



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA PŘEVODOVÉ HŘÍDELE OBJEMOVÝM TVÁŘENÍM ZA TEPLA

PRODUCTION OF GEAR SHAFT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Zahálka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Miroslav Jopek, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Tomáš Zahálka
Studijní program:	Strojírenská technologie
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	Ing. Miroslav Jopek, 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:

Výroba převodové hřídele objemovým tvářením za tepla

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o návrh technologie výroby hřídele technologií objemového tváření za tepla s užším zaměřením na metodu příčného klínového válcování.

Cíle diplomové práce:

1. Vypracovat literární studii se zaměřením na technologii objemového tváření za tepla.
2. Zhodnotit současný stav výroby součásti obdobného tvaru.
3. Navrhnout vlastní technologii výroby včetně posouzení jednotlivých variant.
4. Vypracovat výkresovou dokumentaci nástroje včetně nezbytných výpočtů.
5. Zpracovat technické a ekonomické hodnocení navržené technologie.
6. Závěry a doporučení pro průmyslovou praxi.

Seznam doporučené literatury:

HOSFORD, William F. and Robert M. CADDEL. Metal Forming: Mechanics and Metalurgy. 3th ed. New York: Cambridge University Press. 2007. 365 s. ISBN 978-0-521-88121-0.

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: Akademické vydavatelství CERM, s. r. o., 2006. 217 s. ISBN 80-214-2374-9.

ASM-Metals Handbook: Formig and Forging. Vol.14. USA ASM International. 2004. 978 s ISBN 0-87170-020-4.

LIDMILA, Zdeněk. Teorie a technologie tváření II. Brno: Univerzita obrany, 2008. 106 s. ISBN 978-80-7213-580-2.

NOVOTNÝ, Karel. Tvářecí nástroje. 1. vyd. Brno: Nakladatelství VUT v Brně. 1992. 186 s. ISBN80-214-0401-9.

ZÁLEŠÁK, Jan. Příčné klínové válcování. Brno: CVTS Dům techniky Brno, 1972. 207 s. DT 07/485/72.

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 je zaměřena na návrh výroby polotovaru převodové hřídele, s bližším zaměřením na metodu příčného klínového válcování. Vyráběná součást s největšími rozměry Ø80 mm a délce 322,7 mm je z oceli 15 230, o celkové sérii 200 000 kusů za rok. Práce se nejdříve zaměřuje na teoretickou část, ve které je podrobně udělána rešerše zmíněné technologie, jež patří mezi metody objemového tváření za tepla. Následuje praktická část s potřebnými technologickými výpočty, návrhem nástroje, jeho ověření simulací a technicko-ekonomické zhodnocení. Nástroj je konstruován jako zakroužený, skládá se z horní a spodní části, které mají shodný smysl rotace, a je dvouoperační. Vývalek se stane ziskový po dosažení 186 517. kusu, při ceně 368 Kč/ks.

Klíčová slova

příčné klínové válcování, válcování, objemové tváření za tepla, vývalek, ocel 15 230, válcovačka ULS 100 RA

ABSTRACT

The work is focused on the design of the production of the transmission shaft semi-finished product, with a closer focus on the transverse wedge rolling method. The manufactured part with the largest dimensions of Ø80 mm and length of 322.7 mm is made of steel 15,230, with a total series of 200,000 pieces per year. The work first focuses on the theoretical part, in which the mentioned technology, which belongs to the volume hot forming methods, is researched in detail. This is followed by a practical part with the necessary technological calculations, tool design, its verification by simulations and technical-economic evaluation. The tool is designed as a circle, consists of an upper and a lower part that have the same sense of rotation, and is dual-operation. The roll becomes profitable after reaching 186 517 pieces, at a price of CZK 368 per piece.

Keywords

cross-wedge rolling, rolling, hot forming, roll out, steel 15 230, rolling machine ULS 100 RA

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZAHÁLKA, Tomáš. *Výroba převodové hřídele objemovým tvářením za tepla* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-17]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/154082>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Miroslav Jopek.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Výroba převodové hřídele objemovým tvářením za tepla vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

Brno, 17. 5. 2024

Brno, datum

Tomáš Zahálka

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Miroslavu Jopkovi, Ph.D za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce. Dále chci velmi poděkovat Ing. Milanu Mangerovi a Ing. Robertu Konečnému za praktické rady a konzultace. Na závěr chci vyjádřit obrovské poděkování rodině za podporu.

OBSAH

Zadání práce

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	10
1 ROZBOR ZADÁNÍ.....	11
1.1 Variantní řešení výroby	12
2 TECHNOLOGIE PKV	15
2.1 Možnosti využití PKV	16
2.2 Kinematika a napětí.....	18
2.3 Silové zatížení	20
2.3.1 Tvářecí síly	22
2.3.2 Kroučící momenty	23
2.4 Vady při válcování	25
2.4.1 Povrchové (vnější) vady	25
2.4.2 Vnitřní vady	27
2.5 Konstrukce nástrojů PKV	28
2.5.1 Rozdělení	29
2.5.2 Volba úhlů a aktivní otáčky	31
2.5.3 Konstrukce ploch	33
2.5.4 Nožové držáky a nože	36
2.5.5 Přesnost, tolerance a přídavky	37
2.5.6 Vhodné materiály a životnost	39
3 NÁVRH VÝROBY	41
3.1 Rozvržení nástroje	43
3.2 Technologické a konstrukční výpočty nástroje	46
3.2.1 Kinematika a stykové plochy	47
3.2.2 Rozměry ploch.....	49
3.2.3 Tvářecí síly	52
3.2.4 Kroučící moment.....	53
3.3 Zvolení stroje.....	53
3.4 Konstrukce nástroje	54
3.4.1 Konstrukce nožů a držáků	58

3.4.2	Upínání nástroje.....	60
3.4.3	Simulace	61
4	Technicko-ekonomické zpracování	63
	ZÁVĚR.....	66

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam příloh

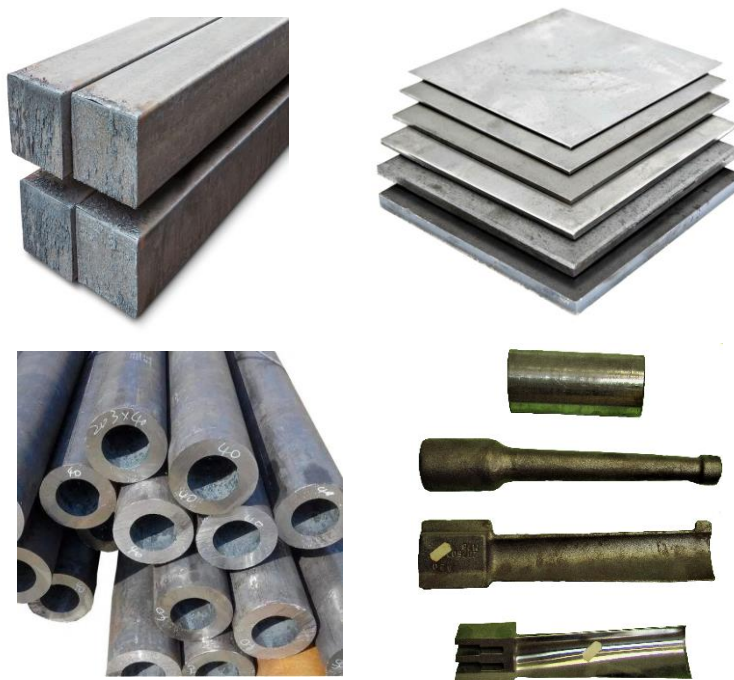
Seznam výkresů

ÚVOD

V současné době náleží tváření stále mezi nejprogresivnější a nejzastoupenější technologie napříč celým strojírenským průmyslem. Nabízí celou řadu benefitů: minimální odpad, nízké náklady na výrobu ve velkosériové a hromadné produkci, poměrně snadná automatizace, vysoká produktivita práce, pozitivní dopad na mechanické vlastnosti výrobků. Smyslem tváření je plastická přeměna tvaru za silového působení nástroje, a to buď za studena nebo za tepla (ohřev zpracovávaného materiálu). [1; 2; 3]

Tváření lze dělit dle druhu polotovaru na plošné (plech jako výchozí polotovar) a objemové (tyče, bramy, špalíky jako výchozí polotovary) s poddruhy: za studena a za tepla, zkráceně OTS a OTT. [4; 5; 6]

