpevnování materiálu. V tomto případě bude výroba probíhat na některém z dostupných strojů firmy, která disponuje jak mechanickými, tak hydraulickými lisy. Pro výpočet rychlosti deformace se nyní bude předpokládat, že bude výroba probíhat na hydraulickém lisu SMG HZPU 320, jehož technické parametry jsou uvedeny v příloze 4. Jelikož se jedná o hydraulický lis, předpokládá se, že rychlost pohybu nástroje je v průběhu tváření konstantní $v_n = 65 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Stejných parametrů bylo využito pro numerické simulace tváření pomocí programu Simufact Forming, aby bylo možné srovnat vypočtené hodnoty s těmi získanými simulací. Pro zjednodušení výpočtů jsou složitější operace rozděleny na více základních tvářecích operací. Výpočet osových rychlostí dílčích částí se provede následovně [45]:

- První operace zpěchování k zarovnání čel:

$$\dot{\varphi}_{1_p\acute{e}ch} = \frac{v_n}{h_p} = \frac{65}{111,93} = 0,58073 \text{ s}^{-1} \quad (3.11)$$

- Druhá operace dopředné protlačení dřívku:

$$\dot{\varphi}_{2_dop\acute{r}} = 2 \cdot v_n \cdot \frac{R_{p1}^2}{R_{p2_1}^3} \cdot \tan \alpha = 2 \cdot 65 \cdot \frac{44^2}{31^3} \cdot \tan 45^\circ = 13,6842 \text{ s}^{-1} \quad (3.12)$$

kde: R_{p1} – poloměr protlačku po první operaci [mm],

R_{p2_1} – poloměr protlačeného dřívku ve druhé operaci [mm].

- Druhá operace zpětné protlačení válcové dutiny:

$$\dot{\varphi}_{2_zp\acute{e}t} = \frac{v_n}{R_{p2} \cdot \tan \alpha_p + b_2} = \frac{65}{14,15 \cdot \tan 7^\circ + 36,09} = 1,34245 \text{ s}^{-1} \quad (3.13)$$

kde: α_p – úhel zkosení čela průtlačníku [°],

b_2 – tloušťka dna protlačku ve druhé operaci [mm],

R_{p2} – poloměr válcové dutiny protlačku ve druhé operaci [mm].

- Třetí operace zpětné protlačení drážkované dutiny dle (3.13):

$$\dot{\varphi}_{3_zp\acute{e}t} = \frac{v_n}{R_{p3} \cdot \tan \alpha_p + b_3} = \frac{65}{12,7 \cdot \tan 7^\circ + 26} = 1,753563 \text{ s}^{-1}$$

kde: b_3 – tloušťka dna protlačku ve třetí operaci [mm],

R_{p3} – poloměr drážkované dutiny ve třetí operaci [mm].

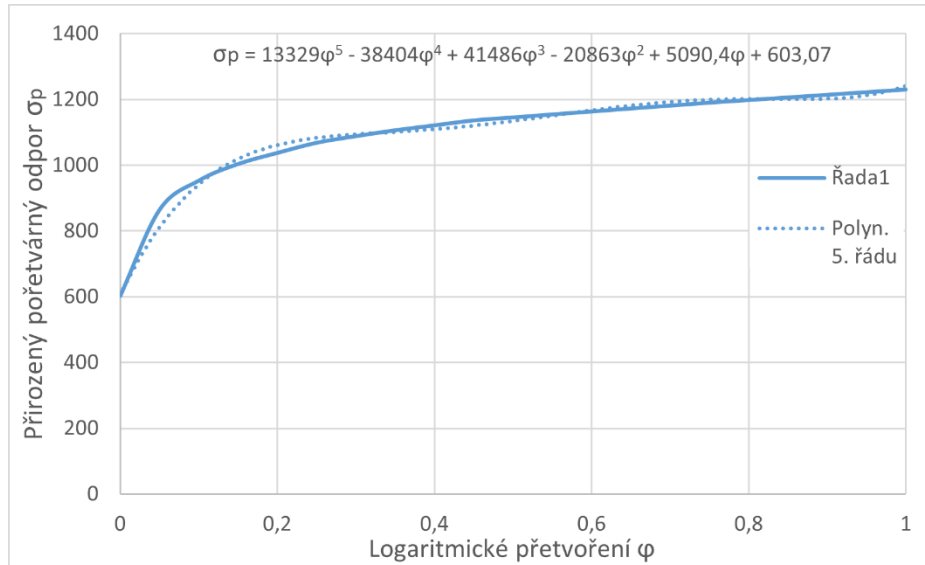
Pro výpočet rychlosti přetvoření ve třetí operaci, kdy se zpětně protlačuje vnitřní drážkování bylo opět nutné nahradit složitý profil drážkování válcovou dutinou o průměru roztečné kružnice. Zde je výpočet opravdu orientační, jelikož v každém místě drážkování je jiný poloměr od osy hřídele, rychlost deformace bude také v každém místě odlišná. Nejvyšší rychlost přetvoření byla vypočtena při dopředném protlačování dřívku, kdy se rychlost postupně zvyšuje se zužujícím se průměrem kuželové části průtlačnice.

3.5 Odpor, síly a práce

Výpočet přetvárných odporů je nutný především pro správnou volbu tvářecího stroje a také dimenzování výrobních nástrojů. Dále je možné z nich vypočíst potřebné síly pro tváření polotovaru v jednotlivých operacích, které jsou primárním faktorem pro volbu stroje podle jeho jmenovité síly. Nedílným faktorem pro volbu tvářecího stroje je také přetvárná práce, kterou je nutné porovnat s výkonem zvoleného lisu.

Pro stanovení přirozeného přetvárného odporu je využit materiálový model z databáze simulačního programu Simufact Forming, kdy z možných křivek zpevnění dostupných pro tento materiál byla zvolena křivka pro rychlost deformace $1,6 \text{ s}^{-1}$. Tato rychlost zhruba

odpovídá již vypočteným rychlostem přetvoření. Pro křivku byla provedena aproximace pomocí polynomu pátého řádu (3.14), viz obrázek 56, aby bylo možné provedení analytického výpočtu dosazením přetvoření v daných oblastech součásti. Obdobně jako při výpočtech přetvoření a rychlostí deformace je i při výpočtech deformačních odporů využito zjednodušení tvaru součásti z důvodu usnadnění výpočtu. Především se jedná opět o drážkovou dutinu, která je uvažována jako kruhová o průměru 25,4 mm. Vypočtené hodnoty budou následně porovnány s hodnotami získanými pomocí numerické simulace v programu Simufact Forming.



Obr. 56 Aproximace křivky zpevnění.

Aproximace křivky zpevnění pomocí polynomu pátého řádu:

$$\sigma_p = 13329 \cdot \varphi^5 - 38404 \cdot \varphi^4 + 41486 \cdot \varphi^3 - 20863 \cdot \varphi^2 + 5090,4 \cdot \varphi + 603,07. \quad (3.14)$$

Pro stanovení jednotlivých veličin je výpočet rozdělen pro základní části výroby:

- První operace – předpěchování polotovaru:

Přirozený počtvárný odpor po dosazení do (3.14):

$$\begin{aligned} \sigma_{p1} &= 13329 \cdot \varphi_1^5 - 38404 \cdot \varphi_1^4 + 41486 \cdot \varphi_1^3 - 20863 \cdot \varphi_1^2 + 5090,4 \cdot \varphi_1 + 603,07 \\ &= 13329 \cdot 0,793445^5 - 38404 \cdot 0,793445^4 + 41486 \cdot 0,793445^3 - \\ &\quad - 20863 \cdot 0,793445^2 + 5090,4 \cdot 0,793445 + 603,07 = 926,709 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Přirozený počtvárný odpor v první operaci byl zaokrouhlen na 926,71 MPa.

Deformační odpor při pěchování dle rovnice (2.8):

$$\sigma_{d1} = \sigma_{p1} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot D_{V1}}{h_{P2}} \right) = 926,71 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,08 \cdot 44}{102,16} \right) = 937,37 \text{ MPa}$$

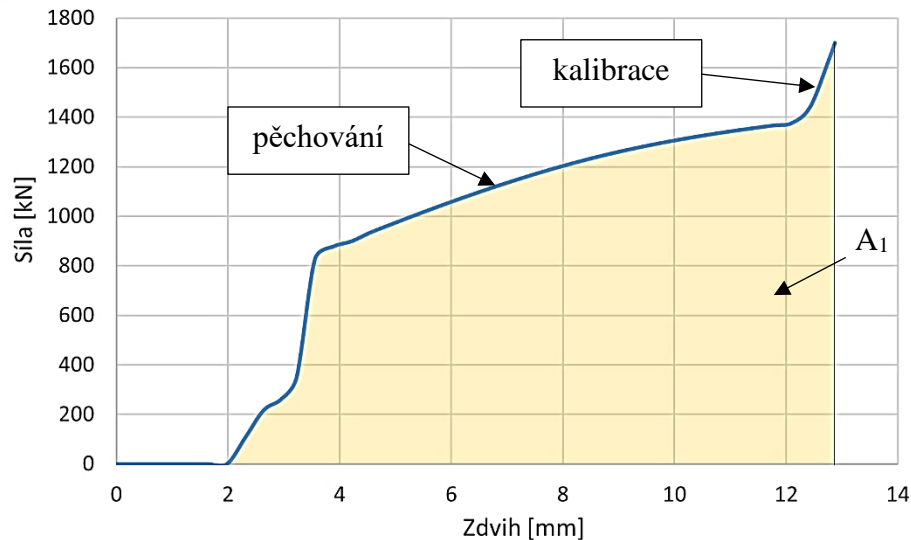
Deformační odpor pro pěchování v první operaci vyšel 937,37 MPa, dále bude počítáno se zaokrouhlenou hodnotou 937,4 MPa.

Přetvárná síla potřebná k předpěchování polotovaru je vypočtena dle rovnice (2.12):

$$\begin{aligned} F_1 &= \sigma_{d1} \cdot S_1 = \sigma_{d1} \cdot \frac{\pi \cdot D_{V1}^2}{4} = \\ &= 937,4 \cdot \frac{\pi \cdot 44^2}{4} = 1\,425\,301,68 \text{ N} \end{aligned}$$

Výsledná přetvárná síla v první tvářecí operaci byla vypočtena na 1425,3 kN.

V první operaci dojde k napěchování polotvaru a vytvoření malého sražení pro lepší vkládání výlisku do nástroje v další operaci. Toto sražení může ovlivňovat velikost síly, resp. zdůvodnit rozdíl mezi vypočtenou silou a silou z numerické simulace $F_{S1} = 1699,3 \text{ kN}$, viz obrázek 57. Prudký nárůst síly v konečné části je způsoben probíhající kalibrací součásti na přesné rozměry, kterou však analytický výpočet nezahrnuje. Byla také získána hodnota přetvárné práce ze simulace, která je zároveň rovna ploše pod křivkou přetvárné síly, o velikosti $A_1 = 11\,518,6 \text{ J}$.



Obr. 57 Průběh tvářecí síly v první operaci.

- Druhá operace – dopředné protlačování dříku:

Přirozený přetvárný odpor dle rovnice (3.14):

$$\begin{aligned} \sigma_{p2,I} &= 13329 \cdot \varphi_{C,I}^5 - 38404 \cdot \varphi_{C,I}^4 + 41486 \cdot \varphi_{C,I}^3 - 20863 \cdot \varphi_{C,I}^2 + 5090,4 \\ &\quad \cdot \varphi_{C,I} + 603,07 \\ &= 13329 \cdot 0,793445^5 - 38404 \cdot 0,793445^4 + 41486 \cdot 0,793445^3 - \\ &\quad - 20863 \cdot 0,793445^2 + 5090,4 \cdot 0,793445 + 603,07 = 1201,187 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Přirozený přetvárný odpor ve druhé operaci při protlačení dříku byl pro další výpočty zaokrouhlen na 1201,2 MPa.

Deformační odpor při dopředném protlačování dle rovnice (2.10):

$$\begin{aligned} \sigma_{d2,I} &= \sigma_{ps2,I} \cdot \left[\left(1 + \frac{f}{\hat{\alpha}} \right) \cdot \ln \left(\frac{D_{V1}}{D_{V3}} \right)^2 + \frac{2}{3} \cdot \hat{\alpha} \right] + 4 \cdot f \cdot \frac{h_o}{D_{V3}} \cdot \sigma_{ps2,I} + 4 \cdot f \cdot \frac{h_{V1}}{D_{V1}} \\ &\quad \cdot \sigma_{p1} \\ &= 1063,95 \cdot \left[\left(1 + \frac{0,08}{0,785} \right) \cdot \ln \left(\frac{44}{31} \right)^2 + \frac{2}{3} \cdot 0,785 \right] + 4 \cdot 0,08 \cdot \frac{3}{31} \\ &\quad \cdot 1063,95 + 4 \cdot 0,08 \cdot \frac{97}{44} \cdot 926,71 = 2053,898 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\text{kde: } \hat{\alpha} - \text{vrcholový úhel redukčního kužele; } \hat{\alpha} = \frac{\pi \cdot 45}{180} = 0,785 \text{ rad,} \quad (3.15)$$

h_o – výška oka průtlačnice [mm],

$\sigma_{ps2,I}$ – střední hodnota přirozeného přetvárného odporu:

$$\sigma_{ps2,I} = \frac{\sigma_{p1} + \sigma_{p2,I}}{2} = \frac{926,71 + 1201,2}{2} = 1063,95 \text{ MPa} \quad (3.16)$$

Vypočtený deformační odpor pro dopředné protlačení dříku ve druhé operaci byl pro další výpočty zaokrouhlen na hodnotu 2053,9 MPa.

Přetvárná síla potřebná k dopřednému protlačení je vypočtena dle rovnice (2.12):

$$\begin{aligned} F_{2_I} &= \sigma_{d2_I} \cdot S_1 = \sigma_{d2_I} \cdot \frac{\pi \cdot D_{V1}^2}{4} = \\ &= 2053,9 \cdot \frac{\pi \cdot 44^2}{4} = 3\,123\,015,241 \text{ N} \end{aligned}$$

Výsledná přetvárná síla v první tvářecí operaci byla vypočtena na 3123 kN.

- Druhá operace – zpětné protlačování válcové dutiny:

Přirozený přetvárný odpor po dosazení do rovnice (3.14):

$$\begin{aligned} \sigma_{p2_{III}} &= 13329 \cdot \varphi_{C_{III}}^5 - 38404 \cdot \varphi_{C_{III}}^4 + 41486 \cdot \varphi_{C_{III}}^3 - 20863 \cdot \varphi_{C_{III}}^2 \\ &\quad + 5090,4 \cdot \varphi_{C_{III}} + 603,07 \\ &= 13329 \cdot 0,626934^5 - 38404 \cdot 0,626934^4 + 41486 \cdot 0,626934^3 - \\ &\quad - 20863 \cdot 0,626934^2 + 5090,4 \cdot 0,626934 + 603,07 = 1175,111 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Přirozený přetvárný odpor ve druhé operaci při zpětném protlačení dutiny byl pro další výpočty zaokrouhlen na 1175,1 MPa.