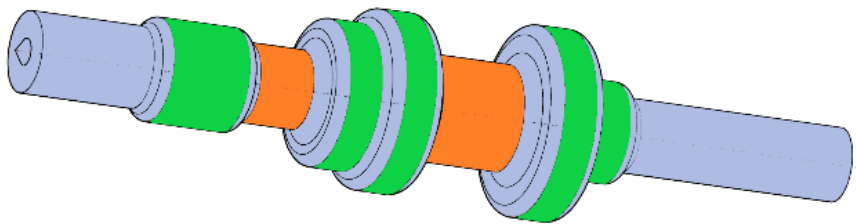
K poslednímu zmíněnému patří válcování, což je technologie používající se z valné části ke zpracování hutnických polotovarů (ingoty, kontislitek), anebo k výrobě tzv. předvalků. Ty dále slouží například v kovárnách, tažárnách a jiných kovozpracujících podnicích. Válcovny lze dělit dle druhu výrobku anebo postavení os válců. Nejvíce zastoupené jsou válcovny používající ploché kalibry, dva ploché válce uložené rovnoběžně nad sebou, které se používají k výrobě plechů. Tvarový materiál se vyrábí na profilových kalibrech. Dále se často vyskytuje kosé válcování, které má dva kuželové válce umístěné pod úhlem vůči sobě, přičemž během procesu dochází i děrování otvoru pomocí trnu. Osy válců jsou uloženy mimoběžně vůči ose trnu. Tímto způsobem se vyrábějí hlavně trubky, do průměru až 250 mm. Poslední metodou je příčné klínové válcování, které má osy válců rovnoběžné s osou vývalku. Proces tváření probíhá pomocí klínů umístěných na pláštích tělesa nástroje. Dochází k redukci průřezů a protahování v axiálním směru. Na obr. 1 jsou příklady válcovaných výrobků. [6; 7; 8; 9]



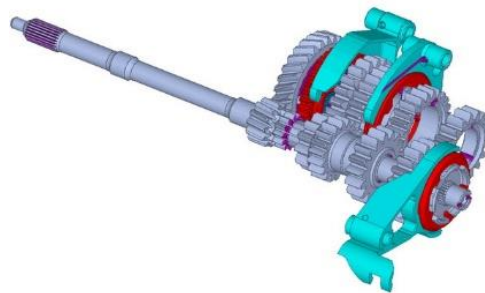
Obr. 1 Příklady válcovaných výrobků [10; 11; 12].

1 ROZBOR ZADÁNÍ

Řešenou problematikou je návrh výroby polotovaru převodového hřídele, viz model na obr. 2. Autor práce se nebude zabývat konstrukcí polotovaru, pouze konstrukcí nástroje. Produkce se odhaduje na více než 200 000 kusů za rok, jelikož je polotovar vhodný pro více modelů převodovek. Hřídel se nalézá v převodovce automobilu, viz ukázka na obr. 3. Slouží k přenášení krouticího momentu pomocí ozubení, jež jsou vyfrézována na jejím povrchu v příslušných místech. V převodovce mění výstupní rychlost pomocí přeřazení na jiný převodový stupeň, čímž se změní obvodová rychlost, anebo dojde ke změně smyslu otáček. Během provozu musí hřídel, potažmo převodovka, přenášet stále vysoké otáčky motoru, aby se využilo co nejvyššího výkonu, nehledě na stav povrchu, hmotnost auta a vnější činitele, ovlivňující jízdu (valivý odpor, náklon/sklon vozovky apod). [13; 14; 15; 16]

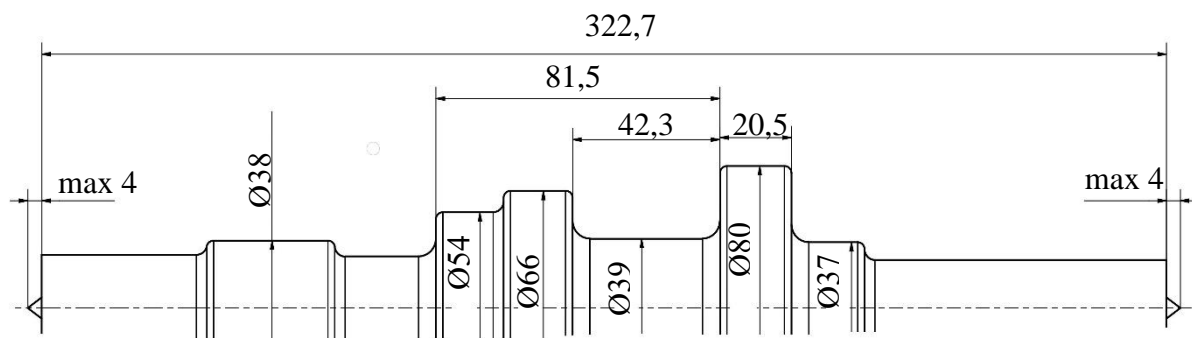


Obr. 2 Polotovar hřídele.



Obr. 3 Model převodovky [17].

Polotovar hřídele se skládá z pěti odstupňovaných válců (obr. 4), které mají průměry o velikostech 38 mm, 54 mm, 66 mm, 80 mm a 37 mm, s tolerancí ± 1 mm (na obr. 2 označené zelenou barvou). Celková délka hřídele je 322,7 mm, šířka jednotlivých osazení se pohybuje v rozmezí 20 až 40 mm. Důležitým prvkem jsou rádiusy R5 a R3 v přechodech stěna válce - dřík, jelikož se jedná o koncentrátoři napětí, proto při výrobě musí být dodržen jejich rozměr. Na čelních stranách koncových dříků jsou čtyřmilimetrové výstupky, jedná se o maximální povolený přebytek materiálu.



Obr. 4 Základní kóty polotovaru.

Zajímavým prvkem je osazení uprostřed hřídele (\varnothing 39 mm) a v její levé části (\varnothing 29 mm), viz oranžová barva na obr. 2. Daný prostor pravděpodobně slouží k umístění řadicí vidlice, která pohybuje řadicí objímkou, snižuje hlučnost převodovky a napomáhá k hladšímu řazení mezi dvěma ozubenými koly [16; 17]. Šedivé dřívky (obr. 2) jsou nejspíše určeny k uložení v ložiskách. Zelené plochy označují místa, na nichž bude buď vyfrézováno ozubení, sloužící ke změně převodového poměru a tím pádem k řazení, anebo se plochy obrobí na požadovanou drsnost povrchu s předepsanými geometrickými tolerancemi, na které se následně zalisují náboje ozubených kol, případně ložiska.

Materiál hřídele byl již předem vybrán ve spolupráci s externím konzultantem. Jedná se chrom vanadovou ocel značenou 15 230 (podle ČSN 41 5230). Ekvivalent dle německé normy je 32CrMo12 [18]. Spadá do třídy ocelí, které se zušlechťují nebo povrchově kalí, lze je i nitridovat. Za tepla dobře tvárná, ve stavu žíhaném na měkko je dobře obrobitelná. Využívá se k výrobě bezešvých trubek, namáhaných svařovaných konstrukcí a velmi namáhaných strojních součástí s vysokou pevností (klikové hřídele, ojnice, hnací nápravy apod.). Tab. 1 uvádí rozsah chemického složení. V tab. 2 jsou uvedeny jak mechanické, tak fyzikální vlastnosti. [19; 20; 21; 22]

Tab. 1 Chemické složení v % [23].

C	Mn	Si	Cr	V	P	S
0,24-0,34	0,4-0,8	0,17-0,3	2,2-2,5	0,1-0,2	< 0,035	< 0,035

Tab. 2 Mechanické vlastnosti [23].