Deformační odpor při zpětném protlačování po dosazení do rovnice (2.11):

$$\begin{aligned} \sigma_{d2_{III}} &= \sigma_{p1} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot f \cdot \frac{D_{V5}}{h_{z2}}\right) + \sigma_{ps2_{III}} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot f_{2s}}{D_{V1} - D_{V5}} \cdot h_{z2}\right) \\ &= 926,71 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot 0,08 \cdot \frac{28,3}{36,32}\right) + 1050,91 \\ &\quad \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot 0,29}{44 - 28,3} \cdot 36,32\right) = 3406,886 \text{ MPa} \end{aligned}$$

kde: σ_{p1} – přirozený přetvárný odpor na dně průtláčnice [MPa],

f – součinitel tření pod průtláčníkem [-],

f_{2s} – střední součinitel tření [-],

$$f_{2s} = \frac{1}{2} \cdot (f + 0,5) = \frac{1}{2} \cdot (0,08 + 0,5) = 0,29 \quad (3.17)$$

$\sigma_{ps2_{III}}$ – střední hodnota přirozeného přetvárného odporu [MPa]:

$$\sigma_{ps2_{III}} = \frac{\sigma_{p1} + \sigma_{p2_{III}}}{2} = \frac{926,71 + 1175,1}{2} = 1050,91 \text{ MPa} \quad (3.18)$$

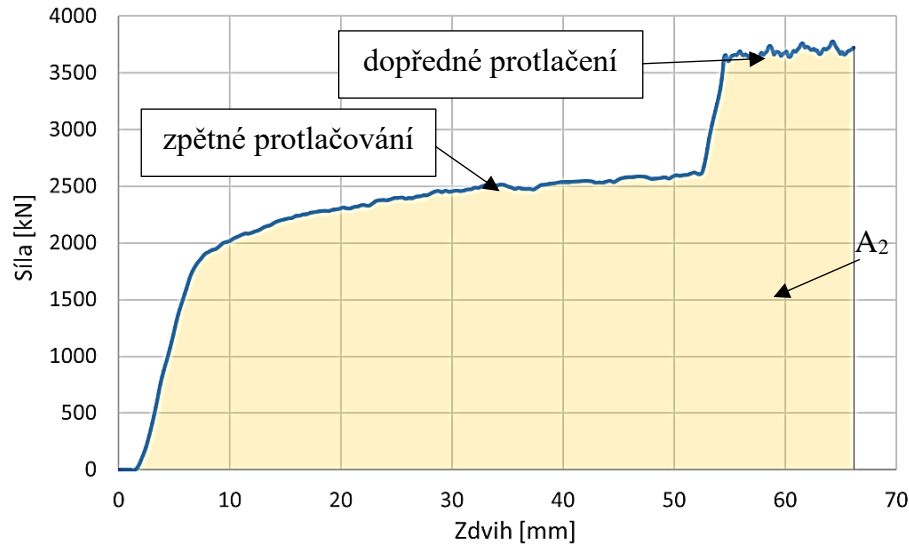
Vypočtený deformační odpor pro zpětné protlačení dutiny ve druhé operaci byl pro další výpočty zaokrouhlen na hodnotu 3406,9 MPa.

Přetvárná síla potřebná ke zpětnému protlačení je vypočtena dle rovnice (2.12):

$$F_{2_{III}} = \sigma_{d2_{III}} \cdot S_5 = \sigma_{d1} \cdot \frac{\pi \cdot D_{V5}^2}{4} = 3406,9 \cdot \frac{\pi \cdot 28,3^2}{4} = 2\,142\,991,154 \text{ N}$$

Při zpětném protlačování ve druhé operaci byla přetvárná síla vypočtena na 2143 kN.

Ve druhé operaci je využito kombinovaného protlačování, kdy dojde zároveň k dopřednému protlačení užší části hřídele i ke zpětnému protlačení dutiny. Byly vypočteny tvářecí síly potřebné jak pro zpětné $F_{2_{III}} = 2143$ kN, tak pro dopředné $F_{2_I} = 3123$ kN protlačení materiálu. Z grafické závislosti tvářecí síly na zdvihu stroje je možné pozorovat obdobný trend hodnot tvářecí síly, tedy nižší síla pro zpětné protlačení a následně zvýšení při dopředném protlačování, viz obrázek 58. Zde je však dosaženo o něco vyšších hodnot, což může být působeno zjednodušením výpočtů, nebo nedostatečně jemnými prvky sítě při numerické simulaci. Maximální hodnota tvářecí síly byla pomocí simulace vypočtena na $F_{S2} = 3774$ kN. Současně byla stanovena hodnota přetvárné práce ze simulace o velikosti $A_2 = 162\,690$ J.



Obr. 58 Průběh tvářecí síly ve druhé operaci.

- Třetí operace – zpětné protlačování dutiny drážkování (nahrazena válcovou dutinou):
Přirozený přetvárný odpor po dosažení do rovnice (3.14):

$$\begin{aligned}\sigma_{p3_{IV}} &= 13329 \cdot \varphi_{C_{IV}}^5 - 38404 \cdot \varphi_{C_{IV}}^4 + 41486 \cdot \varphi_{C_{IV}}^3 - 20863 \cdot \varphi_{C_{IV}}^2 \\ &\quad + 5090,4 \cdot \varphi_{C_{IV}} + 603,07 \\ &= 13329 \cdot 0,49837^5 - 38404 \cdot 0,49837^4 + 41486 \cdot 0,49837^3 - \\ &\quad - 20863 \cdot 0,49837^2 + 5090,4 \cdot 0,49837 + 603,07 = 1134,055 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Přirozený přetvárný odpor ve třetí operaci při zpětném protlačení dutiny byl pro další výpočty zaokrouhlen na 1134,1 MPa.

Deformační odpor při zpětném protlačování po dosažení do rovnice (2.11):

$$\begin{aligned}\sigma_{d3_{IV}} &= \sigma_{p1} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot f \cdot \frac{D_{V6}}{h_{z3}}\right) + \sigma_{ps3_{IV}} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot f_{2s}}{D_{V1} - D_{V5}} \cdot h_{z3}\right) \\ &= 926,71 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot 0,08 \cdot \frac{28,3}{26}\right) + 1030,38 \\ &\quad \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot 0,29}{44 - 28,3} \cdot 26\right) = 2816,619 \text{ MPa}\end{aligned}$$

kde: h_{z3} – výška plné části hřídele ve 3. operaci; z Inventuru $h_{z3} = 26$ mm

$\sigma_{ps3_{IV}}$ – střední hodnota přirozeného přetvárného odporu [MPa]:

$$\sigma_{ps3_{IV}} = \frac{\sigma_{p1} + \sigma_{p3_{IV}}}{2} = \frac{926,71 + 1134,1}{2} = 1030,38 \text{ MPa} \quad (3.19)$$

Vypočtený deformační odpor pro zpětné protlačení dutiny drážkování, uvažované jako válcové, ve třetí operaci byl pro další výpočty zaokrouhlen na hodnotu 2816,62 MPa.

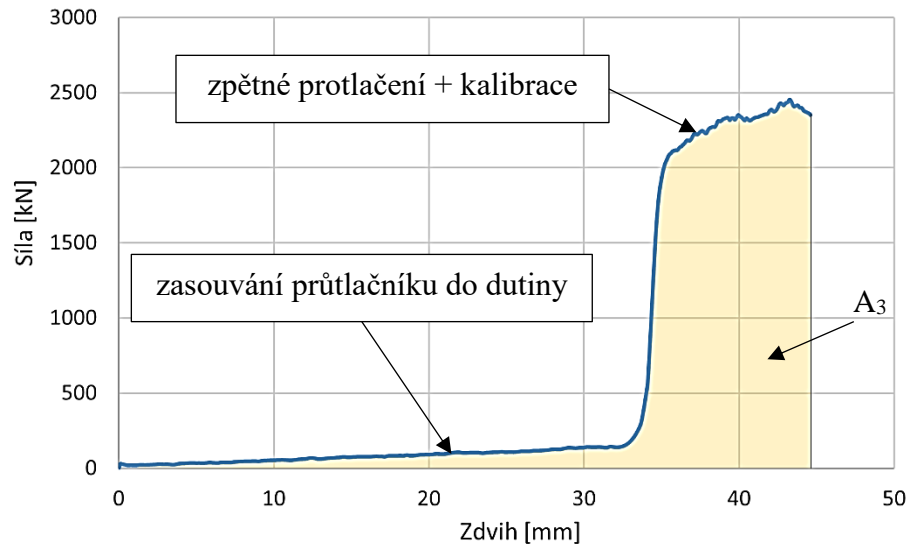
Přetvárná síla potřebná ke zpětnému protlačení je vypočtena dle rovnice (2.12):

$$F_{3_{IV}} = \sigma_{d3_{IV}} \cdot S_5 = \sigma_{d3_{IV}} \cdot \frac{\pi \cdot D_{V5}^2}{4} = 3406,9 \cdot \frac{\pi \cdot 25,4^2}{4} = 1\,427\,201,766 \text{ N}$$

Hodnota tvářecí síly pro zpětné protlačení dutiny drážkování, která je zjednodušena na válcovou, byla vypočtena a zaokrouhlena na 1427 kN.

Ve třetí operaci dojde k vytvoření oblasti IV, tedy vnitřního drážkování. Postupně dochází k zasouvání tvarového průtlačníku do válcové dutiny vytvořené ve druhé operaci, což je možné pozorovat i v průběhu tvářecí síly, kdy dochází k jejímu pozvolnému nárůstu, viz obrázek 59. Následně dojde k zaboření čela průtlačníku a počátku tvarování jednotlivých drážek, což vede k prudkému nárůstu tvářecí síly.

Ta dále roste s postupným vytvářením jednotlivých zubů až do maximální hodnoty $F_{S3} = 2435 \text{ kN}$, která je stanovena z numerické simulace. Zde je možné pozorovat velký rozdíl od vypočtené síly, který je způsobený zjednodušením složitého profilu průtlačníku na kruhový. Proto jsou hodnoty vypočtené pomocí numerické simulace přesnější. Přetvárná práce ve třetí operaci byla stanovena na $A_3 = 26\,144,7 \text{ J}$.



Obr. 59 Průběh tvářecí síly ve druhé operaci.

3.6 Volba stroje

Pro výrobu součásti je zvolen jeden z konvenčních lisů z aktuálního strojového parku firmy, konkrétně pak hydraulický lis SMG HZPU 320, znázorněný na obrázku 60. Volba byla provedena na základě nejvyšší potřebné tvářecí síly ze všech operací, která je největší při dopředném protlačování materiálu ve druhé operaci $F_{2,1} = 3123 \text{ kN}$. Maximální jmenovitá síla lisu je 320 t, tedy v přepočtu 3138 kN, což by vyhovovalo potřebným tvářecím silám.



Obr. 60 Hydraulický lis SMG HZPU 320

Dalším faktorem je potřebný výkon stroje odpovídající maximální přetvárné práci vypočtené pro jednotlivé tvářecí operace. Upínání nástrojových sestav je prováděno pomocí „T“ drážek do upínacích desek stroje, viz obr. 60. Tyto desky jsou opatřeny středícími průměry pro vzájemné středění horního a spodního nástroje. Podávání polotovaru naděleného pomocí kotoučové pily je zde možné jak ruční, tak případně pomocí robotického podavače. Vybrané parametry zvoleného stroje jsou uvedeny v tabulce 5, podrobnější informace jsou pak k nahlédnutí v příloze 7.

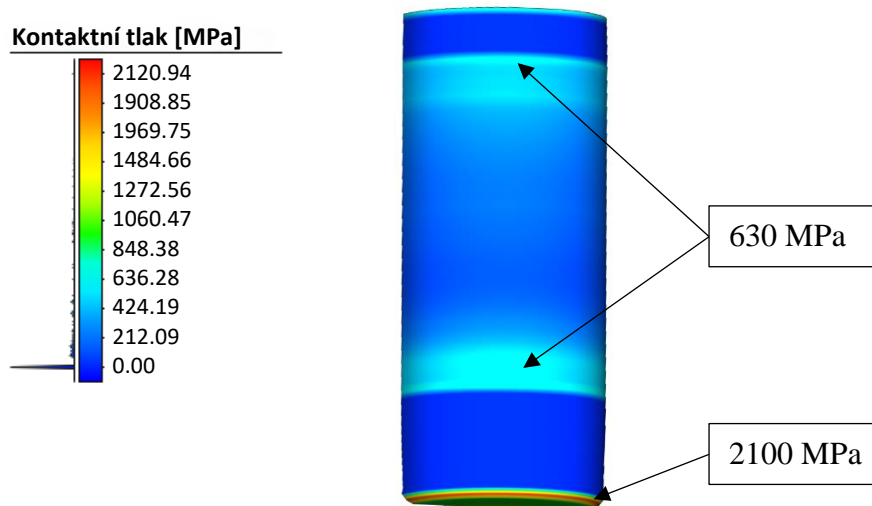
Tab. 5 Vybrané parametry hydraulického lisu SMG HZPU 320.

Technické údaje	Hodnoty	Jednotky
Maximální zdvih	2000	[mm]
Jmenovitá síla	320	[t]
Rychlost beranu	3,6	[m/min]
Výkon hlavního elektromotoru	110	[kW]
Pracovní prostor	1000 x 1000	[mm]

3.7 Návrh nástrojů

Při návrhu tvářecích nástrojů, a především lisovnic je nutné brát v potaz především radiální tlaky působící na stěnu průtlačnice. Obecně se považuje za limitní hodnotu 1000 MPa. Pokud je tato hodnota překročena, je nutné lisovnici zapouzdit pomocí objímek. Tím se vytvoří předpětí a v nástroji převažuje tlakové napětí. Tyto radiální tlaky je možné ověřit jak výpočtem, tak pomocí numerické simulace. Pro jednotlivé operace bylo provedeno posouzení těchto tlaků následovně:

- Jelikož v první operaci dochází pouze k mírnému zpěchování špalíku, dochází ke vzniku kontaktního tlaku až při konečné kalibraci dílce, kdy materiál dosedne na stěny pěchovnice. V tomto případě je pak obtížné předpokládat velikosti radiálních tlaků, proto je vhodnější použít hodnoty vypočtené pomocí numerické simulace. Zde byly zjištěny tlaky dosahující maximálních hodnot kolem 2100 MPa, viz obrázek 61, u dna průtlačnice, kde dochází k vytvoření sražení. Proto je nutné i zde počítat se zapouzřením pěchovnice pomocí dvou objímek. K výpočtu optimálního stykového průměru mezi lisovnicí a objímkou je využito programu LP4.



Obr. 61 Rozložení kontaktních tlaků na průtlačnici v 1. operaci.

Pro provedení výpočtu v programu LP4-Kopřiva je nutné znát materiál průtlačnice a objímek. Při sestavování výpočtu radiálních tlaků v průtlačnici a objímkách je totiž nutné zadávat podrobné materiálové charakteristiky těchto součástí včetně dovoleného napětí, meze kluzu a pevnosti, nebo koeficient tepelné roztažnosti. Zároveň je stěžejním parametrem pro výpočet vnitřní poloměr průtlačnice $r_1 = 22$ mm, kde právě působí tvářecí tlak, a vnější poloměr druhé objímky $r_4 = 200$ mm, který je dán velikostí upínací dutiny stroje. Z výběru nástrojových materiálů a jejich charakteristik, uvedeného v příloze č. 8, byla pro průtlačnici zvolena nástrojová ocel 19 830 a pro objímky ocel 19 740. Zadané parametry i celý postup výpočtu včetně ohřevu objímek je zaznamenán v příloze 9. Výběr výsledků získaných pomocí tohoto výpočtu je pak zanesen do tabulky 6. Jelikož program počítá zapouzdření průtlačnice přímo na zadaný tlak, je kvůli bezpečnosti zvolena hodnota tvářecího tlaku na průtlačnici $p_1 = 2200$ MPa.

Tab. 6 Vybrané výsledky výpočtu zapouzdření průtlačnice v první operaci.

Veličina	Označení	Hodnoty	Jednotky
Poměrný stykový poloměr	r_2/r_1	1,691	[-]
Vnější poloměr průtlačnice	r_2	37,2	[mm]
Stykový poloměr mezi první a druhou objímkou	r_3	94,16	[mm]
Kontaktní tlak mezi průtlačnicí a první objímkou	p_2	1274,1	[MPa]
Kontaktní tlak mezi první a druhou objímkou	p_3	611,3	[MPa]
Skutečný konstrukční přesah 1	$2\Delta r_{s1}$	0,321	[mm]
Teplota ohřevu první objímky	T_2	425,3	[°C]
Skutečný konstrukční přesah 2	$2\Delta r_{s2}$	0,961	[mm]
Teplota ohřevu druhé objímky	T_3	436,1	[°C]

- Ve druhé operaci dojde nejprve ke zpětnému protlačení dutiny, resp. vtlačení průtlačníku do materiálu, a následně dopřednému protlačení zbývající části dířku. Je možné zde provést kontrolu pro oba tvářecí pochody. Hodnotu radiálního tlaku pro zpětné protlačování je možné stanovit s využitím již vypočteného přirozeného přetvárného odporu podle vzorce [18]:

$$\begin{aligned} \sigma_{r2_III} &= \sigma_{p1} \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot f_{2s}}{D_{V1} - D_{V5}} \cdot (h_{z2} - z) \right) \\ &= 926,71 \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot 0,29}{44 - 28,3} \cdot (36,32 - 0) \right) = 3413 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (3.20)$$

kde: z – výška od dna průtlačnice; nejvyšší hodnota pro $z = 0$.