R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A ₅ [%]	Z [%]	HB	Svařitelnost
566	782	43	23	223	dobrá

1.1 Variantní řešení výroby

Součást je rotačního tvaru s několika odsazeními, proto ji lze zařadit mezi tvarově jednoduché díly, jednoduché na výrobu. Mezi nejdůležitějšími faktory výběru vhodné technologie beze sporu patří ekonomická náročnost, návratnost financí, délka výrobních (strojních) časů a disponibilita strojového parku podniku. Následuje přehled vybraných technologií, včetně komentáře o vhodnosti použití:

- Odlévání – roztavená vsázka se nalije do formy (obr. 5), která odpovídá negativu výrobku. Během tuhnutí může dojít ke vzniku napětí, čímž dochází k negativnímu ovlivnění funkčnosti odlitku. Při zatěžování se snadno dojde k plastickým deformacím, k porušení soudržnosti materiálu. Rozdílné napětí vychází z nehomogenity vnitřní struktury. Je vyvolaná odlišnou rychlostí chladnutí dvou různě objemných částí, u polotovaru hřídele se jedná hlavně o přechod \varnothing 39 mm na \varnothing 80 mm. Materiál hřídele není vhodný k odlévání. Vzhledem k lici struktuře ocel nevydrží dynamické



Obr. 5 Příklad odlévání [27].

mechanické namáhání. Z výše uvedených důvodů není odlévání vhodná výrobní technologie. [24; 25; 26]

- Třískové obrábění – spočívá v oddělování materiálu z povrchu obráběného polotovaru, obrobku, po jednotlivých vrstvách, za silového působení nástroje ve tvaru klínu. K výrobě surové hřídele je nejvhodnější soustružení – rotační pohyb koná obrobek, zatímco nástroj se pohybuje v podélném a příčném směru vzhledem k ose vřetena, viz obr. 6. Mezi velké výhody patří relativně snadné replikování tvaru produktu a rychlá změna výrobního cyklu, lze dosáhnout velmi kvalitních povrchů, geometrických a tvarových tolerancí, přesnost hrubování se pohybuje v rozmezí IT 11 až 14, o drsnosti Ra až 12,5 μm . Ocel spadá do třídy obrobitelnosti 13 b, což značí horší obrobitelnost. Vlivem oddělování třísek po vrstvách dochází ke snižování mechanických vlastností (primárně odolnost vůči lomu). Navíc zde vzniká značné množství odpadu, kolem 76 % hmotnosti polotovaru, což výrazně snižuje produktivitu. Proto ani tato technologie není vhodná jako výrobní, avšak bude použita jako dokončovací. [5; 26; 28]



Obr. 6 Příklad soustružení [29].

- Kování na kovacíh válcích – ohřátý materiál se vloží mezi válce, tzv. kalibry. Jejich otočením dojde ke tváření polotovaru, dochází k redukci dle negativu segmentů. Manipulace mezi dílčími částmi nástroje značně prodlužuje výrobní časy a zvyšuje neefektivnost. Polotovar hřídele je tvarově obtížný na výrobu, kvůli $\varnothing 39 \text{ mm}$, a proto není technologie vhodná. [30; 31]
- Protlačování – dochází zde k silovému působení čela nástroje na špalík polotovaru, usazený ve spodním dílu nástroje, jak ukazuje obr. 7. Metoda má pozitivní dopad na mechanické vlastnosti (vznik tlakových napětí v materiálu). Velkou nevýhodou je velikost průtlačnice, která se umísťuje do zděří kvůli velikému tlaku, tudíž se zdražuje jeho výroba. Protlačováním nelze vyrobit $\varnothing 39 \text{ mm}$ a $\varnothing 29 \text{ mm}$, proto by musela být do výrobního procesu zařazena doplňková operace, která vede k dalšímu zdražení výroby, prodloužení výrobních časů a tím pádem k navýšení ceny polotovaru hřídele. Z výše zmíněného vyplývá, že technologie nevyhovuje požadavkům. [5; 6; 30]



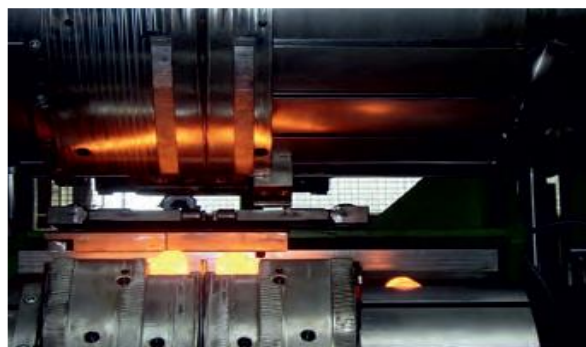
Obr. 7 Příklad protlačování za tepla [32].

- Zápustkové kování – zde opět technologie pracuje s ohřátým polotovarem, který je vložen do dutiny zápustky a přetváří se jeho příčný průřez, jak ukazuje obr. 8. Díky teplotě ohřevu a principu kování není materiál oddělován, ale usměrňován dutinou, čímž se vytvarují a nahustí vlákna v oceli. Výkovek získává lepší mechanické vlastnosti, a zároveň se zvyšuje odolnost proti vzniku trhliny. Nevýhodou je počet operací, které předcházejí konečnému výkovku, prodlužují se výrobní časy kvůli mezioperačnímu přesouvání polotovaru a doplňkové technologii (odstřížení výronku). Zdražuje se výroba nástroje kvůli vysokému podílu spotřebovaného nástrojového materiálu. Z uvedených důvodů není technologie zvolena jako výrobní. [6; 33]



Obr. 8 Příklad kování [35].

- Příčné klínové válcování – spojuje výhody zápustkové kování (usměrnění vláken) a válcování (vysoká rychlost výroby). Polotovar se založí mezi dva válce osazené dvoudílným nástrojem. Tváření se provádí pomocí klínů, které materiál redukují a zároveň přesouvají k okrajům (protahování v axiálním směru), viz obr. 9. Mezi přednosti patří rychlost, snadná automatizace, což nabízí velký potenciál ve velkosériové a hromadné výrobě, při správném nastavení jsou pouze minimální přídatky na obrábění, což vede ke snížení výrobních časů, a minimální odpad. [6; 7; 34]
 - Při bližším zkoumání vyplývá, že PKV vychází z kombinace radiálního kování (materiál se redukuje v radiálním směru na průřez – kovátko jsou umístěna po vnějším obvodu a konají přímočarý vratný pohyb, kovaný materiál koná rotační a přímočarý pohyb) a kování váců (materiál se přemísťuje do stran – nástroj má tvar válce a koná rotační vratný pohyb). Oproti výše uvedených technologiím však PKV přemísťuje objem materiálu ze středu do krajů, a to primárně v axiální ose polotovaru, za současné redukce největšího průměru. [6; 7]



Obr. 9 Příklad PKV.

Příčné klínové válcování bylo zvoleno jako nejvhodnější výrobní technologie, a to s ohledem na tvar polotovaru vyráběného polotovaru hřídele a dostupnost strojového parku závodu. Bude následovat komplexní rozebrání teoretických aspektů metody. Praktická část bude zaměřena na konstrukci nástroje, nikoliv vývalku.

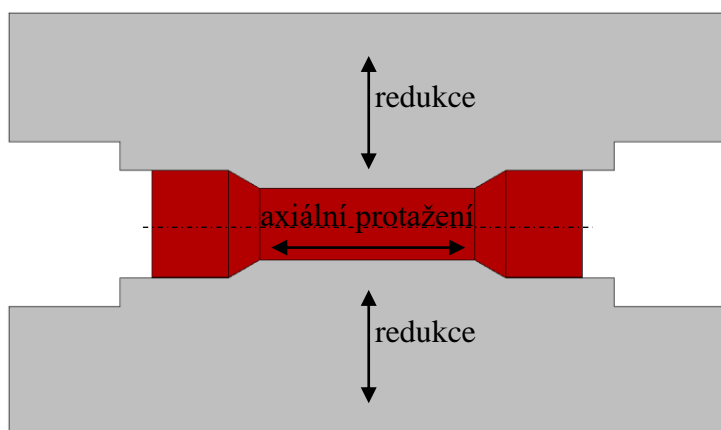
2 TECHNOLOGIE PKV

Příčné klínové válcování patří mezi procesy, které produkují nikoliv hotový výrobek ale polotovary, určený k dalšímu zpracování, tzv. vývalek. Dá se použít například jako nultá operace u zápusťkového kování, protože lze docílit lepšího „ideálního“ předkovu, tedy polotovaru, jenž snižuje spotřebu materiálu a nejvíce se blíží konečnému tvaru produktu, viz obr. 10. Nebo velmi často slouží jako první/nultá operace před obráběním, kdy šetří materiál a zároveň zlepšuje jeho mechanické vlastnosti. V tomto případě se jedná hlavně o rotační součásti jako jsou hřídele, tyčinky apod. [6; 36; 38]



Obr. 10 Příklad použití PKV.

Tvářecí proces spočívá v přenášení rotace z pracovních válců, osazených nástrojem, na polotovary za současného zanořování klínů nástroje do polotovaru. Vše se děje za tepla, tzn. polotovary je ohřátý na kovací teplotu. Vytlačena masa materiálu se redukuje, snižuje svůj příčný průřez, a prodlužuje v axiálním směru, jak ukazuje obr. 11. Přebytečný materiál v podobě odpadu se utváří na koncích vývalku v podobě kotoučů, jenž jsou na závěr procesu odstraněny speciálními noži. Nástroje jsou v podstatě navinuté klíny na ploše válce, jednotlivé trajektorie (na vývalku si je lze představit jako dílčí odstupňování) pak jsou šroubovice definované úhlem stoupání a průměrem. Polotovarem může buď špalík anebo celá tyč, která se postupně krátí v nástroji po doválcování vývalku. [6; 7; 36; 37]



Obr. 11 Tok materiálu.



Obr. 12 Smysl otáčení [34].

Výše popsaný proces probíhá mezi dvěma válci, kdy každý je osazen totožným nástrojem, se shodným směrem otáčení, viz obr. 12. Horní část je navíc opatřena nakládací částí s dorazem, aby byla zaručena přesná poloha vývalku. Používá se pouze horní doraz, aby vývalek mohl volně vypadnout z pracovního prostoru dál, například na dopravník nebo sběrnou krabici. Na spodním nástroji se nachází pouze nakládací plocha. [6; 36]

Vstupní kritérium vhodnosti PKV jako výrobní technologie se používá výpočet redukce. Pokud je velikost redukce pod 80 %, lze danou součást zpravidla vyrobit během jedné operace. Samozřejmě tvrzení je velmi zjednodušené, neboť záleží i na tvarové složitosti a velikosti vývalku. Redukce se vypočte dle vztahu [7]:

$$\varepsilon = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \cdot 100 = \frac{\frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d_1^2)}{\frac{\pi}{4} \cdot D^2} \cdot 100 = \frac{D^2 - d_1^2}{D^2} [\%], \quad (2.1)$$

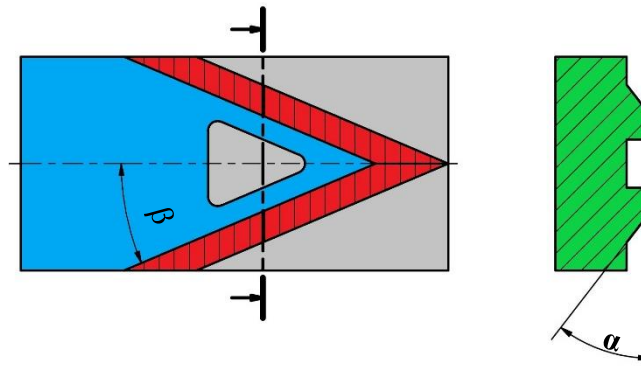
kde: S_0 – plocha původního příčného průřezu [mm^2],
 S_1 – plocha konečného příčného průřezu [mm^2];

Dalším možným parametrem používaným jak ve výpočtech, tak k ověření vhodnosti je deformační poměr, viz následující vzorec [38]:

$$\delta_i = \frac{D}{d_i} [-], \quad (2.2)$$

kde: D – původní průměr polotovaru [mm],
 d_i – konečný dílčí průměr vývalku [mm].

Po výše zmíněných výpočtech následuje volba úhlů, jež jsou nutné pro zaručení správného procesu tváření. Jelikož se nástroj skládá z klínu, prvním úhlem je takzvaný vnikací úhel β , někde bývá nazýván úhlem klínu. Má největší vliv na rychlost posunu materiálu v axiálním směru. Dále se na nástroji nachází tvářecí úhel α , díky kterému dochází k samotné deformaci, zhutňuje materiál a současně se nejvíce podílí na silovém zatížení celého tvářecího procesu. Oba úhly jsou znázorněny na obr. 13. [36; 37; 38]



Obr. 13 Válcovací úhly.

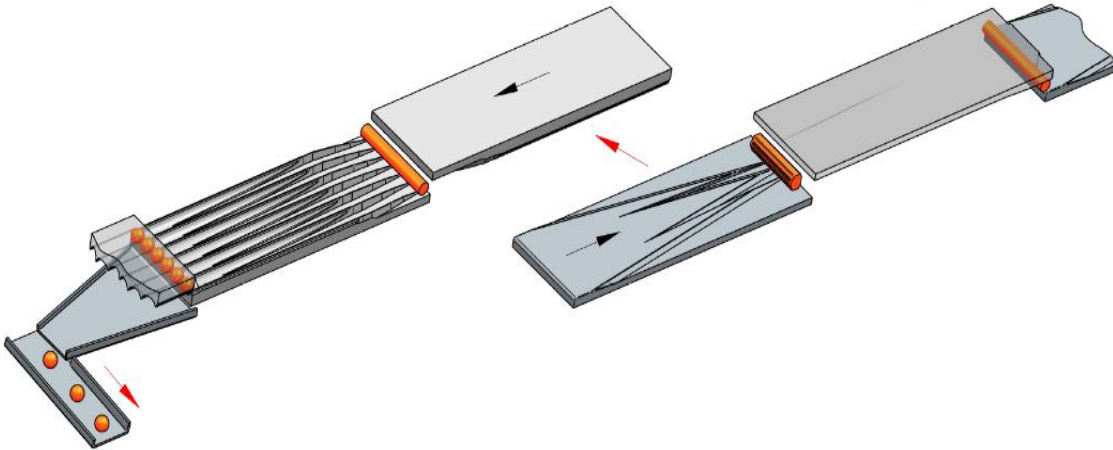
2.1 Možnosti využití PKV

Technologie PKV se používá přednostně na výrobu polotovarů určených k dalšímu zpracování jinými metodami, jako je například obrábění či zápustkové kování. Důvodem je velká úspora materiálu, činící 20–50 %, nebo zefektivnění výroby, kdy za jednotku času se vyprodukuje několikanásobně více kusů (až $20 \text{ ks} \cdot \text{min}^{-1}$). [40]

Nejčastější využití takto vyrobených polotovarů je možné najít v automobilovém průmyslu na výrobu hřídelových součástí, u kterých se obrábí pouze minimální přídavek. Dalším významným odběratelem jsou podniky zaměřené na objemové tváření. Dříve se technologie používala například k produkci polotovarů pro stranové klíče.

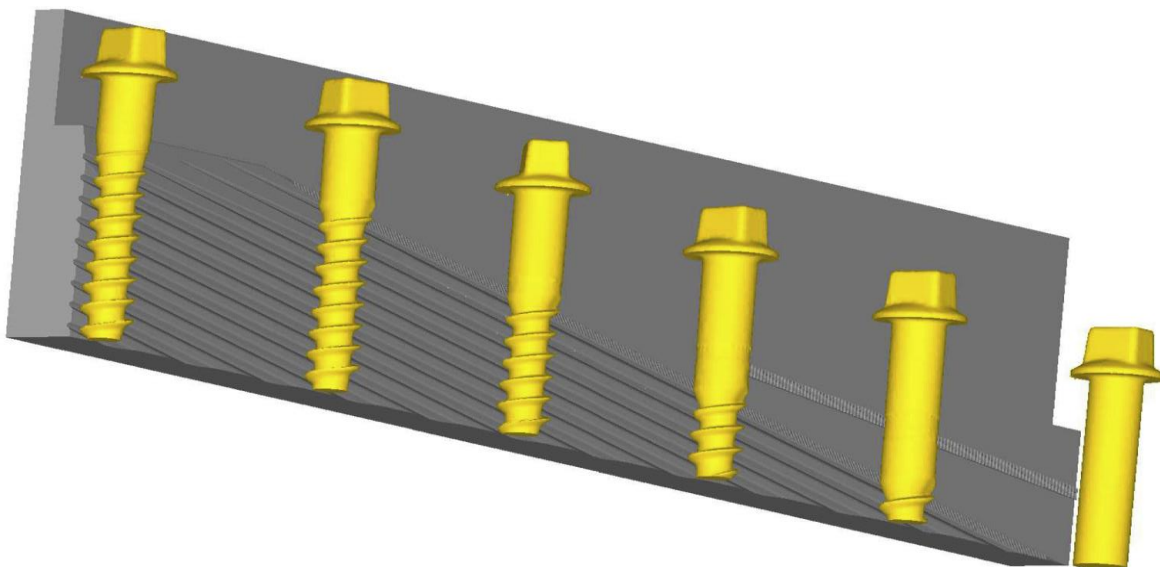
V roce 2017 probíhala v Polsku optimalizace výroby mlecích těles, tvaru koulí, používaných k drcení cementu. Byly vyrobeny z hlav starých kolejnic a v rámci projektu se řešilo, jak zefektivnit jejich přetvoření. Původně se používaly kovací lisy, kdy se uříznutá hlava nahřála a v zápustce rozkovala na požadovaný tvar. Postup měl několik nevýhod, jednak se vždy