Vypočtená hodnota radiálního tlaku pro zpětné protlačování byla vypočtena na 3413 MPa, což je velmi vysoká hodnota. Při porovnání s numerickou simulací je patrné, že tento tlak bude nižší, jelikož zde zároveň dochází i k dopřednému protlačování, proto není vyvíjen tlak od dna průtlačnice, resp. vyhazovače.

U dopředného protlačování je nejvyšších radiálních tlaků dosahováno na vstupu do kuželové průtlačnice. Nejprve je nutné stanovit osové napětí v redukčním kuželu dle vztahu [18]:

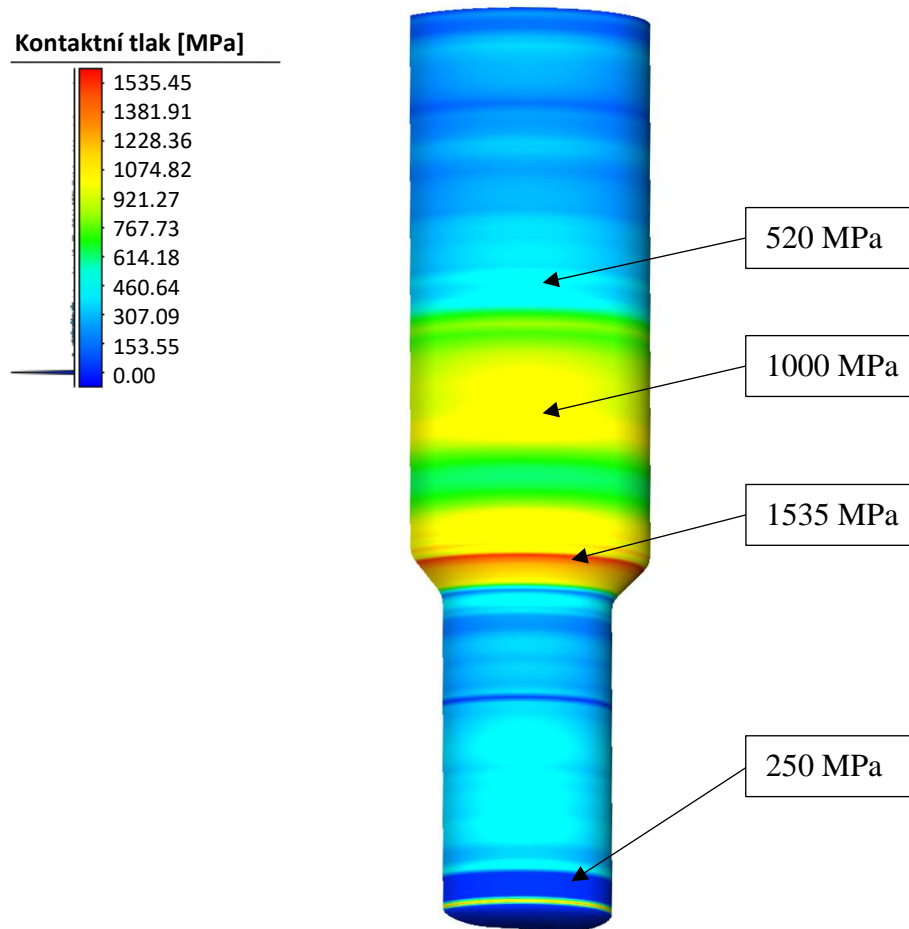
$$\begin{aligned} \sigma_{\rho 2, I} &= \sigma_{ps 2, I} \cdot \left[\left(4 \cdot f \cdot \frac{h_o}{D_{V3}} \cdot \frac{\sigma_{\rho 2, I}}{\sigma_{ps 2, I}} + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{f} + 1 \right) \cdot \left(\frac{D_{V1}}{D_{V3}} \right)^{\frac{2 \cdot f}{\operatorname{tg} \alpha}} - \frac{\operatorname{tg} \alpha}{f} - 1 \right] \quad (3.21) \\ &= 1063,95 \cdot \left[\left(4 \cdot 0,08 \cdot \frac{3}{31} \cdot \frac{1201,2}{1063,95} + \frac{\operatorname{tg} 45^\circ}{0,08} + 1 \right) \cdot \left(\frac{44}{31} \right)^{\frac{2 \cdot 0,08}{\operatorname{tg} 45^\circ}} \right. \\ &\quad \left. - \frac{\operatorname{tg} 45^\circ}{0,08} - 1 \right] = 834,2 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Pak je možné vypočítat radiální napětí z podmínky plasticity dle [18]:

$$\sigma_{\varphi 2, I} = \sigma_{\rho 2, I} + \sigma_{ps 2, I} = 834,2 + 1063,95 = 1898,14 \text{ MPa} \quad (3.22)$$

Vypočtené radiální napětí v průtláčnici při dopředném protlačování bylo pro další výpočty zaokrouheno na 1900 MPa.

Tato hodnota už více odpovídá reálným tlakům uvnitř průtláčnice, jelikož při porovnání s numerickou simulací bylo zjištěno, že nejvyšší vypočtené hodnoty pomocí dosahují hodnot kolem 1540 MPa, viz obr. 62.



Obr. 62 Rozložení kontaktních tlaků na průtláčnici ve 2. operaci.

Vzhledem ke složitosti tvářecího procesu, budou v této operaci považovány hodnoty získané pomocí numerické simulace jako přesnější a bude tedy počítáno s nimi. Jelikož je vypočtený kontaktní tlak nižší než 1600 MPa, bylo by možné použít zapouzdření pomocí jedné objímky. Vzhledem k tomu, že jde ale o hodnotu velmi blízkou a v této operaci dochází k nejvyšším tvářecím silám bude i pro tuto operaci použito dvou

objímek, kdy hodnota tlaku na vnitřní stěně průtlačnice bude uvažována jako 1900 MPa, která byla zjištěna ručním výpočtem (3.22). Nejdůležitější výsledky pro zapouzdření průtlačnice, získané výpočtem v programu LP4, jsou uvedeny v tabulce 7. Celý postup výpočtu včetně zadávaných parametrů je pak zaznamenán v příloze 10.

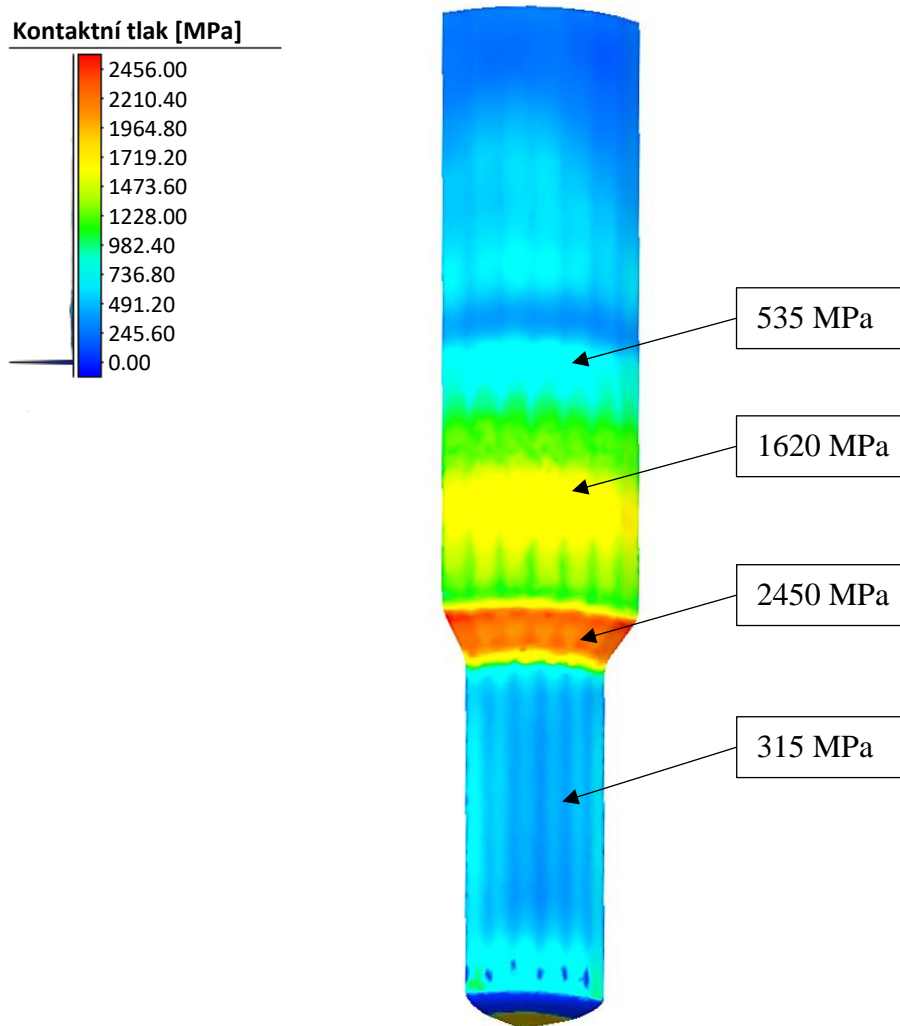
Tab. 7 Vybrané výsledky výpočtu zapouzdření průtlačnice ve druhé operaci.

Veličina	Označení	Hodnoty	Jednotky
Poměrný stykový poloměr	r_2/r_1	1,623	[-]
Vnější poloměr průtlačnice	r_2	35,7	[mm]
Stykový poloměr mezi první a druhou objímkou	r_3	143,68	[mm]
Kontaktní tlak mezi průtlačnicí a první objímkou	p_2	1067,7	[MPa]
Kontaktní tlak mezi první a druhou objímkou	p_3	363,3	[MPa]
Skutečný konstrukční přesah 1	$2\Delta r_{S1}$	0,395	[mm]
Teplota ohřevu první objímky	T_2	490	[°C]
Teplota podchlazení průtlačnice	T_1	14,5	[°C]
Skutečný konstrukční přesah 2	$2\Delta r_{S2}$	1,658	[mm]
Teplota ohřevu druhé objímky	T_3	499,3	[°C]

- Ve třetí operaci dojde ke zpětnému protlačení dutiny s drážkováním. Hodnotu radiálního tlaku je zde možné stanovit opět s využitím již vypočteného přirozeného přetvárného odporu podle vzorce [18]:

$$\begin{aligned} \sigma_{r3_{IV}} &= \sigma_{p1} \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot f_{2s}}{D_{V1} - D_{V6}} \cdot (h_{z3} - z) \right) & (3.23) \\ &= 926,71 \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot 0,29}{44 - 25,4} \cdot (26 - 0) \right) = 2707 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Hodnota maximálního radiálního tlaku ve třetí operaci byla vypočtena na 2707 MPa. Při výpočtu pomocí numerické simulace bylo nejvyšších hodnot dosaženo v redukčním kuželu průtlačnice, přesto že v této operaci probíhá pouze zpětné protlačování (obr. 63). Maximální hodnoty, které jsou ovlivněny složitostí výpočtu, zde dosahovaly až 2460 MPa, v tomto případě bylo nutné použít velmi jemnou síť, aby nedocházelo k nevhodné deformaci prvků v oblasti drážkování. Složitost protlačovaného profilu má zde velký vliv na výsledné hodnoty. Pro výpočet pouzdření průtlačnice budou považovány hodnoty z numerické simulace jako přesnější a radiální tlak na vnitřní stěně průtlačnice bude uvažován jako 2460 MPa.



Obr. 63 Rozložení kontaktních tlaků na průtlačnici ve 3. operaci.

Vzhledem k vysokým radiálním tlakům je ve výpočtu zvolen materiál průtlačnice ocel 19 436 a materiál objímek ocel 19 733. Průběh výpočtu a zadávané hodnoty jsou k nahlédnutí v příloze 11, důležité výsledky pro samotné pouzdření jsou pak uvedeny v tabulce 8.

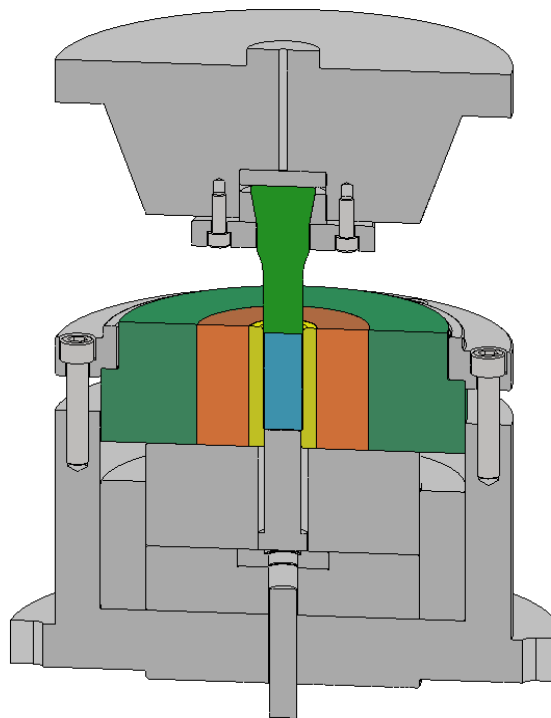
Tab. 8 Vybrané výsledky výpočtu zapouzdření průtlačnice ve třetí operaci.

Veličina	Označení	Hodnoty	Jednotky
Poměrný stykový poloměr	r_2/r_1	1,759	[-]
Vnější poloměr průtlačnice	r_2	38,70	[mm]
Stykový poloměr mezi první a druhou objímkou	r_3	96,25	[mm]
Kontaktní tlak mezi průtlačnicí a první objímkou	p_2	1415,03	[MPa]
Kontaktní tlak mezi první a druhou objímkou	p_3	676,92	[MPa]
Skutečný konstrukční přesah 1	$2\Delta r_{S1}$	0,322	[mm]
Teplota ohřevu první objímky	T_2	382,13	[°C]
Skutečný konstrukční přesah 2	$2\Delta r_{S2}$	1,129	[mm]
Teplota ohřevu druhé objímky	T_3	478,43	[°C]

3.7.1 Sestavy nástrojů

V první operaci výrobního postupu při pēchování polotovaru je prūtlāčnice zapouzřena dvēma objīmky z dūvodu překročení doporučených hodnot zatīžení prūtlāčnice. Zvolený hydraulický lis disponuje spodním upínacím blokem, do kterého jsou postupně vloženy opěrné desky se středěním a vyhazovač. Prūtlāčnice z nástrojové oceli 19 830 je zušlechtěna na 62 ± 1 HRC. Funkční plocha prūtlāčnice je broušena a leštěna pomocí diamantové brusné pasty. Objīmky jsou pak vyrobeny z oceli 19 740 a zpracovány na 46 HRC. Zapouzřená prūtlāčnice je pote také vložena do upínacího bloku a stažena pomocí šesti šroubů M24.

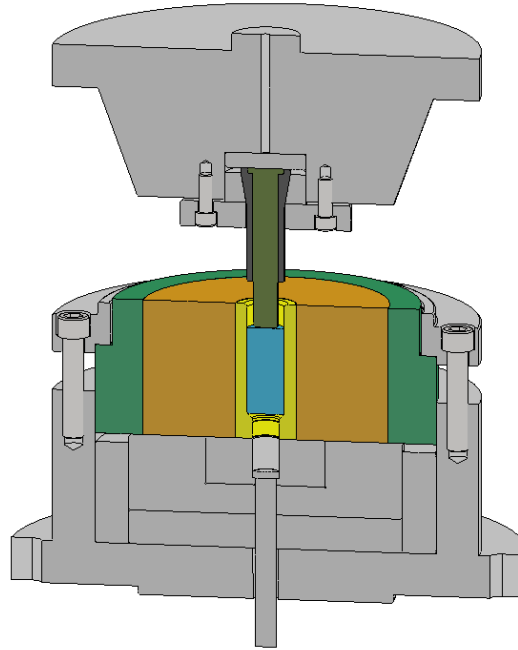
Prūtlāčník je zde navržen jako obdoba prūtlāčníku pro dopředné protlačování. Na jeho výrobu je použita nástrojová ocel 19 569 zušlechtěná na 57 ± 1 HRC. Funkční plocha v oblasti čela prūtlāčníku je broušena a lapována. Prūtlāčník je středěn přes kužel pomocí středící vložky a následně upnut s použitím upínací matice a čtyř šroubů M16 do horního upínacího tělesa lisu. Vyhazovač je zhotoven z oceli 19 820 a zpracován na 60 ± 1 HRC. Uložení vyhazovače v prūtlāčnici je H7/f7. Kompletní nástrojová sestava pro první tvářecí operaci je znázorněna na obrázku 64.



Obr. 64 Sestava nástrojů pro první tvářecí operaci.

Ve druhé operaci je prūtlāčník konstruován jako vložkovaný a čelo prūtlāčníku je upraveno pro zpětné protlačování, kdy je na čele vytvořen kužel o vrcholovém úhlu 166° pro lepší rozhánění materiálu. Po protlačení dutiny dosedne na materiál vnější část prūtlāčníku a dochází k dopřednému protlačení zbylé části. Obě části prūtlāčníku jsou vyrobeny z nástrojové oceli 19 569 a zušlechtěny na 57 ± 1 HRC. Funkční plochy prūtlāčníku i vložky jsou broušeny a leštěny.

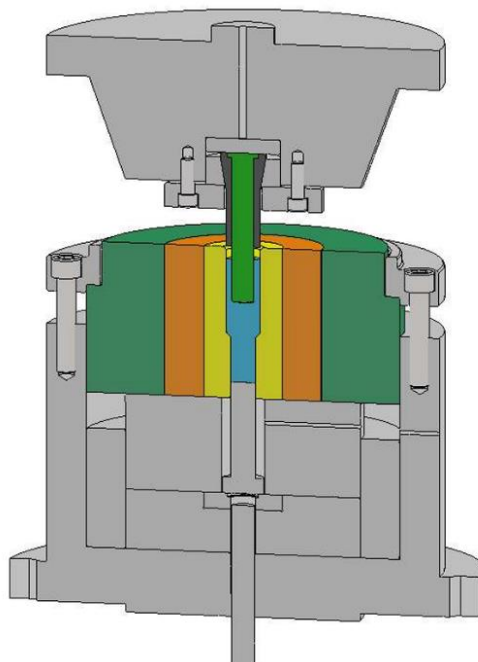
Prūtlāčnice je opět vyrobena z nástrojové oceli 19 830 je zušlechtěna na 62 ± 1 HRC. Funkční plocha prūtlāčnice je broušena a leštěna. Objīmky jsou zde taktěž vyrobeny z oceli 19 740 a zpracovány na 47 HRC. Jelikož dojde nejprve k zpětnému protlačení, není nutné použití vyhazovače jako v první operaci. Po protlačení dříku dojde k jednoduchému vyhození protlačku pomocí vyhazovače stroje. Aby nedocházelo k jeho výraznému opotřebení je mezi ním a tvářeným materiálem umístěna vyhazovací podložka. Sestava nástrojů použitá pro druhou operaci výroby součásti je znázorněna na obrázku 65.



Obr. 65 Sestava nástrojů pro druhou tvářecí operaci.

Nástroje pro třetí operaci jsou koncipovány podobně jako pro první operaci, viz obrázek 66. Vzhledem k tomu, že zde dochází pouze ke zpětnému protlačování, je nutné použití pevného vyhazovače, o který se opře čelo protlačku. Vzhledem k vysokým radiálním tlakům jsou zde průtlačnice i objímky vyrobeny z materiálů s vyšším dovoleným namáháním. Konkrétně pro průtlačnici byla zvolena nástrojová ocel 19 436 zušlechťená na 59 HRC a pro objímky ocel 19 733 zpracovaná na 47 HRC.

Průtlačník je zde, obdobně jako ve druhé operaci, konstruován jako dvoudílný, kdy je možné použít vnější část průtlačníku z druhé operace. V tom případě by bylo nutné měnit pouze vložku. Jelikož zde probíhá tváření drážek se složitým profilem bude i průtlačník vyroben z jiné oceli, konkrétně 19 820 a zpracován na tvrdost 62–64 HRC. Z důvodu vyšší odolnosti vůči opotřebení drážek na tvářecím nástroji je funkční plocha průtlačníku povlakována TiN.



Obr. 66 Sestava nástrojů pro třetí tvářecí operaci.

ZÁVĚR

V rámci diplomové práce byl zhotoven návrh technologie výroby unašecí hřídele využívané v hydraulických čerpadlech. Požadovaná velikost roční výrobní série byla stanovena na 300 000 kusů. Vzhledem k výrobní sérii a tvaru součásti, kdy hlavním prvkem součásti je vnitřní drážkování ve válcové dutině, byla k výrobě zvolena technologie objemového tváření za studena, tedy kombinace pěchování a protlačování. Pomocí zvolené technologie je možné vyrobit dílec s danými rozměrovými požadavky v krátkém čase.

Z hlediska výrobního portfolia společnosti se jednalo o nový produkt, jenž je podobný již stávajícím výrobkům výrobního programu. Konstrukce a geometrie dílce byla dána zákazníkem, stejně jako požadavky na výrobu, které je nutno splnit. Jedná se především o geometrické tolerance tvaru a přesnost některých rozměrů hřídele. Dále také přesnost drážkování uvnitř dutiny hřídele.

Při řešení výroby součásti byly navrženy tři základní varianty výroby, přičemž byl vybrán nejoptimálnější způsob výroby vzhledem k výsledkům numerické simulace přetvoření dílce v jednotlivých operacích. Pro simulaci byl použit software využívající metodu konečných prvků Simufact Forming 2023.4 s materiálovým modelem zvoleným z knihovny softwaru, odpovídajícím zadanému materiálu DIN 20CrMo5. Po ověření vyrobitelnosti a zhodnocení výsledného přetvoření byla jako nejvhodnější postup zvolena varianta C s mírnými úpravami. Prvním krokem je uříznutí polotovaru z tyče o průměru 42 mm pomocí kotoučové pily a poté přetvoření materiálu do požadovaného tvaru pomocí třech tvářecích operací. Pro uříznutí polotovaru byla zvolena kotoučová pila AMADA CM 65, kterou firma disponuje.

Pro tento návrh byly zpracovány základní technologické a kontrolní výpočty, které byly následně srovnány s výsledky numerické simulace. Vypočteno bylo přetvoření dílce, přirozený přetvárný odpor a deformační přetvárný odpor, který je potřebný ke stanovení působících sil v jednotlivých tvářecích operacích. Nejvyšší tvářecí síla, která se příliš nelišila od síly získané numerickou simulací, byla vypočtena ve druhé tvářecí operaci a to $F_{2-I} = 3123$ kN. Po zohlednění této síly byl pro provedení všech tvářecích operací zvolen stroj z aktuálního strojového parku firmy, konkrétně konvenční jednooperační hydraulický lis SMG HZPU 320.

S využitím poskytnutých materiálů o stroji a na základě provedených technologických výpočtů byla pro každou tvářecí operaci navržena nástrojová sestava. Ve všech operacích bylo vypočteno, že průtlačnice musí být zapouzdřena ve dvou objímkách, se kterými je následně uložena v upínacím pouzdru stroje. V první a třetí operaci je využito pevného vyhazovače na straně lisovnice. Pro druhou a třetí operaci je pak využito vložkovaného průtlačníku. Práce obsahuje kromě výkresu sestav i výrobní výkresy průtlačníku a průtlačnice pro každou ze třech výrobních operací.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] LIDMILA, Zdeněk. *Teorie a technologie tváření I*. Brno: Univerzita obrany, 2008. ISBN 978-80-7231-579-6.
 - [2] LIDMILA, Zdeněk. *Teorie a technologie tváření II*. Brno: Univerzita obrany, 2008. ISBN 978-80-7231-580-2.
 - [3] ČADA, Radek. *Technologie tváření, slévání a svařování: stříhání a tažení plechu, objemové tváření zastudena*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3624-9.
 - [4] K.Y.H. *Taiwan Cold Formed Parts manufacturer*. Online. KO YING. 2024. Dostupné z: <https://www.ko-ying.com.tw/cold-formed-parts.html>. [cit. 2024-03-02].
 - [5] AAM. *Metal Forming*. Online. AAM. 2023. Dostupné z: <https://www.aam.com/what-we-do/our-products/metal-forming>. [cit. 2024-02-20].
 - [6] HYDROLIDER. *Hydraulické čerpadla*. Online. Hydraulické díly. 2015. Dostupné z: <https://www.hydrolider.cz/hydraulicke-cerpadla>. [cit. 2024-02-20].
 - [7] PARR, Andrew. *Hydraulics and Pneumatics - A Technician's and Engineer's Guide (2nd Edition)*. 2nd Edition. Elsevier, 1998. ISBN 9780750644199.
 - [8] *Gear pump 4-hole (ISO)*. Online. ProLux. 2024. Dostupné z: https://www.prolux-shop.com/in_en/gear-pump-4-hole-iso.html. [cit. 2024-03-05].
 - [9] BOHÁČEK, František. *Části a mechanismy strojů. II, Hřídele, tribologie, ložiska*. 3. vyd. Brno: PC DIR, 1996. ISBN 80-214-0829-4.
 - [10] MELICHAR, Jan; BRADA, Karel a BLÁHA, Jaroslav. *Hydraulické stroje: konstrukce a provoz*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02657-4.
 - [12] KSB. *Pump shaft*. Online. KSB. 2023. Dostupné z: <https://www.ksb.com/en-global/centrifugal-pump-lexicon/article/pump-shaft-1115634>. [cit. 2024-02-20].
 - [13] *SCHEDE TECNICHE ACCIAIO*. Online. LUCEFIN. 2023. Dostupné z: <https://lucefin.com/en/schede-tecniche-acciaio/>. [cit. 2024-02-20].
 - [14] *Převodní tabulky ocelí ČSN, POLDI, TRINEC, WNR, DIN, BOEHLER, AISI*. Online. TumliKOVO: Technologie strojního obrábění kovů. 2010. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/prevodni-tabulky-oceli/>. [cit. 2024-02-20].
 - [15] HODIS, Zdeněk. *Strojírenská technologie*. Online, Studijní text. Brno: Masarykova Univerzita, 2012. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/ped/jaro2013/DI3MK_PPK/um/Strojirenska_technologie-OVP_pracovni.pdf. [cit. 2024-02-20].
 - [19] *What Is Gray Cast Iron? Advantages and Disadvantages in Manufacturing Applications*. Online. ACME Foundry. 2022. Dostupné z: <https://acmefoundry.net/what-is-gray-cast-iron-advantages-and-disadvantages-in-manufacturing-applications/>. [cit. 2024-02-20].
 - [20] FOREJT, Milan a PÍŠKA, Miroslav. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
 - [21] KOČMAN, Karel a PROKOP, Jaroslav. *Technologie obrábění*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3068-0.
 - [22] ŘÍČKA, Jaroslav. *Technologie obrábění*. Praha: SNTL, 1979. ISBN 80-214-196-2.
 - [23] *CNC Lathe*. Online. Premium Parts. 2024. Dostupné z: <https://www.premiumparts.com/services/cnc-lathe>. [cit. 2024-02-20].
-

-
- [24] NOVOTNY, Karel. *Optimalizace tvaru nástroje pro válcování*. Online. Šmeral Brno a.s. 2020. Dostupné z: <https://www.smeral.cz/cs/news/8/optimalizace-tvaru-nastroje-pro-valcovani>. [cit. 2024-03-06].
- [25] THEMEGRILL. *Válcovací zařízení – automatizované systémy*. Online. Sciencealpha. 2019. Dostupné z: <https://sciencealpha.com/rolling-mill-equipment-automated-systems/>. [cit. 2024-03-11].
- [26] BETAMACCHINE. *Cross Wedge Rolling Machine*. Online. FORGING MACHINERY. 2023. Dostupné z: <https://www.betamaq.com.br/en/machines/forging-machinery/cross-wedge-rolling-machine-ul-45a-cross-wedge-rolling-machine-smeral>. [cit. 2024-03-03].
- [27] DVOŘÁK, Milan. *Technologie II*. Vyd. 3., doplněné. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2683-7.
- [28] TFG USA. *Hot Forging*. Online. The Federal Group USA. 2024. Dostupné z: <https://www.tfgusa.com/capabilities/hot-forging/>. [cit. 2024-02-20].
- [29] BABOR, Karel; CVILINEK, Augustin; FIALA, Jan a HAŠEK, Vladimír. *Objemové tváření oceli*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1967.
- [30] *Cold Forging*. Online. Steel Products. 2021. Dostupné z: <https://steelproducts.net/cold-forging/>. [cit. 2024-02-20].
- [31] FELDMAN, Heinz D. *Protlačování oceli*. Praha: SNTL, 1962.
- [32] *Drop Forging*. Online. Brooks Forgings. 2024. Dostupné z: <https://brooksforgings.co.uk/processes/drop-forging>. [cit. 2024-04-02].
- [33] *Metal forming handbook*. Berlin: Springer, 1998. ISBN 3-540-61185-1.
- [34] DVOŘÁK, Milan a MAREČKOVÁ, Michaela. *TECHNOLOGIE TVÁŘENÍ Studijní opory pro kombinované studium I. stupeň, 2. ročník CTT-K*. Online. Syllabus VUT. 2021. Dostupné z: https://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/ctt_technologie_tvareni_syllabus_dvorak_cisarova.pdf. [cit. 2024-04-02].
- [35] GROOVER, Mikell P. *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems*. SI version; Seventh edition. Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte., 2019. ISBN 978-1-119-70642-7.
- [36] BRALLA, James G. *Design for manufacturability handbook*. Online. 2. vyd. New York: McGraw - Hill, 1999. ISBN 0-07-007139-X. Dostupné z: [http://alvarestech.com/temp/capp/James%20Bralla%20-%20Design%20for%20Manufacturability%20Handbook%20-%20McGraw-Hill%20Professional%20\(1998\).pdf](http://alvarestech.com/temp/capp/James%20Bralla%20-%20Design%20for%20Manufacturability%20Handbook%20-%20McGraw-Hill%20Professional%20(1998).pdf). [cit. 2024-05-15].
- [37] LENFELD, Petr. *Technologie II*. Online. TECHNICKÁ UNIVERZITA LIBEREC. Katedra tváření kovů a plastů. Dostupné z: https://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/index.htm. [cit. 2024-04-02].
- [38] PALÁT, Hynek. *Strojírenská technologie, 1. ročník*. Online, Vzdělávací materiál. Opava: Střední škola průmyslová a umělecká Opava, 2011. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/11238009/>. [cit. 2024-05-15].
- [39] NOVOTNÝ, Karel. *Výrobní stroje a zařízení: Studijní opory pro kombinované studium I. stupeň, 2. ročník HVS-K*. Online. Brno. 2002. Dostupné z: https://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/hvs_vyrobní_stroje_a_zarizeni_novotny.pdf. [cit. 2024-04-14].
- [40] RUDOLF, Bedřich a KOPECKÝ, Miloslav. *Tvářecí stroje: základy výpočtů a konstrukce*. Praha: Bratislava: SNTL ; ALFA, 1979.
-