vyrobito pouze jedno mlecí tělísko, jednak byly poměrně dlouhé výrobní časy a tvořil se velký odpad v podobě výronku, nemluvě o zapojení další ostříhovací operace. Po optimalizaci proces výroby tělísek vypadá následovně – odřízne se hlava od těla kolejnice, ta putuje do indukční pece, kde se ohřeje na kovací teplotu, pak se spěchuje po podélné ose tak, aby se co nejvíce přiblížila k oválnému průřezu, jako finální operace se použije modifikované příčné klínové válcování ve dvou operacích – nejprve se použije nástroj na vyvácování válce a následně se tento polotovar prožene dalším nástrojem, v němž vzniknou samotná kulatá mlecí tělíska. Modifikované PKV spočívá v použití rovného deskového nástroje (tzv. „flat tool“), který koná přímočarý vratný pohyb a nikoliv rotační, jak ukazuje obr. 14. [6; 41; 42]



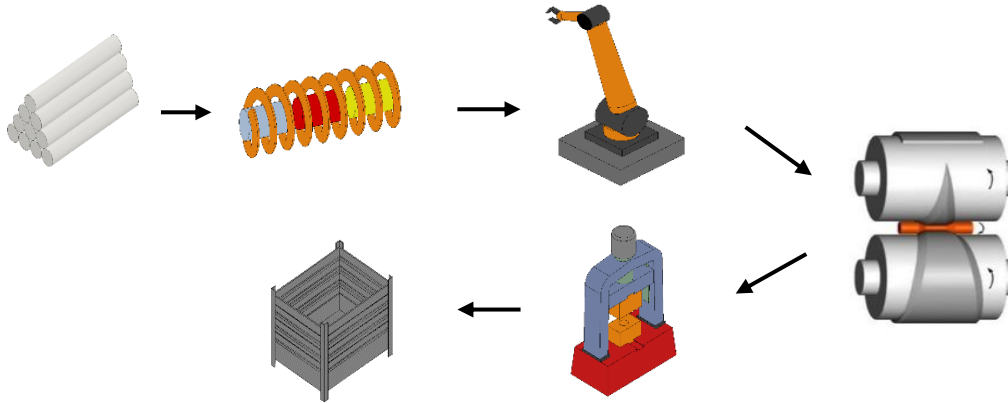
Obr. 14 Válcování mlecích těles [41].

Netradičním použitím je produkce vrutů, které se používají k upevnění kolejnice do pražce. Původní výroba byla rozdělena do dvou fází, nejprve se napěchovala hlava s čtvercovým průřezem; následně se závit vyválcovává na stolici s třemi válci, jejichž pláště tvořily drážky budoucího závitu. Vlivem proměnlivého tahového napětí a tečení materiálu vznikala ve středu vrutu dutina, která se zároveň projevovala na čele. Nový postup zefektivnil výrobu a snížil výskyt neshodných kusů. Špalík se na obou koncích nahřeje, hlavy vrutů se napěchují do požadovaného tvaru. Samotný závit se vyválcuje pomocí PKV. Vždy vzniká dvoj kus, který se po doválcování musí rozdělit. Drážky na nástroji mají shodný úhel se stoupáním závitu na dřívku vrutu. Výše popsaný proces válcování ukazuje obr. 15. [38; 43]



Obr. 15 Válcování vrutů do pražců [38].

PKV se nejčastěji vyskytuje v tzv. kovací buňce, ve které se produkt vyrobí na jeden ohřev, v případě složitějších/ větších kusů na dva. Na začátku je umístěn zásobník špalíků, které putují do pece (typ závisí na taktu linky), odtud je obsluha/robot přepraví do válcovačky a dále do kovacího a ostříhovacího stroje, na závěr se vše ukládá do beden, kde výrobky chladnou a expedují se. Výše popsaná buňka je schematicky znázorněna na obr. 16. [6]



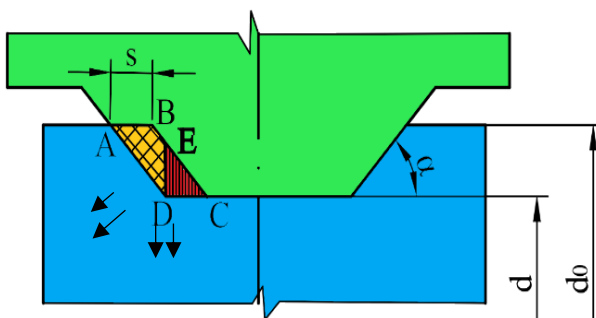
Obr. 16 Válcovací linka.

2.2 Kinematika a napětí

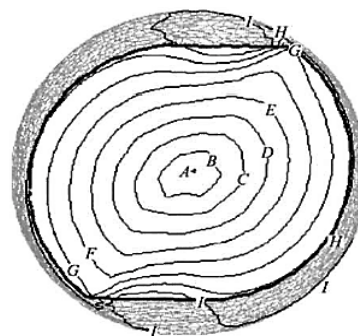
Kinematika příčného válcování se skládá z rotace okolo podélné osy tvářence, na stykových plochách musí být dostatečně vysoký koeficient tření (např. se zdrsňuje povrch drážkami) kvůli zajištění odvalování polotovaru. Během rotace vývalku se prodlužuje materiál v axiálním směru a zároveň se redukuje v příčném průřezu. Díky rotaci a styku kontaktní šikmé klínové plochy s polotovarem je masa materiálu rozdělena na dva proudy [36; 38]:

- i. část CDE na obr. 17, kde dochází ke vtláčování neboli redukcí;
- ii. část ABE na obr. 17, která má tendenci se vytlačovat na okraje polotovaru, a tudíž se zvětšuje průřez. Bylo experimentálně zjištěno, že se zvyšující se deformací se nenavysuje objem materiálu v koncových částech polotovaru (vznik odpadu).

S výše uvedenými body zároveň platí, že deformace v blízkosti podélné osy vývalku je homogenní. Pomocí FEM bylo zjištěno, že se tok pohybuje primárně v obvodových vrstvách, směrem ke středu se dochází ke snížení, jak ukazuje obr. 18. K samotnému přemísťování materiálu dochází pouze tam, kde působí klínová část nástroje. Na stykových plochách mezi nástrojem a polotovarem se projevují jednak největší deformace a zároveň nejvyšší rychlosti toku. Tento jev je způsoben ulpíváním materiálu díky vysokému tření. Predikování deformace, která vychází z toku materiálu, je možné uskutečnit na základě zavedení ekvivalentní efektivní deformační křivky, která popisuje chování materiálu ve třech bodech: bod K – na povrchu vývalku; bod M – v polovině poloměru vývalku; bod C – v ose vývalku; viz obr. 19. [38; 44]



Obr. 17 Pohyb materiálu [38].



Obr. 18 Ulpívání ve vrstvách [44].

Jelikož PKV patří mezi válcovací procesy, je zapotřebí k němu stanovit příslušné kinematické vztahy, které vycházejí z podstaty tvářecího procesu. Patří sem:

- počet otáček n nutných k dosažení potřebné deformace, jež vycházejí z deformačního poměru δ [38]:

$$n = \frac{R}{6 \cdot \pi \cdot r_t \cdot \tan \alpha \cdot \tan \beta} \cdot \frac{\delta^3 - 1}{\delta} \quad (2.3)$$

kde: R – větší poloměr válcované tyče z dvojice [mm],
 δ – deformační poměr [-] Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.,
 α – tvářecí úhel [°], viz obr 14,
 r_t – válcovací poloměr [mm],

$$r_t = \lambda \cdot R \quad (2.4)$$

kde: λ – válcový koeficient [-],

$$\lambda = (2,587 - 1,557 \cdot \delta^{0,3528}) \cdot (0,00355 \cdot \alpha + 0,927) \cdot \beta^{0,0568} \quad (2.5)$$

- čas t , potřebný pro dokončení procesu válcování [38]:

$$t = \frac{R}{3 \cdot v_N \cdot \tan \alpha \cdot \tan \beta} \cdot \frac{\delta^3 - 1}{\delta} \quad (2.6)$$

kde: v_N – rychlost nástroje [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

- veličina s , jež značí posunutí stopy za jednu půlotáčku tvářence, čímž zároveň vyjadřuje prodloužení dřívku za jednu půlotáčku, viz obr. 19 [36]:

$$s = \pi \cdot R \cdot \tan \beta \quad (2.7)$$

- válcovací krok u , neboli relativní překrytí redukční části nástroje a redukované plochy tvářence v jeho axiálním směru, jak ukazuje obr. 19 [7; 36]:

$$u = k^2 \cdot \pi \cdot R \cdot \tan \beta \quad (2.8)$$

kde: k – substituce z rovnice (2.9)

$$r = k \cdot R \quad (2.9)$$

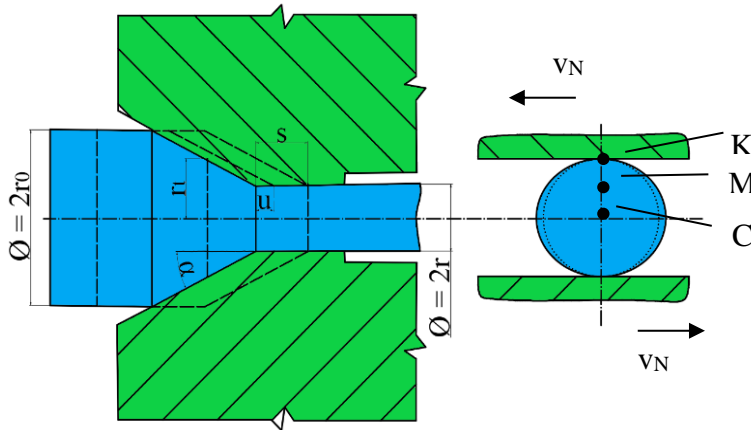
Ze vzorce vyplývá, že válcovací krok je přímo úměrný velikosti úhlu klínu β a velikosti vyválcovaného průměru, respektive $2 \cdot r$. [36].

Vzhledem k charakteru příčného klínové válcování vzniká v tvářenci trojosý stav napjatosti, který je charakterizován tahovým napětím σ_1 v axiálním směru vývalku, tlakovým napětím σ_2 v radiálním směru a tahovým napětím σ_3 v tangenciálním směru, jak znázorňují obr. 20 a příloha 1. [36; 38; 45]

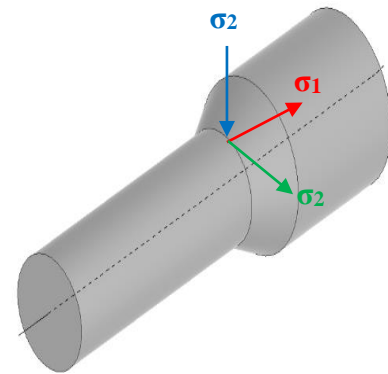
Zmíněná napětí jsou způsobena vnikáním nástrojového klínu do materiálu vývalku. Vzhledem k náročnému určení jejich průběhů v radiálním a tangenciálním směru, mnohé experimenty využili metody konečných prvků pro ověření teoretických studií, vzniklých v minulosti. Například [45] provedli sérii měření, při nichž dokázali, že geometrie nástroje (tvářecí úhel „ α “) a vnější podmínky (rychlost a koeficient tření) mají zásadní vliv na velikost napětí uvnitř vývalku. Na obr. 19 jsou vyznačeny body **C** (v ose vývalku) a **M** (ve středu poloměru vývalku), které popisují průběh napětí následovně [38; 45; 46]:

- Bod **C** – při přechodu vnikací nástroje do fáze tvářecí dochází k lokálnímu maximu tahového napětí σ_3 . Nárůst je způsoben zvyšující se redukcí spolu s růstem deformace. V tvářecí části dochází ke zmírnění průběhu napětí vlivem ustáleného toku materiálu.

- Bod M – periodicky se střídá tah a tlak, jejichž cyklus má tvar sinusoidy. Ve středu polotovaru však dochází ke koncentraci napětí cyklickým zatěžováním, což může vést ke vzniku trhlin a jejich případnému rozvoji. Při malém počtu cyklů, v řádu nižších stovek, trhliny jsou kvazistatického charakteru.



Obr. 19 Kinetmatika [36].



Obr. 20 Napětí ve tváření [45].

2.3 Silové zatížení

Silové poměry, působící během válcovacího procesu na materiál, nelze snadno stanovit. Například u stříhání je styková plocha mezi nástrojem a polotovarem předem dána požadovaným tvarem výstřižku. Samotná střížná síla je nejvíce ovlivněna délkou křivky stříhu, koeficientem, který zahrnuje vnější vlivy (otupení střížného nástroje, nerovnosti materiálu apod.), a mezí pevnosti daného materiálu [5].

U PKV je poměrně složité určení již samotných stykových ploch, které jsou zásadní pro výpočty tvářecích sil. Konstrukce nástroje, skládající se z klínové šroubové plochy navinuté na válcové ploše, vyžaduje použití odlišného postupu řešení výše zmíněných aspektů [Zálešáka].

Stykové plochy se skládají z paralelní (kalibrační část nástroje) a kuželové části, které se vztahují k podélné ose vývalku. Tvar, viz plocha ABCDE na obr. 21, a velikost závisí na geometrii nástroje (hlavně na tvářecím úhlu α), velikosti redukce, a hlavně na válcovacím kroku. [36; 38; 47]

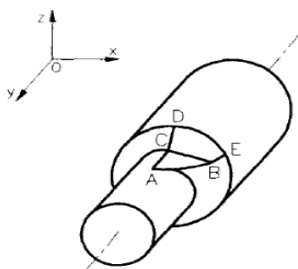
Jelikož válcování není ideálně tuhé, deformuje se tvářená oblast v tangenciálním směru, tudíž se zvětší styková plocha, viz obr. 22. K určení velikosti zvětšené oblasti se použije vztah [36]:

$$u_d = u \cdot k_d, \quad (2.10)$$

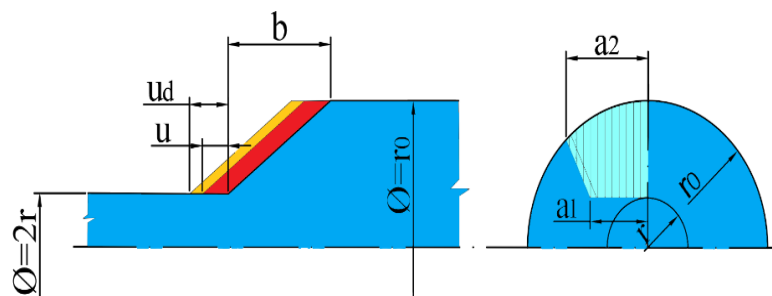
kde: u – válcovací krok [mm], viz rovnice (2.8),

k_d – koeficient zvětšení

$$k_d = 2,2 - k \quad (2.11)$$



Obr. 21 Styková plocha [47].



Obr. 22 Stanovení stykové plochy [36].