- [41] FOREJT, Milan. *Oborový projekt 2*. Online. Syllabus. VUT FSI Ústav strojírenské technologie. Brno, 2003. Dostupné z: https://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/h2p_oborovy_projekt_2_forejt.pdf. [cit. 2024-04-14].
- [42] FOREJT, Milan. *Teorie tváření*. Vyd. 2. Brno: CERM, 2004. ISBN 80-214-2764-7.
- [43] DVOŘÁK, Milan; GAJDOŠ, František a NOVOTNÝ, Karel. *Technologie tváření: Plošné a objemové tváření*. 3. vyd. Brno: CERM, 2003. ISBN 80-214-2340-4.
- [44] ŘÍHÁČEK, Jan. *Syllabus k předmětu počítačová podpora technologie: Část tváření*. Online. Brno: VUT FSI Ústav strojírenské technologie. 2015. Dostupné z: https://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/dpp_hpt_pocitacova_podpora_tvareni.zip. [cit. 2024-05-10].
- [45] ALTAN, Taylan a VAZQUEZ, Victor. Numerical Process Simulation for Tool and Process Design in Bulk Metal Forming. Online. *CIRP annals*. 1996, roč. 45, č. 2, s. 599-615. ISSN 0007-8506. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60514-9](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60514-9). [cit. 2024-05-10].
- [46] LOGAN, Daryl L. *A first course in the finite element method*. 6. vydání. Austrálie: Cengage Learning, 2017. ISBN 978-1-305-63734-4.
- [47] *Simufact Forming*. Online. Hexagon. 2024. Dostupné z: <https://hexagon.com/products/simufact-forming>. [cit. 2024-05-11].
- [48] FOREJT, Milan. *FORM '95. Proceedings of the 2th International Conference 13-14 th September 1995: Konstitutivní vztahy pro rychlosti deformace v technologiích tváření*. Brno: FSI VUT; ÚST, 1995. ISBN 80-214-0664-X.
- [49] ČSN 22 7005, *Tvářecí stroje. Protlačování ocelí za studena. Všeobecné požadavky na konstrukci a výpočet*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1992.
- [50] AAM. *Metaldyne*. Online. Metaldyne. 2014. Dostupné z: <https://www.metaldyne.cz/index.php>. [cit. 2024-02-20].
- [51] FOREJT, Milan. *Materiály lisovnic a objímek - 2024*. Syllabus. Brno: ÚST – odbor tváření kovů a plastů, FSI-VUT v Brně., 2024.
-

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly

Označení	Legenda	Jednotka
A	přetvárná práce	[J]
A ₁	přetvárné práce v první operaci ze simulace	[J]
A ₂	přetvárné práce ve druhé operaci ze simulace	[J]
A ₃	přetvárné práce ve třetí operaci ze simulace	[J]
A _{C1}	teplota překrytí	[J]
A _j	měrná přetvárná práce	[J]
b	hloubka dna výlisku	[mm]
b ₂	tloušťka dna protlačku ve druhé operaci	[mm]
b ₃	tloušťka dna protlačku ve třetí operaci	[mm]
D	průměr polotovaru (průtlačnice)	[mm]
d	průměr průtlačníku	[mm]
D ₀	výchozí průměr dílce	[mm]
D ₁	konečný průměr dílce	[mm]
D ₂	průměr otvoru dílce	[mm]
D _d	průměr vnitřní dutiny dílce	[mm]
dh	změna výšky tvářené součásti	[mm]
D _P	průměr polotovaru	[mm]
D _{P1}	vnější průměr součásti v první operaci	[mm]
D _{S1}	průměr sražení na čele	[mm]
dt	přírůstek času	[mm]
D _{V1}	průměr válcové části	[mm]
D _{V3}	průměr válcového dřívku	[mm]
D _{V4}	průměr zkosení u dutiny	[mm]
D _{V5}	průměr vnitřní válcové dutiny	[mm]
D _{V6}	průměr dutiny drážkování	[mm]
dφ	přírůstek logaritmické deformace	[s ⁻¹]
F	tvářecí síla	[N]
F ₁	vypočtená přetvárná síla v první tvářecí operaci	[N]
F _{2_I}	přetvárná síla k dopřednému protlačení ve druhé operaci	[N]
F _{2_III}	přetvárná síla ke zpětnému protlačení ve druhé operaci	[N]
F _{3_IV}	přetvárná síla pro zpětné protlačení dutiny drážkování	[N]
f	součinitel tření	[-]
f ₁	součinitel tření ve válcovém zásobníku	[-]
f ₂	součinitel tření v kuželové průtlačnici	[-]
f _{2S}	střední součinitel tření	[-]
f ₃	součinitel tření ve výstupním očku	[-]
f _{dyn}	hydrodynamický součinitel tření	[-]
F _{S1}	přetvárná síla v první tvářecí operaci z numerické simulace	[N]
F _{S2}	přetvárná síla ve druhé tvářecí operaci z numerické simulace	[N]
F _{S3}	přetvárná síla ve třetí tvářecí operaci z numerické simulace	[N]
h	okamžitá výška	[mm]
h _m	tloušťka vrstvy maziva	[mm]
h _o	výška oka průtlačnice	[mm]
h _P	výška polotovaru	[mm]
h _{P1}	výška válcové části v první operaci	[mm]

Označení	Legenda	Jednotka
h_s	výška sražení čela	[mm]
h_{v1}	výška válcové části o větším průměru	[mm]
h_{v2}	výška kuželové části	[mm]
h_{v3}	výška průměr válcového dřívku	[mm]
h_{v4}	výška průměr zkosení u dutiny	[mm]
h_{v5}	výška průměr vnitřní válcové dutiny	[mm]
h_{v6}	výška průměr dutiny drážkování	[mm]
h_{z2}	výška zbývající válcové části ve druhé operaci	[mm]
h_{z3}	výška zbývající válcové části ve třetí operaci	[mm]
L_0	počáteční výška dílce	[mm]
L_1	výška válcového zásobníku	[mm]
L_3	výška výstupního kalibračního oka	[mm]
m	hmotnost součásti	[kg]
p	měrný tlak	[MPa]
p_1	tvářecího tlak na vnitřním poloměru průtlačnice	[MPa]
p_2	kontaktní tlak mezi průtlačnicí a první objímkou	[MPa]
p_3	kontaktní tlak mezi první a druhou objímkou	[MPa]
r_1	vnitřní poloměr průtlačnice	[mm]
r_2	vnější poloměr průtlačnice	[mm]
r_3	stykový poloměr mezi první a druhou objímkou	[mm]
r_4	vnější poloměr druhé objímky	[mm]
Δr_{s1}	Skutečný konstrukční přesah mezi průtlačnicí a první objímkou	[mm]
Δr_{s2}	Skutečný konstrukční přesah mezi první a druhou objímkou	[mm]
R_m	mez pevnosti materiálu	[MPa]
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu materiálu	[MPa]
R_{p1}	poloměr protlačku po první operaci	[mm]
R_{p2_I}	poloměr protlačeného dřívku ve druhé operaci	[mm]
R_{p2}	poloměr válcové dutiny protlačku ve druhé operaci	[mm]
R_{p3}	poloměr drážkované dutiny ve třetí operaci	[mm]
S	plocha styku nástroje s materiálem	[mm ²]
S_0	výchozí průřez dílce	[mm ²]
S_1	konečný průřez dílce	[mm ²]
S_2	průřez otvoru dílce	[mm ²]
S_d	průřez vnitřní dutiny dílce	[mm ²]
T_1	teplota podchlazení průtlačnice	[°C]
T_2	teplota ohřevu první objímky	[°C]
T_3	teplota ohřevu druhé objímky	[°C]
V	objem protlačku	[mm ³]
V_1	objem válcové části o větším průměru	[mm ³]
V_2	objem kuželové části	[mm ³]
V_3	objem válcového dřívku	[mm ³]
V_4	objem zkosení u dutiny	[mm ³]
V_5	objem vnitřní válcové dutiny	[mm ³]
V_6	objem dutiny drážkování	[mm ³]
V_C	celkový objem součásti	[mm ³]
v_f	kluzová rychlost	
v_n	okamžitá rychlost pohybu nástroje	
V_P	objem polotovaru	[mm ³]
V_{P1}	objem polotovaru v první operaci	[mm ³]

Označení	Legenda	Jednotka
V_{P2}	objem polotovaru ve druhé operaci	[mm ³]
V_{V2}	objem válcové části o výšce dutiny	[mm ³]
V_{Z2}	objem zbývající válcové části ve druhé operaci	[mm ³]
Z	výška od dna průtlačnice	[mm]
Z_n	okamžitá dráha pohybu nástroje	[mm]
α	úhel zkosení čela průtlačníku	[°]
$\hat{\alpha}$	vrcholový úhel redukčního kužele	[rad]
ε	poměrné přetvoření	[%]
μ	poissonovo číslo	[-]
ρ	hustota oceli	[kg·mm ⁻³]
φ	logaritmické přetvoření	[-]
φ_1	logaritmické přetvoření průřezu při pēchování v první operaci	[-]
φ_{2_I}	logaritmické přetvoření průřezu při dopředném protlačení dříku	[-]
φ_{2_III}	logaritmické přetvoření průřezu při zpětném protlačení dutiny	[-]
φ_{3_IV}	logaritmické přetvoření při zpětném protlačení dutina drážkování	[-]
φ_{C_I}	celkové přetvoření v oblasti dříku	[-]
φ_{C_II}	celkové přetvoření v oblasti plné válcové části	[-]
φ_{C_III}	celkové přetvoření v oblasti válcové dutiny	[-]
φ_{C_IV}	celkové přetvoření v oblasti drážkování	[-]
$\dot{\varphi}$	rychlost deformace	[s ⁻¹]
$\dot{\varphi}_{1_pēch}$	rychlost deformace při pēchování v 1.operaci	[s ⁻¹]
$\dot{\varphi}_{2_dopř}$	rychlost deformace při dopředném protlačování ve 2.operaci	[s ⁻¹]
$\dot{\varphi}_{2_zpět}$	rychlost deformace při zpětném protlačování ve 2.operaci	[s ⁻¹]
$\dot{\varphi}_{3_zpět}$	rychlost deformace při zpětném protlačování ve 3.operaci	[s ⁻¹]
σ_d	deformační odpor	[MPa]
σ_{d1}	deformační odpor při pēchování v první operaci	[MPa]
σ_{d2_I}	deformační odpor při dopředném protlačování ve druhé operaci	[MPa]
σ_{d2_III}	deformační odpor při zpětném protlačování ve druhé operaci	[MPa]
σ_{d3_IV}	deformační odpor při zpětném protlačování ve třetí operaci	[MPa]
σ_p	přirozený přetvárný odpor	[MPa]
σ_{p1}	přirozený přetvárný odpor v první operaci	[MPa]
σ_{p2_I}	přirozený přetvárný odpor v druhé operaci při protlačení dříku	[MPa]
σ_{p2_III}	přirozený přetvárný odpor v druhé operaci při zpětném protlačení	[MPa]
σ_{p2s}	střední hodnota přirozeného přetvárného odporu v druhé oblasti	[MPa]
σ_{p3_IV}	přirozený přetvárný odpor v třetí operaci při zpětném protlačení	[MPa]
σ_{ps}	střední hodnota přirozeného přetvárného odporu	[MPa]
σ_{ps2_I}	střední hodnota přirozeného přetvárného odporu ve 2. op	[MPa]
σ_{ps2_III}	střední hodnota přirozeného přetvárného odporu ve 2. op	[MPa]
σ_{ps3_IV}	střední hodnota přirozeného přetvárného odporu ve 3. op	[MPa]
σ_{r2_III}	radiální tlak při zpětném protlačení ve druhé operaci	[MPa]
σ_{r3_IV}	radiální tlak při zpětném protlačení ve třetí operaci	[MPa]
σ_{p2_I}	osové napětí při dopředném protlačení ve druhé operaci	[MPa]
$\sigma_{\varphi2_I}$	radiální napětí při dopředném protlačení ve druhé operaci	[MPa]
ν	koeficient dynamické viskozity	[Pa·s]

Zkratky

Označení	Legenda
SK	slinutý karbid
SPH	smoothed particle hydrodynamics
HRC	tvrdost dle Rockwella
TiN	nitrid titanu

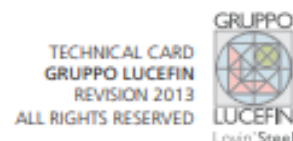
SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Materiálový list zadané oceli DIN 20CrMo5
Příloha 2	Doporučené rozměry dutiny pēchovníku
Příloha 3	Doporučené rozměry nástrojů pro dopředné protlačování
Příloha 4	Doporučené rozměry nástrojů pro zpětné protlačování
Příloha 5	Výběr materiálů využívaných na nástroje pro objemové tváření za studena
Příloha 6	Rozměry součásti pro výpočet objemu
Příloha 7	Technické parametry lisu SMG HZPU 320
Příloha 8	Výběr nástrojových materiálů pro průtlačnice a objímky
Příloha 9	Výpočet pouzdření průtlačnice v 1 operaci pomocí programu LP4-Kopřiva
Příloha 10	Výpočet pouzdření průtlačnice ve 2 operaci pomocí programu LP4-Kopřiva
Příloha 11	Výpočet pouzdření průtlačnice ve 3 operaci pomocí programu LP4-Kopřiva

SEZNAM VÝKRESŮ

Unašecí hřidel	2024-DP-217475-01
Sestava 1. operace	2024-DP-217475-02
Průtlačnice 1. op	2024-DP-217475-03
Průtlačník 1. op	2024-DP-217475-04
Sestava 2. operace	2024-DP-217475-05
Průtlačnice 2. op	2024-DP-217475-06
Průtlačník 2. op	2024-DP-217475-07
Sestava 3. operace	2024-DP-217475-08
Průtlačnice 3. op	2024-DP-217475-09
Průtlačník 3. op	2024-DP-217475-10
Pouzdro průtlačníku	2024-DP-217475-34

Quality	20CrMo5
According to standards	Werkstoff
Number	1.7264



Chemical composition						
C%	Si%	Mn%	P% max	S% max	Cr%	Mo%
0,18-0,23	0,15-0,35	0,90-1,20	0,035	0,035	1,10-1,40	0,20-0,30

Temperature °C					
Hot-forming	Core hardening	Tempering +T	Carburizing	Hardening carburizing surface	Tempering
1050-850	850 water, oil, polymer (HRC 45)	450-600	860-900 oil, polymer, s.b.	810-830 oil, polymer, s.b.	180-200
Soft annealing +A	Transformation annealing +FP	Intermediate annealing	End quench Hardenability	Pre-heating welding	Stress-relieving after welding
680-700 cooling 15 °C/h to 600 then air (HB max 217)	900-1000 (HB 150-205 ~)	650-680	860 water	200-300 welding must be carried out on the annealed state and before carburizing	500 furnace cooling
				Ac1	Ac3
				740	820
				Ms	Mf
				390	180

s.b. = salt bath 580-600 °C

Mechanical properties

Hot-rolled mechanical properties after case hardening, in core Stahlschlüssel 2010

size		Testing at room temperature (longitudinal)					
mm		R	Rp 0.2	A%	C%	Kv	HB
from	to	N/mm ²	N/mm ² min.	min.	min.	J min.	only information
	11	1080-1370	735	7	30	24	327-394
	30	980-1270	685	8	35	24	295-373
	63	780-1080	540	10	35		232-327

Table of tempering approximate values obtained at room temperature after quenching at 850 °C in water

HB	353	353	319	279	258	237	231
HRC	38	38	34	29	24	21	20
R N/mm ²	1180	1180	1050	930	860	790	770
Tempering at °C	100	200	300	400	500	550	600

Cold-drawn +C

size		Testing at room temperature (longitudinal)			
mm		R	Rp 0.2	A%	HB
from	to	N/mm ²	N/mm ² min	min	