Důležitým prvkem geometrie nástroje je tvářecí úhel α , který definuje velikost přepony \mathbf{b} , jak ukazuje obr. 22. Styková plocha, respektive její tvar, souvisí s poměrem zvětšeného válčovacího kroku \mathbf{u}_a a velikostí přepony \mathbf{b} . Mohou nastat následující varianty [36; 38; 46]:

- a) $\mathbf{u}_a < \mathbf{b}$ – obr. 23 znázorňuje průřez stykových ploch, které jsou určeny podle kartézské souřadnicové soustavy. Velikosti průřezů jednotlivých ploch se vypočítají takto [36]:

- velikost vyrovnávací plochy nástroje v ose y:

$$S_p^{y1} = \frac{a_1 \cdot u_d}{2}, \quad (2.12)$$

kde: a_1 – výška trojúhelníka [mm],

$$a_1 = \sqrt{2 \cdot r \cdot v + v^2} \quad (2.13)$$

v – šířka pole [mm],

$$v = u_d \cdot \tan \alpha \quad (2.14)$$

- velikost redukční šroubové plochy nástroje v ose y:

$$S_p^{y2} = b \cdot \frac{a_1 + a_2}{2} - \frac{a_1 \cdot u_d}{2} \quad (2.15)$$

kde: b – přepona trojúhelníka č. 1 [mm]

$$b = \frac{R - r}{\tan \alpha} \quad (2.16)$$

a_2 – výška trojúhelníka č. 2 [mm],

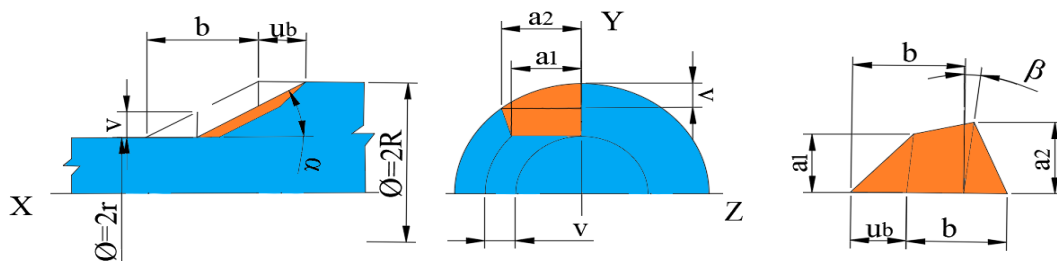
$$a_2 = \sqrt{2 \cdot R \cdot v - v^2} \quad (2.17)$$

- velikost stykové plochy do roviny kolmé k ose x:

$$S_p^x = \frac{a_2}{2} \cdot \left(R - r + \frac{v}{3} \right) + \frac{a_1}{2} \cdot (R - r - v) \quad (2.18)$$

- velikost stykové plochy do roviny kolmé k ose z:

$$S_p^z = S_p^x \cdot \tan \alpha \quad (2.19)$$



Obr. 23 Velikost ploch, když $\mathbf{u}_b < \mathbf{b}$ [36]

- b) $\mathbf{u}_a = \mathbf{b}$ – znázorněna na obr. 24. Velikost průřezu v ose z je shodná jako (2.19). Význam jednotlivých veličin je totožný s již výše zmíněným. Vztahy jsou následující [36]:

$$S_p^{y1} = S_p^{y2} = \frac{a_2 \cdot b}{2} \quad (2.20)$$

$$S_p^x = \frac{2}{3} \cdot a_2 \cdot (R - r) \quad (2.21)$$

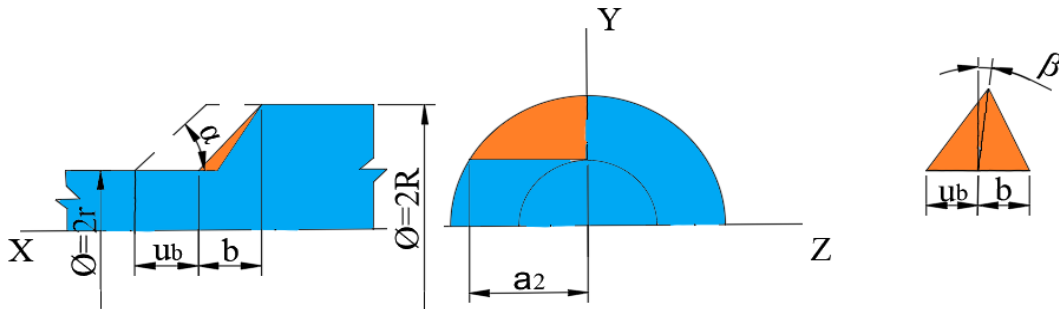
kde: a_2 – výška trojúhelníka č. 2 [mm],

$$a_2 = \sqrt{R^2 - r^2} \quad (2.22)$$

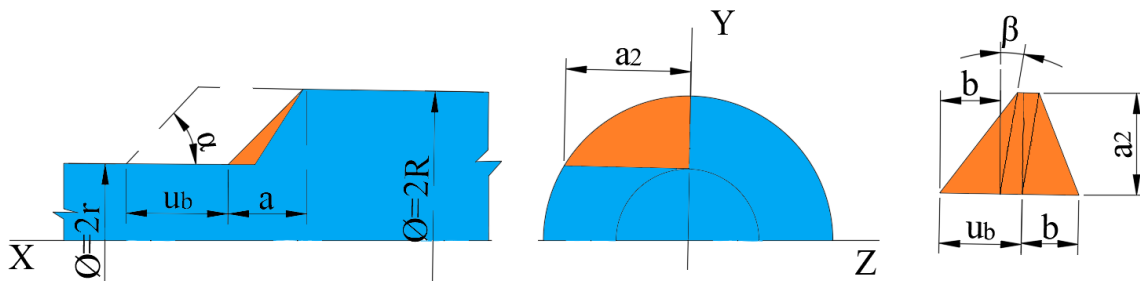
- c) $ua > b$ – vyobrazeny na obr. 25. Veličiny jsou opět shodné s výše uvedenými. Průměty pro osu z se počítají podle vztahu (2.19), pro osu y_1 podle (2.20), osa x má tvar (2.21). Poslední průmět (obr. 25) se vypočte podle vztahu [36]:

$$S_p^{y^2} = a_2 \cdot (u_d - b) + \frac{a_2 \cdot b}{2} \quad (2.23)$$

kde: a_2 – výška trojúhelníka č. 2 [mm], se vypočte podle vztahu (2.22).



Obr. 24 Velikost ploch, když $u_b = b$ [36].



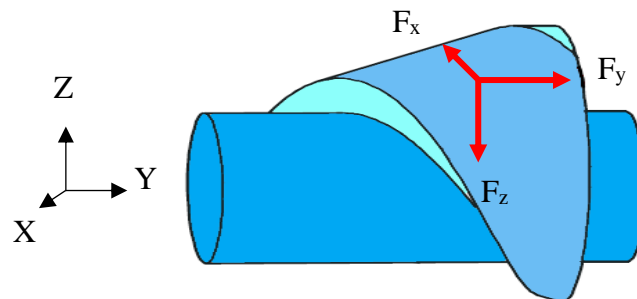
Obr. 25 Velikost ploch, když $u_b > b$ [36].

2.3.1 Tvářecí síly

Správné určení tvářecích sil v průběhu válcovacího procesu je klíčové nejen z hlediska určité predikce chování materiálu, ale hlavně z hlediska bezpečnosti stroje vůči pracovníkům, dále je možné zavést automatické kontrolní řídicí systémy. [38]

Síla F , kolmá na klín nástroje, směřuje do materiálu a je možné ji rozdělit v kartézském souřadném systému podle obr. 26 takto [38; 48]:

- F_x – tangenciální složka, jež slouží k výpočtu síly elektromotoru válcovačky;
- F_y – axiální složka, má největší podíl na defektech vývalku, hlavně v podobě krčkování, v anglickém jazyce označováno jako „necking“;
- F_z – radiální složka, ovlivňuje zatížení nástroje a pracovních válců, včetně rámu stroje, z čehož vyplývá, že má hlavní dopad na přesnost vývalků.



Obr. 26 Rozložení sil při válcování [38].

Rozložení jednotlivých sil do kartézského souřadného systému se provádí následovně [36]:

$$F_x = S_p^x \cdot \sigma_d \quad (2.24)$$

kde: σ_d – deformační odpor [MPa],

$$\sigma_d = \sigma_p \cdot \frac{1}{1 + \frac{S_p^{y2}}{\pi \cdot r^2} \cdot (\tan \alpha - f)} \quad (2.25)$$

σ_p – přirozený přetvárný odpor [MPa],

r – redukovaný poloměr [mm],

f – koeficient tření [-], doporučován v rozmezí 0,3 až 0,4;

$$F_y = (S_p^{y1} + S_p^{y2}) \cdot \sigma_d, \quad (2.26)$$

$$F_z = S_p^x \cdot \sigma_d \cdot \tan \beta, \quad (2.27)$$

kde: β – úhel klínu [°]

V průběhu let bylo provedeno několik výzkumů zaměřených na tvářecí síly. Během nich bylo zjištěno, že síly svého maxima dosahují nikoliv ve vnikací zóně, ale naopak v přechodu vnikací zóny do tvářecí. Jakmile se zóna překročí, tangenciální síla má ustálený charakter, zatímco radiální síla prudce klesne. Má se za to, že k nárůstu síly dochází, protože probíhá ihned požadovaná (maximální) redukce, tzn. že klín se noří hluboko do materiálu. V této fázi se také velmi navyšuje prokluz, což vede ke zvětšenému kontaktu nástroje s polotovarem a tím i zvýšení velikosti sil F_x a F_z . [38]