No indications are shown in the reference standards

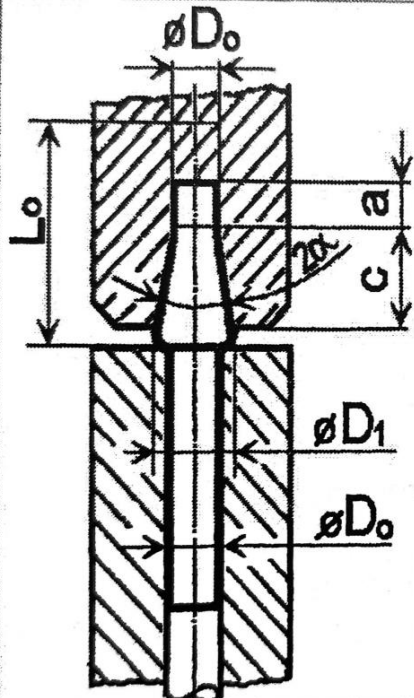
End quench Hardenability HRC

mm distance from quenched end		1.5	3	5	7	9	11	13	15	20	25	30	35	40	45	50
min		42	41	39	37	35	34	33	31	29	28	27	25	24		
max		49	49	48	48	47	46	45	44	42	41	40	39	38		

Thermal Expansion	10 ⁻⁶ · K ⁻¹	▶	11.1	12.1	12.7	12.9	13.5
Mod. of Elasticity long.	GPa		210				
Mod. of Elasticity tang.	GPa		80				
Density	Kg/dm ³		7.80				
°C			20	100	200	300	400
							500

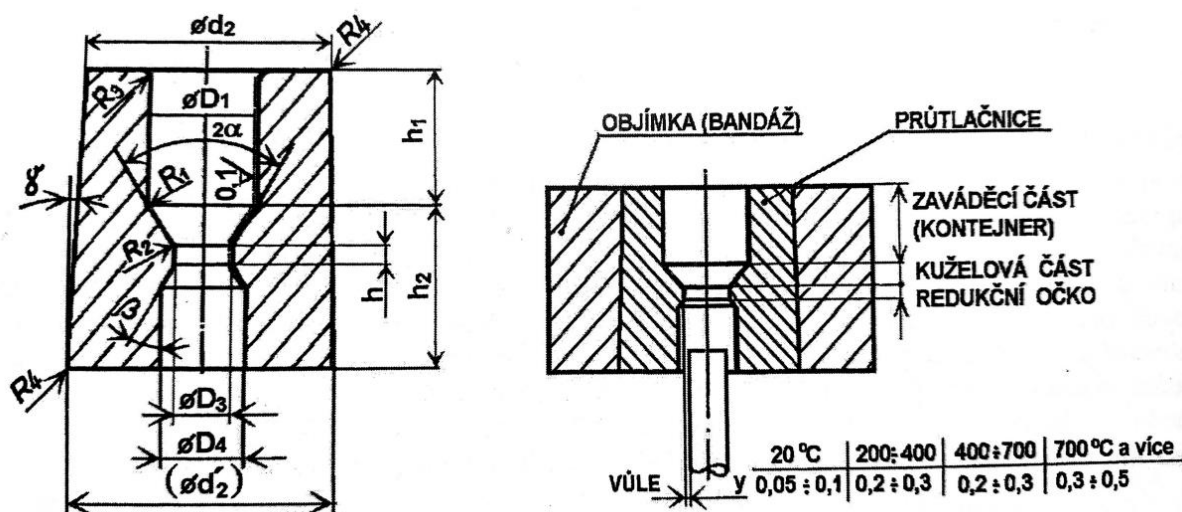
The symbol ▶ indicates temperature between 20 °C and 100 °C, 20 °C and 200 °C ...

EUROPE	ITALY	CHINA	GERMANY	FRANCE	U.K.	RUSSIA	USA
EN	UNI	GB	DIN	AFNOR	B.S.	GOST	AISI/SAE
		20CrMnMo	1.7264				



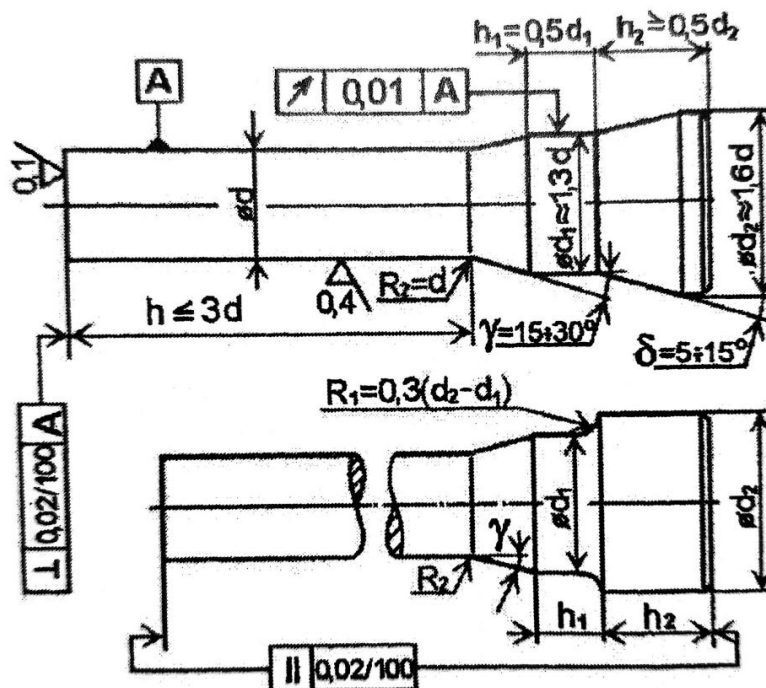
Pýchovací poměr L_o/D_o	2α [°]	a [mm]	c [mm]
2,5	15	$0,6 \cdot D_o$	$1,37 \cdot D_o$
3,3	15	$1,0 \cdot D_o$	$1,56 \cdot D_o$
3,9	15	$1,4 \cdot D_o$	$1,66 \cdot D_o$
4,3	20	$1,7 \cdot D_o$	$1,56 \cdot D_o$
4,5	25	$1,9 \cdot D_o$	$1,45 \cdot D_o$

Doporučené rozměry nástrojů pro dopředné protlačování [18]

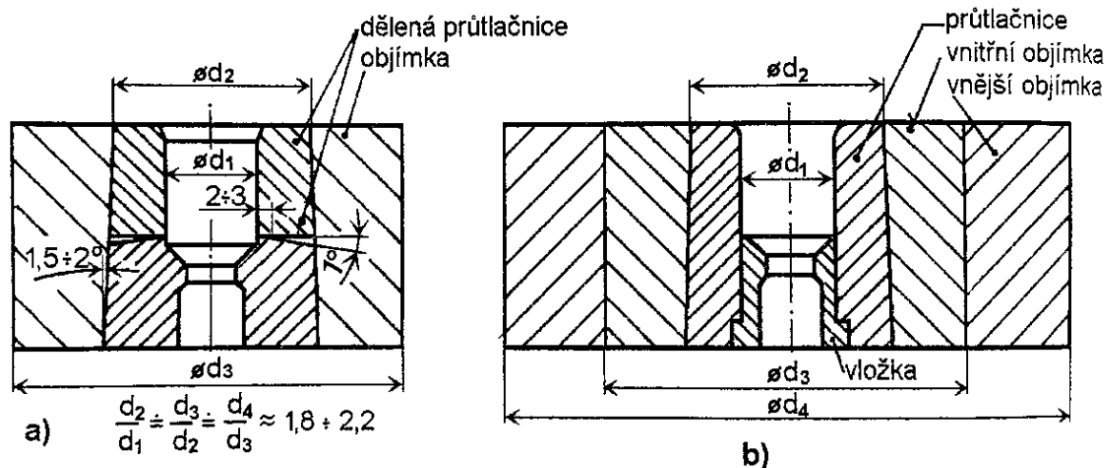


Tab.5 Geometrické parametry průtlačnice pro dopředné protlačování

Teplota tváření	20 °C	200 až 400 °C	400 až 700 °C	700 a více °C
D_4	$D_3 + (0,1 \text{ až } 0,2)$	$D_3 + (0,2 \text{ až } 0,4)$	$D_3 + (0,4 \text{ až } 0,6)$	$D_3 + (0,4 \text{ až } 0,8)$
h	$0,5 \sqrt{D_3}$	2 až 3	3 až 5	5 až 20
2α	30° až 90°	60° až 120°	90° až 120°	90° až 150°
R_1	$(D_1 - D_3)/2$			
R_2	$(0,05 \text{ až } 0,1)D_3$	1 až 2	2 až 4	3 až 10
R_3	asi $0,15 D_1$			
H_2	min $0,7 D_1$			
γ	1° až 2°			
β	5° až 10°			

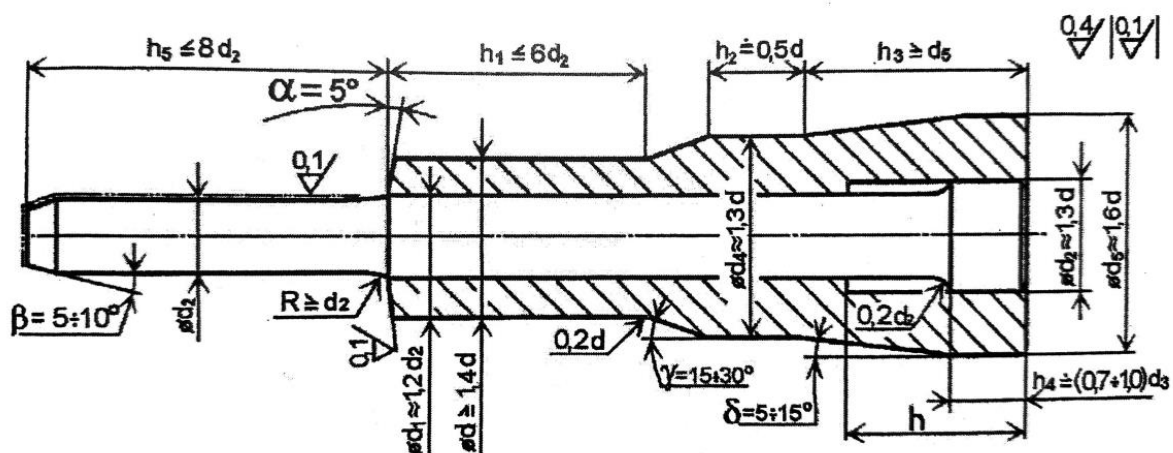


Doporučené rozměry nástrojů pro dopředné protlačování [18]

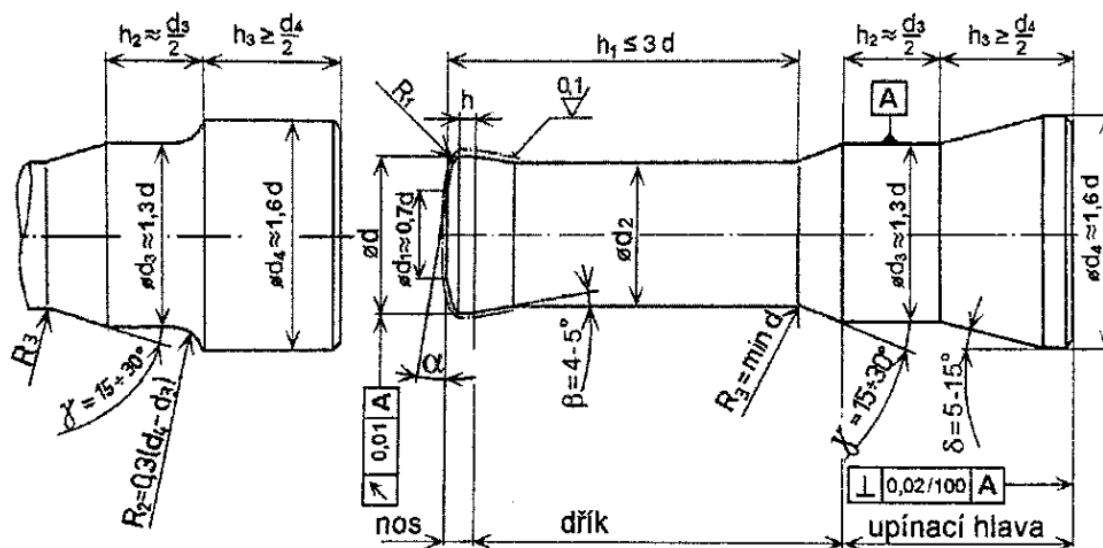


Příklady dělených a radiálně předepjatých průtlačnic

- a) příčně dělená průtlačnice s jednou objímkou
- b) průtlačnice s vložkou a se dvěma objímkami



Doporučené rozměry nástrojů pro zpětné protlačování [18]

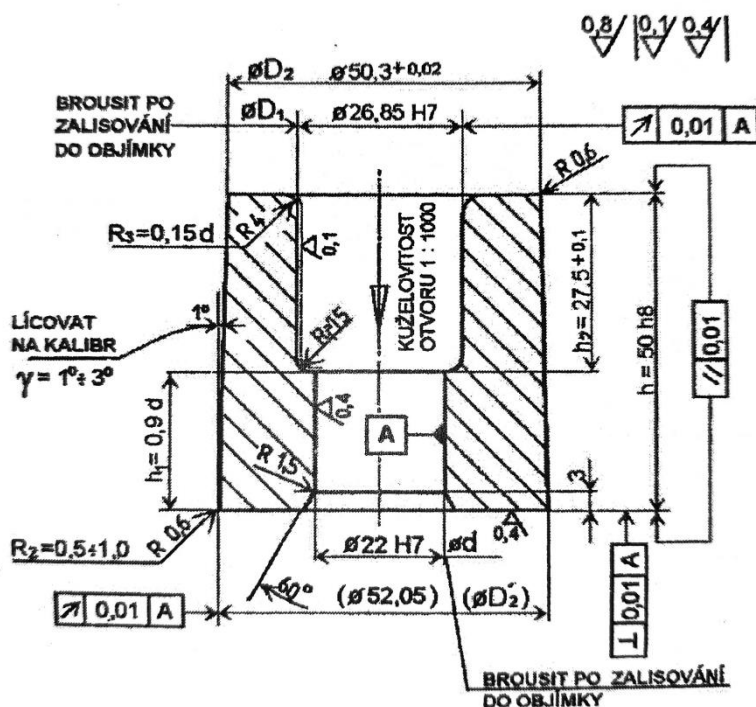
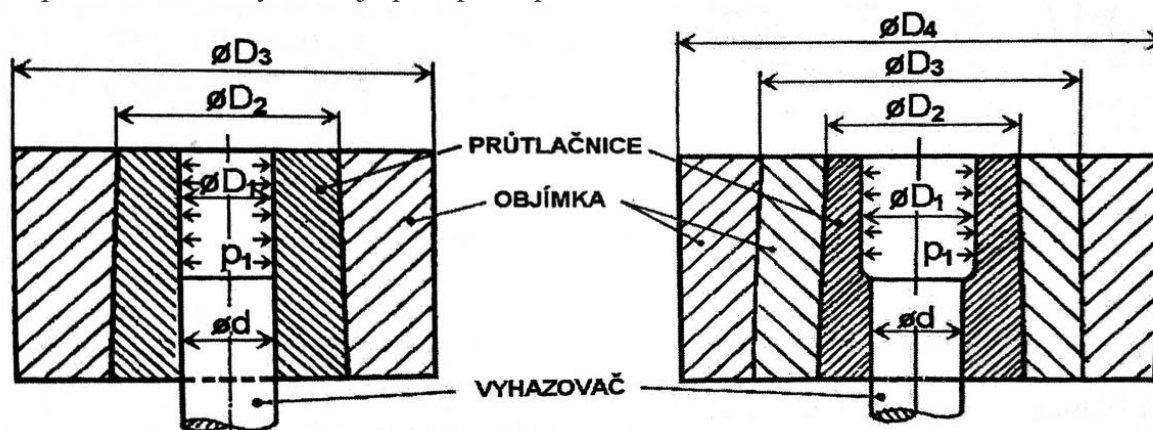


Doporučený tvar s rozměry průtlačníku pro zpětné protlačování

Tab.6 Geometrické parametry průtlačníků

	TEPLOTA ZPĚTNÉHO PROTĚLAČOVÁNÍ			
	20°C	200 až 400°C	400 až 700°C	700°C a více
$\varnothing d$	$d-(0,1 \text{ až } 0,2)$	$d-(0,2 \text{ až } 0,5)$	$d-(0,3 \text{ až } 0,6)$	$d-(0,4 \text{ až } 1,0)$
h	$0,5\sqrt{d}$	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	$(0,05 \text{ až } 0,1)d$	1 až 3 mm	1 až 4 mm	2 až 10 mm
d_1	$d-(2R_1 + 0,2d) \approx 0,7 d$			

Doporučené rozměry nástrojů pro zpětné protlačování [18]



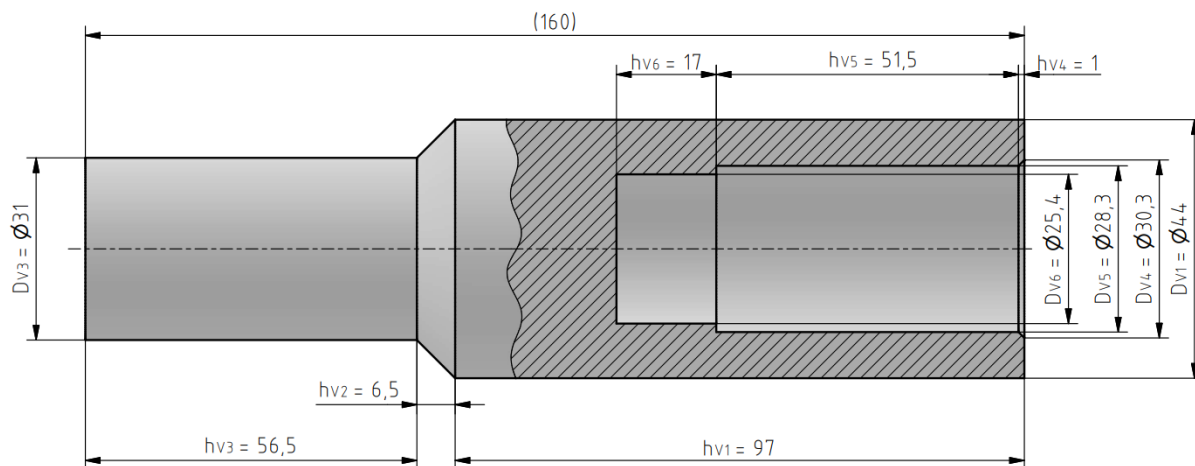
Geometrické parametry průtlačnic

	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 $0,004) D_3$

Výběr materiálů využívaných na nástroje pro objemové tváření za studena [26; 46]

Použití	Označení dle ČSN	Tvrдость HRC
Průtlačnice	19 191	60–62
	19 436	56 - 62
	19 474	52 - 56
	19 614	56 - 58
	G4, G5, G6	
Průtlačníky	19 423	56 – 58
	19 436	58 – 60
	19 569	56 - 58
	19 733	56 - 58
Objímky (zděře)	19 423	56 - 58
	19 721	50 - 52
	19 733	47 - 49
	19 740	50 - 52
Vyhazovače	19 436	58 – 60
	19 452	56 - 58
Opěrné podložky	19 423	59 - 63
	19 436	56 - 56
	19 550	52 - 54
Vodící pouzdra	19 423	59 - 63
	19 436	56 - 56

Rozměry součásti pro výpočet objemu



Príloha 7
Technické parametry lisu SMG HZPU 320 [11]

Leistung (Mp)	Fabrikat	Type	Einbauhöhe Bü. ob Tisch	Masch.Nr. Standort		Fabrik-Nr.	Baujahr	Gewicht
				Nr.	lagert in			
onnag	Supplier	Type				Year of manufa		Weight
320	SMG	NZPU 320-1000/1000 Hydraulik		39	E2	670/1713	1966	

Hub		Ölfüllung	Preßgesch. m/min.	Arbeitsvermögen	Einbauhöhe Hub unten	Keilverstellung	Aufspannfläche	
mm	K.Satz						Tisch	Stößel
Stroke						Table area	Ram area	
2000		5000	3,9		2000	15	1000x1000	1000x1000

Druckantrieb						
Motor			Pumpe			
Anz.	U/min.	kW	Anz.	Type	U/min.	L/min.
2	735	110	2	750 BV 3003-R3041		660

Steuerantrieb				
Motor		Pumpe		
in.	kW	Type	U/min.	L/min.
1445	15	Vickers Doppelp 4520V50A 5-1CC-10-002		26 230

Außstoßantrieb						
Art	Hub	Motor		Pumpe		
		U/min.	kW	Type	U/min.	L/min.
			2000			

Výběr nástrojových materiálů pro průtláčičky a objímky [47]

Materiál	T_{KAL}	T_{POP}	HRC	E	μ	R_m	R_d	$R_{p0,2}$	σ_d	α		
	[°C]	[°C]	[-]	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[K ⁻¹]		
LISOVNICE	SK G4	-	-	84	490000	0,26	1000	3400	0	750	$0,65 \cdot 10^{-5}$	
	SK G5	-	-	82,5	460000	0,26	1130	3140	0	850	$0,70 \cdot 10^{-5}$	
	Ocel 19 830	1140	620	62	220000	0,33	1665	3670	1480	1425	$1,24 \cdot 10^{-5}$	
	Ocel 19 436	1060	520	59	208000	0,30	1860	3680	-	1620	$1,28 \cdot 10^{-5}$	
				60								
				61								
	OBJÍMKA	Ocel 19 733	920	570	47	206000	0,30	1790	-	1670	1525	$1,36 \cdot 10^{-5}$
				600	49							
Ocel 19 740		1025	500	47	207000	0,30	1570	-	1320	1300	$1,26 \cdot 10^{-5}$	
			600	46				1480		1390		1360
			620	45				1410		1370		1340
Ocel 19 452		850	370	50	206000	0,30	1745	3040	1560	1500	$1,30 \cdot 10^{-5}$	
			400	47				1645	3090	1500		1450

Forejt

```
DOSBOX 0.74-3, Cpu speed: 3000 cycles, Frameskip 0, Progra...  
* NAURH LISOUNICE S DVEMI OBJIMKAMI *  
  
Zadani :  
-----  
R(1) /mm/ = 22  
R(4) /mm/ = 200  
p1 /Mpa/ = 2200  
Sigma d1 /Mpa/ = 1425  
Sigma d2 /Mpa/ = 1360  
Sigma d3 /Mpa/ = 1360  
kappa1 = 0.4537  
kappa2 = 1  
kappa3 = 1  
Lodeho soucinitel beta 1 = 1.155  
Lodeho soucinitel beta 2 = 1.155  
Lodeho soucinitel beta 3 = 1.155
```

```
DOSBOX 0.74-3, Cpu speed: 3000 cycles, Frameskip 0, Progra...  
* NAURH LISOUNICE S DVEMI OBJIMKAMI *  
  
Vysledky :  
-----  
* varianta 2 *  
  
R(2) = 37.20 mm  
R(3) = 94.16 mm  
p(2) = 1274.13 Mpa  
p(3) = 611.33 Mpa  
  
pomer r2 / r1 = 1.691  
pomer U1 / p1 = 0.648  
pomer U2 / p1 = 0.618  
pomer U3 / p1 = 0.618  
  
Chces vypocet presahu a teplot pouzdrzeni ( ano - 1 * ne - 2 ) 1
```

```
DOS
FOX
DOSBox 0.74-3, Cpu speed: 3000 cycles, Frameskip 0, Progra...
VYPOCET RADIALNIHO PRESAHU V KONTAKTNI PLOSE A
POTREBNYCH TEPLOT POUZDRENI MEZI LISOUNICI A OBJIMKOU 1

Zadani :
-----
Pozn. * index 1 je pouzivan pro lisovnici, index 2 pro objimku 1
      * T2 - teplota objimky 1

* material 1 / material lisovnice / : OCEL CSN 19 830
* material 2 / material objimky 1 / : OCEL CSN 19 740
* E 1 / modul pruznosti v tahu / ( MPa ) = 220000
* E 2 / modul pruznosti v tahu / ( MPa ) = 207000
* mi 1 / Poisonova konstanta / = 0.33
* mi 2 / Poisonova konstanta / = 0.30
* To / teplota okoli / ( °C ) = 20
* Tpop / teplota popousteni / ( °C ) = 600
* alfa 2s / soucinitel tepelne roztaznosti /
  ( zadej ve tvaru: ( A + B * T2 ) * C )
  A = 11.8
  B = 0.00133
  C = 0.000001s
```

```
DOS
FOX
DOSBox 0.74-3, Cpu speed: 3000 cycles, Frameskip 0, Progra...
VYPOCET RADIALNIHO PRESAHU V KONTAKTNI PLOSE A
POTREBNYCH TEPLOT POUZDRENI MEZI LISOUNICI A OBJIMKOU 1

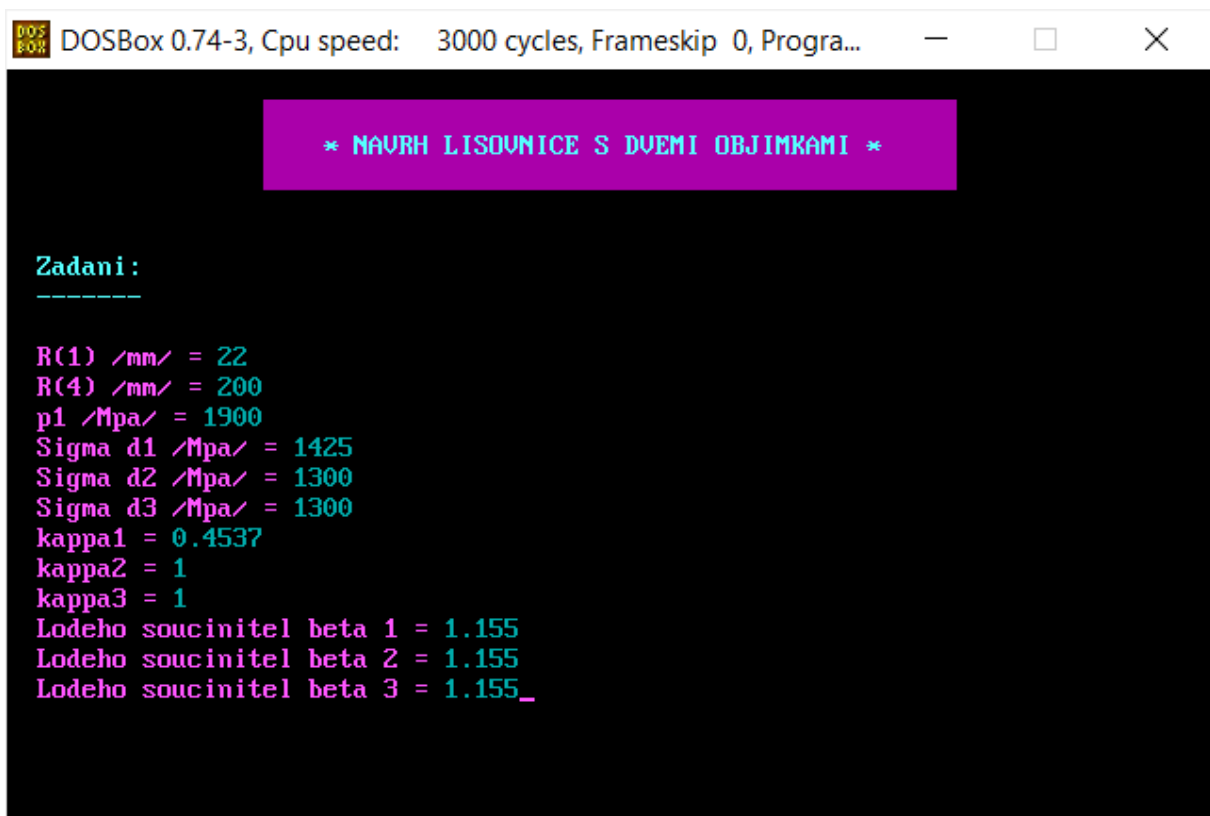
Vysledky :
-----
» deformace onejsiho polomeru lisovnice u2 = delta r2 : 0.0241 mm
» deformace unitrniho polomeru objimky u22 = delta r22 : 0.1220 mm
» celkovy radialni presah , 2 * delta rc1 = 2 * (u2 + u22) : 0.292 mm
» stazeni unitrniho otvoru lisovnice , 2 * delta r1 : -0.151 mm
» stazeni onejsiho otvoru lisovnice , 2 * delta r2 : 0.145 mm
» roztazeni objimky , 2 * delta r22 : 0.147 mm
» skutecny konstrukcni presah , 2 * delta rs1 : 0.321 mm
» pomer delta rc1/r2 : 0.008
» polomer r22 : 37.054 mm
» predpeti pd2 : 245.380 Mpa
» radialni tlak p2" / rad. tlak pri pd2 = 0 / : 1028.752 Mpa

» teplota ohrevu objimky 1 - vypoctena - , T2 : 425.25 °C
» teplota ohrevu objimky 1 - redukovana - , T2 : 425.25 °C
» teplota podchlazeni lisovnice , T1 : 0.00 °C
```



```
DOSBOX 0.74-3, Cpu speed: 3000 cycles, Frameskip 0, Progra...
VYPOCET RADIALNIHO PRESAHU V KONTAKTNI PLOSE A
POTREBNYCH TEPLOT POUZDRENI MEZI OBJIMKOU 1 A OBJIMKOU 2
* T3 - teplota objimky 2
* material 2 / material objimky 1 / : OCEL CSN 19 740
* material 3 / material objimky 2 / : OCEL CSN 19 740
* E 2 / modul pružnosti v tahu / ( MPa ) = 207000
* E 3 / modul pružnosti v tahu / ( MPa ) = 207000
* mi 2 / Poissonova konstanta / = 0.30
* mi 3 / Poissonova konstanta / = 0.30
* To / teplota okolí / ( °C ) = 20.00
* Tpop / teplota popouštění / ( °C ) = 600
* alfa 3s / součinitel tepelné roztažnosti /
  ( zadej ve tvaru: ( A + B * T3 ) * C )
  A = 11.8
  B = 0.00133
  C = 0.000001
* alfa 3 / okamžitý součinitel tepelné roztažnosti /
  ( zadej ve tvaru: ( A + B * T3 ) * C )
  A = 11.8
  B = 0.00266
  C = 0.000001_
```

```
DOSBOX 0.74-3, Cpu speed: 3000 cycles, Frameskip 0, Progra...
VYPOCET RADIALNIHO PRESAHU V KONTAKTNI PLOSE A
POTREBNYCH TEPLOT POUZDRENI MEZI OBJIMKOU 1 A OBJIMKOU 2
Vysledky :
-----
» deformace vnejsiho polomeru 1.objimky u3 = delta r3 : -0.0831 mm
» deformace vnitřniho polomeru 2.objimky u33 = delta r33 : 0.5198 mm
» celkový radialní presah , 2 * delta rc2 = 2 * (u33 - u3) : 0.873 mm
» stazeni vnitřniho otvoru objimky 1 , 2 * delta r2 : -0.278 mm
» stazeni vnejsiho otvoru objimky 1 , 2 * delta r3 : 0.318 mm
» roztazeni objimky 2 , 2 * delta r33 : 0.553 mm
» skutecny konstrukcni presah , 2 * delta rs2 : 0.961 mm
» pomer delta rc2/r3 : 0.009
» polomer r33 : 93.719 mm
» predpeti pd3 : 326.641 Mpa
» radialni tlak p3" / rad. tlak pri pd3 = 0 / : 284.690 Mpa
» teplota ohreву objimky 2 , T3 : 436.10 °C
```

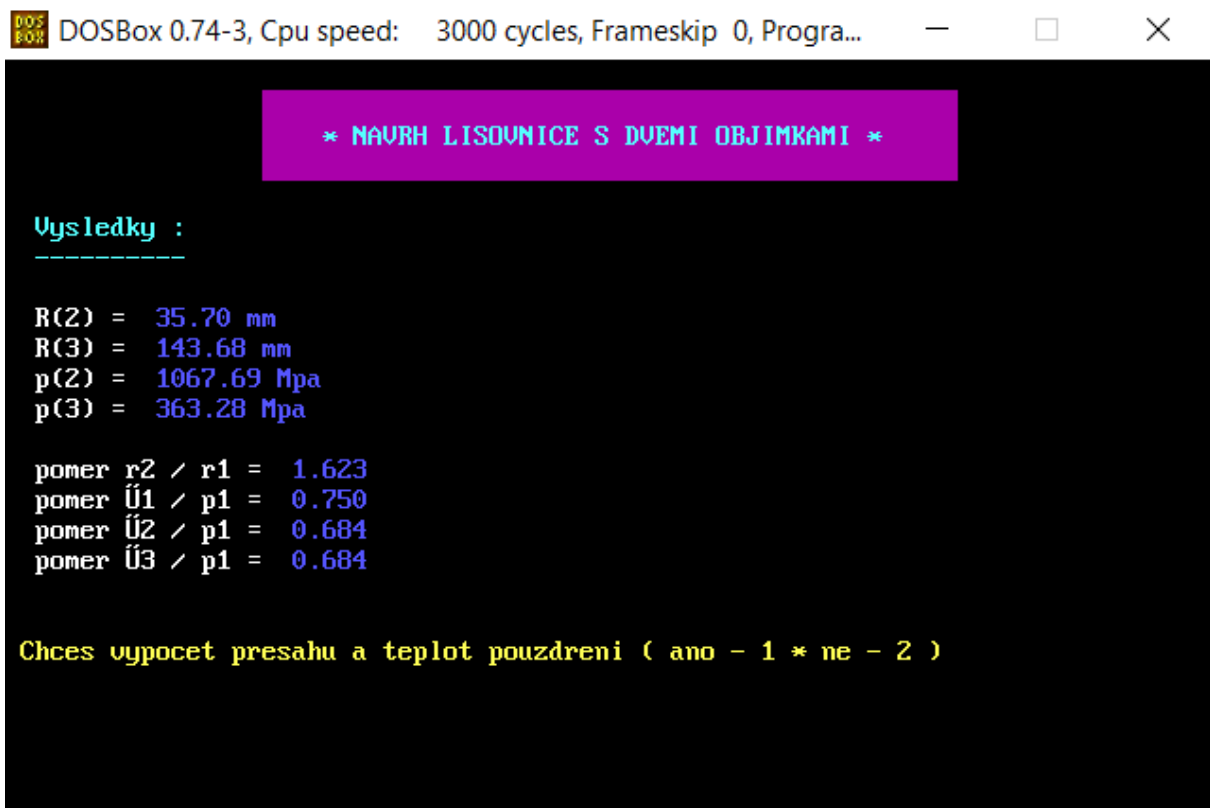


DOSBox 0.74-3, Cpu speed: 3000 cycles, Frameskip 0, Progra...

```
* NAURH LISOUNICE S DVEMI OBJIMKAMI *
```

Zadani :

```
R(1) /mm/ = 22  
R(4) /mm/ = 200  
p1 /Mpa/ = 1900  
Sigma d1 /Mpa/ = 1425  
Sigma d2 /Mpa/ = 1300  
Sigma d3 /Mpa/ = 1300  
kappa1 = 0.4537  
kappa2 = 1  
kappa3 = 1  
Lodeho soucinitel beta 1 = 1.155  
Lodeho soucinitel beta 2 = 1.155  
Lodeho soucinitel beta 3 = 1.155_
```



DOSBox 0.74-3, Cpu speed: 3000 cycles, Frameskip 0, Progra...

```
* NAURH LISOUNICE S DVEMI OBJIMKAMI *
```

Vysledky :

```
R(2) = 35.70 mm  
R(3) = 143.68 mm  
p(2) = 1067.69 Mpa  
p(3) = 363.28 Mpa  
  
pomer r2 / r1 = 1.623  
pomer Ú1 / p1 = 0.750  
pomer Ú2 / p1 = 0.684  
pomer Ú3 / p1 = 0.684
```

Chces vypocet presahu a teplot pouzdreni (ano - 1 * ne - 2)

```

DOS
BOX
DOSBox 0.74-3, Cpu speed: 3000 cycles, Frameskip 0, Progra...
-----
                VYPOCET RADIALNIHO PRESAHU V KONTAKTNI PLOSE A
                POTREBNYCH TEPLOT POUZDRENI MEZI LISOUNICI A OBJIMKOU 1
-----
Pozn. * index 1 je pouzivan pro lisounici, index 2 pro objimku 1
      * T2 - teplota objimky 1

* material 1 / material lisounice / : OCEL CSN 19830
* material 2 / material objimky 1 / : OCEL CSN 19740 47HRC
* E 1 / modul pruznosti v tahu / ( MPa ) = 220000
* E 2 / modul pruznosti v tahu / ( MPa ) = 207000
* mi 1 / Poisonova konstanta / = 0.33
* mi 2 / Poisonova konstanta / = 0.30
* To / teplota okoli / ( °C ) = 20
* Tpop / teplota popousteni / ( °C ) = 500
* alfa 2s / soucinitel tepelne roztaznosti /
  ( zadej ve tvaru: ( A + B * T2 ) * C )
  A = 11.8
  B = 0.00133
  C = 0.000001
* alfa 2 / okamzity soucinitel tepelne roztaznosti /
  ( zadej ve tvaru: ( A + B * T2 ) * C )
  A = 11.8

```

```

DOS
BOX
DOSBox 0.74-3, Cpu speed: 3000 cycles, Frameskip 0, Progra...
-----
                VYPOCET RADIALNIHO PRESAHU V KONTAKTNI PLOSE A
                POTREBNYCH TEPLOT POUZDRENI MEZI LISOUNICI A OBJIMKOU 1
-----
Vysledky :
-----
» deformace onejsiho polomeru lisounice u2 = delta r2 : 0.0493 mm
» deformace unitrniho polomeru objimky u22 = delta r22 : 0.1301 mm
» celkovy radialni presah , 2 * delta rc1 = 2 * (u2 + u22) : 0.359 mm
» stazeni unitrniho otvoru lisounice , 2 * delta r1 : -0.209 mm
» stazeni onejsiho otvoru lisounice , 2 * delta r2 : 0.199 mm
» roztazeni objimky , 2 * delta r22 : 0.159 mm
» skutecny konstrukcni presah , 2 * delta rs1 : 0.395 mm
» pomer delta rc1/r2 : 0.010
» polomer r22 : 35.521 mm
» predpeti pd2 : 323.574 Mpa
» radialni tlak p2" / rad. tlak pri pd2 = 0 / : 744.112 Mpa
-----
» teplota ohreву objimky 1 - vypoctena - , T2 : 520.96 °C
» teplota ohreву objimky 1 - redukovana - , T2 : 490.00 °C
» teplota podchlazeni lisounice , T1 : 14.48 °C

```

```

DOSBOX 0.74-3, Cpu speed: 3000 cycles, Frameskip 0, Progra...
VYPOCET RADIALNIHO PRESAHU V KONTAKTNI PLOSE A
POTREBNYCH TEPLOT POUZDRENI MEZI OBJIMKOU 1 A OBJIMKOU 2

* T3 - teplota objimky 2

* material 2 / material objimky 1 / : OCEL CSN 19740
* material 3 / material objimky 2 / : OCEL CSN 19740 47HRC
* E 2 / modul pružnosti v tahu / ( MPa ) = 207000
* E 3 / modul pružnosti v tahu / ( MPa ) = 207000
* mi 2 / Poissonova konstanta / = 0.30
* mi 3 / Poissonova konstanta / = 0.30
* To / teplota okolí / ( °C ) = 20.00
* Tpop / teplota popouštění / ( °C ) = 500
* alfa 3s / součinitel tepelné roztácnosti /
  ( zadej ve tvaru: ( A + B * T3 ) * C )
  A = 11.8
  B = 0.00133
  C = 0.000001
* alfa 3 / okamžitý součinitel tepelné roztácnosti /
  ( zadej ve tvaru: ( A + B * T3 ) * C )
  A = 11.8
  B = 0.00266
  C = 0.000001_

```

```

DOSBOX 0.74-3, Cpu speed: 3000 cycles, Frameskip 0, Progra...
VYPOCET RADIALNIHO PRESAHU V KONTAKTNI PLOSE A
POTREBNYCH TEPLOT POUZDRENI MEZI OBJIMKOU 1 A OBJIMKOU 2

Vysledky :
-----
» deformace vnejsiho polomeru 1.objimky u3 = delta r3 : -0.1122 mm
» deformace vnitřniho polomeru 2.objimky u33 = delta r33 : 0.8657 mm
» celkový radialni presah , 2 * delta rc2 = 2 * (u33 - u3) : 1.507 mm
» stazeni vnitřniho otvoru objimky 1 , 2 * delta r2 : -0.187 mm
» stazeni vnejsiho otvoru objimky 1 , 2 * delta r3 : 0.294 mm
» roztazeni objimky 2 , 2 * delta r33 : 1.207 mm
» skutecny konstrukcni presah , 2 * delta rs2 : 1.658 mm
» pomer delta rc2/r3 : 0.010
» polomer r33 : 142.927 mm
» predpeti pd3 : 254.553 Mpa
» radialni tlak p3" / rad. tlak pri pd3 = 0 / : 108.731 Mpa

» teplota ohreву objimky 2 , T3 : 499.31 °C

```

```
DOSBox 0.74-3, Cpu speed: 3000 cycles, Frameskip 0, Progra...  
* NÁVRH LISOVNICE S DVEMI OBJIMKAMI *  
  
Zadáni :  
-----  
R(1) /mm/ = 22  
R(4) /mm/ = 200  
p1 /Mpa/ = 2460  
Sigma d1 /Mpa/ = 1620  
Sigma d2 /Mpa/ = 1525  
Sigma d3 /Mpa/ = 1525  
kappa1 = 0.5054  
kappa2 = 1  
kappa3 = 1  
Lodeho soucinitel beta 1 = 1.155  
Lodeho soucinitel beta 2 = 1.155  
Lodeho soucinitel beta 3 = 1.155
```

```
DOSBox 0.74-3, Cpu speed: 3000 cycles, Frameskip 0, Progra...  
* NÁVRH LISOVNICE S DVEMI OBJIMKAMI *  
  
Vysledky :  
-----  
* varianta 2 *  
  
R(2) = 38.70 mm  
R(3) = 96.25 mm  
p(2) = 1415.03 Mpa  
p(3) = 676.72 Mpa  
  
pomer r2 / r1 = 1.759  
pomer Ú1 / p1 = 0.659  
pomer Ú2 / p1 = 0.620  
pomer Ú3 / p1 = 0.620  
  
Chces vypocet presahu a teplot pouzdreni ( ano - 1 * ne - 2 )
```

```

DOS
BOX
DOSBox 0.74-3, Cpu speed: 3000 cycles, Frameskip 0, Progra...
-----
                VYPOCET RADIALNIHO PRESAHU V KONTAKTNI PLOSE A
                POTREBNYCH TEPLOT POUZDRENI MEZI LISOUNICI A OBJIMKOU 1
-----
Pozn. * index 1 je pouzivan pro lisounici, index 2 pro objimku 1
      * T2 - teplota objimky 1

* material 1 / material lisounice / : OCEL CSN 19436
* material 2 / material objimky 1 / : OCEL CSN 19733
* E 1 / modul pruznosti v tahu / ( MPa ) = 208000
* E 2 / modul pruznosti v tahu / ( MPa ) = 206000
* mi 1 / Poisonova konstanta / = 0.30
* mi 2 / Poisonova konstanta / = 0.30
* To / teplota okoli / ( °C ) = 20
* Tpop / teplota popousteni / ( °C ) = 570
* alfa 2s / soucinitel tepelne roztaznosti /
  ( zadej ve tvaru: ( A + B * T2 ) * C )
  A = 12.8
  B = 0.00133
  C = 0.000001
* alfa 2 / okamzity soucinitel tepelne roztaznosti /
  ( zadej ve tvaru: ( A + B * T2 ) * C )
  A = 12.8_

```

```

DOS
BOX
DOSBox 0.74-3, Cpu speed: 3000 cycles, Frameskip 0, Progra...
-----
                VYPOCET RADIALNIHO PRESAHU V KONTAKTNI PLOSE A
                POTREBNYCH TEPLOT POUZDRENI MEZI LISOUNICI A OBJIMKOU 1
-----
Vysledky :
-----
» deformace onejsiho polomeru lisounice u2 = delta r2 : 0.0014 mm
» deformace unitrniho polomeru objimky u22 = delta r22 : 0.1448 mm
» celkovy radialni presah , 2 * delta rc1 = 2 * (u2 + u22) : 0.292 mm
» stazeni unitrniho otvoru lisounice , 2 * delta r1 : -0.146 mm
» stazeni onejsiho otvoru lisounice , 2 * delta r2 : 0.144 mm
» roztazeni objimky , 2 * delta r22 : 0.148 mm
» skutecny konstrukcni presah , 2 * delta rs1 : 0.322 mm
» pomer delta rc1/r2 : 0.008
» polomer r22 : 38.554 mm
» predpeti pd2 : 234.048 Mpa
» radialni tlak p2" / rad. tlak pri pd2 = 0 / : 1180.980 Mpa
-----
» teplota ohrevu objimky 1 - vypoctena - , T2 : 382.13 °C
» teplota ohrevu objimky 1 - redukovana - , T2 : 382.13 °C
» teplota podchlazeni lisounice , T1 : 0.00 °C

```

```
DOS
FOX DOSBox 0.74-3, Cpu speed: 3000 cycles, Frameskip 0, Progra...
VYPOCET RADIALNIHO PRESAHU V KONTAKTNI PLOSE A
POTREBNYCH TEPLOT POUZDRENI MEZI OBJIMKOU 1 A OBJIMKOU 2
* material 3 / material objimky 2 / : OCEL CSN 19733
* E 2 / modul pružnosti v tahu / ( MPa ) = 206000
* E 3 / modul pružnosti v tahu / ( MPa ) = 206000
* mi 2 / Poisonova konstanta / = 0.30
* mi 3 / Poisonova konstanta / = 0.30
* To / teplota okolí / ( °C ) = 20.00
* Tpop / teplota popouštění / ( °C ) = 570
* alfa 3s / součinitel tepelné roztažnosti /
  ( zadej ve tvaru: ( A + B * T3 ) * C )
  A = 12.8
  B = 0.00133
  C = 0.000001
* alfa 3 / okamžitý součinitel tepelné roztažnosti /
  ( zadej ve tvaru: ( A + B * T3 ) * C )
  A = 12.8
  B = 0.00266
  C = 0.000001
-----
```

```
DOS
FOX DOSBox 0.74-3, Cpu speed: 3000 cycles, Frameskip 0, Progra...
VYPOCET RADIALNIHO PRESAHU V KONTAKTNI PLOSE A
POTREBNYCH TEPLOT POUZDRENI MEZI OBJIMKOU 1 A OBJIMKOU 2
Vysledky :
-----
» deformace vnejsiho polomeru 1.objimky u3 = delta r3 : -0.0883 mm
» deformace vnitřniho polomeru 2.objimky u33 = delta r33 : 0.6016 mm
» celkový radiační přesah , 2 * delta rc2 = 2 * (u33 - u3) : 1.027 mm
» stážení vnitřniho otvoru objimky 1 , 2 * delta r2 : -0.330 mm
» stážení vnejsiho otvoru objimky 1 , 2 * delta r3 : 0.373 mm
» roztážení objimky 2 , 2 * delta r33 : 0.650 mm
» skutečný konstrukční přesah , 2 * delta rs2 : 1.129 mm
» pomer delta rc2/r3 : 0.011
» polomer r33 : 95.737 mm
» předpetí pd3 : 367.650 Mpa
» radiační tlak p3" / rad. tlak při pd3 = 0 / : 309.067 Mpa
-----
» teplota ohřevu objimky 2 , T3 : 478.43 °C
```