Důležitou podmínkou při navrhování nástroje, respektive tvářecích lišt, je rovnováha axiálních sil, které mají, jak bylo zmíněno výše, zásadní vliv na kvalitu vývalku. Existují tři základní způsoby, jak rovnováhy docílit. V první řadě se jedná o výrobu symetrických součástí, kde se síly F_x vzájemně vyruší. Druhou možností je zařazení určité nulté operace, během které se upraví polotovar, povětšinou tyčovina, na symetrický tvar, jenž se dále válcuje podle požadavků. Třetí možností (výroba kompletně asymetrické součásti) je zdvojení součásti, tzn. že se součásti symetricky vůči sobě vyválcují, například jsou spojeny v nejobjemnějším místě. Jelikož průmysl nabízí velké množství různě tvarovaných součástí, nelze poskytnout univerzální návod na zajištění rovnováhy axiálních sil. [7]

2.3.2 Kroutící momenty

Výpočty kroutícího momentu jsou vztaženy na fázi, kdy je tvářen dřík. Celkový kroutící moment na obou válkách se vypočte dle následujícího vztahu [36]:

$$M_{kC} = 4 \cdot (M_d + M_z), \quad (2.28)$$

kde: M_{kd} – moment čistých deformačních prací [Nm], viz rovnice (2.40),

$$M_{kd} = \sigma_d \cdot \left[(S_p^{y1} + S_p^{y2}) \cdot \frac{a_2}{2} \cdot \frac{n_t}{n_v} + F_x \cdot \tan \beta \cdot \frac{R+r}{2} \cdot \frac{n_t}{n_v} \right], \quad (2.29)$$

kde: $\frac{a_2}{2}$ – rameno síly F_y [m],

n_t – otáčky tvářence [ot·min⁻¹],

n_v – otáčky pracovních válců [ot·min⁻¹].

M_{kz} – ztrátový moment, nahrazuje ztráty třením mezi nástrojem a tvářencem,

$$M_{kz} = \sigma_d \cdot f \cdot \left(S_p^{y1} + \frac{S_p^{y2}}{2 \cdot \cos \alpha} \right) \cdot (R - r) \cdot \frac{n_t}{n_v}, \quad (2.30)$$

Koeficient tření f doporučuje autor [36] volit v rozsahu 0,5 až 0,6, který vychází z rovnosti mezi smykovým napětím na kluzných plochách a meze kluzu τ_k . V praxi tření značně ovlivňuje velikosti tvářecích sil. Nejčastěji se využívá Coulombova zákona, které tření definuje jako smykové kontaktní napětí, viz rovnice [5]:

$$\tau_f = f \cdot \sigma_n \quad (2.31)$$

kde: σ_n – normálové napětí [MPa]

Existují dva způsoby, jak stanovit koeficient tření f . První z nich vychází z podmínky maximálních smykových napětí, kdy se z Mohrových kružnic určí napětí σ_1 σ_3 , jak ukazuje rovnice [5]:

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{1}{2} \cdot \sigma_k \quad (2.32)$$

Konečná velikost, respektive odvození koeficientu tření, uvádí rovnice [5]:

$$\tau_f = f \cdot \sigma_n = \tau_{max} \leq \frac{1}{2} \cdot \sigma_k \rightarrow f_{max} = 0,5 \quad (2.33)$$

Druhým způsobem je použití podmínky HMH, která je uvedena v rovnici [5]:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_k \quad (2.34)$$

Její dosazením do původní rovnice smykového kontaktního napětí, (2.31), vychází, že velikost koeficientu tření odpovídá hodnotě 0,577, zaokrouhleně 0,6, viz rovnice [5]:

$$\tau_f = f \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_k \rightarrow f_{max} = 0,577 \cong 0,6 \quad (2.35)$$

Výše uvedené odvození je možné zdůvodnění použitého autorova rozsahu koeficientu tření [36]. Pro snazší výpočet rovnice (2.28) jsou použity zjednodušení:

- substituce [36]:

$$F_x = S_p^{y_2} \cdot \tan \alpha \quad (2.36)$$

- upravený převodový poměr [36]:

$$\frac{n_t}{n_v} = \frac{4 \cdot R_v}{3 \cdot R + r} \quad (2.37)$$

kde: R_v – poloměr válce v rovině blízké k rovině C

Po dosazení (2.29), (2.30), (2.36) a (2.37) do vztahu (2.28) bude celkový kroutící moment vyjádřen rovnicí [36]:

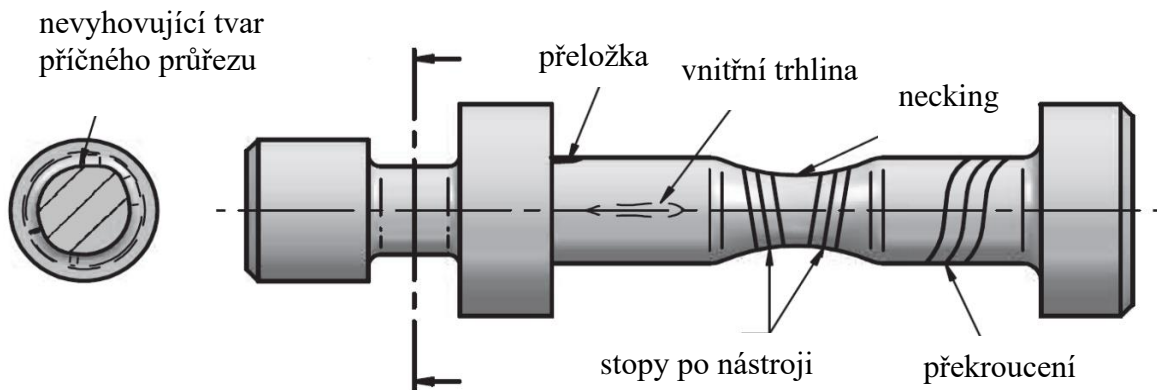
$$M_C = k_{sc} \cdot \frac{16 \cdot R_v}{3 \cdot R + r} \left[(S_p^{y_1} + S_p^{y_2}) \cdot \frac{a_2}{2} + S_p^{y_2} \cdot \tan \alpha \cdot \tan \beta \cdot \frac{R + r}{2} + f_k \cdot \left(S_p^{y_1} + \frac{S_p^{y_2}}{2 \cdot \cos \alpha} \right) \cdot (R - r) \right] \quad (2.38)$$

2.4 Vady při válcování

Při válcování mohou nastat nevhodné podmínky, které směřují ke vzniku vad ve vývalku. Během let bylo provedeno několik studií, jež rozdělují tyto vady do následujících třech kategorií (obr. 27) [38; 49; 50]:

- I. nevyhovující tvar příčného průřezu vývalku – tzn. dodržena požadovaná kruhovitost, ale vývalek vykazuje značnou ovalitu;
- II. povrchové vady – přeložky, krčkování („necking“), stopy po nástroji, překroucení příčného průřezu, apod;
- III. vnitřní vady – nejčastěji se jedná o vnitřní trhliny.

Důležitými parametry, jež ovlivňují podmínky při válcování, jsou úhly α a β . Mají zásadní podíl na kvalitě vývalku. [51; 52]



Obr. 27 Ukázka vad na vývalku [38].

2.4.1 Povrchové (vnější) vady

Charakteristickým rysem nevyhovujícího příčného průřezu vývalku je komprese tvářence, bez výrazné deformace v jeho axiální ose. Dochází k němu kvůli prokluzu vývalku mezi povrchem nástroje a tvářencem, což znamená, že nedochází k jeho souvislé rotaci. Velký vliv na to má jakost povrchu nástroje, čím hladší, tím vyšší riziko prokluzu. Momenty sil vykonávající rotaci jsou nižší než momenty sil, které brání vývalku v rotaci. Ke zdrsnění povrchu se použije speciální drážkování na činných plochách nástroje, čímž se zvýší velikost třecích sil, které iniciují rotační síly. Důsledky prokluzu se projevují v nesouososti vývalku nebo v nesprávně tvarovaném příčném průřezu. Překroucení bývá často způsobeno rozdílným směrem působení tangenciální a třecí síly, jež se vůči sobě pohybují v opačném směru [48]. [48; 50; 51]

Další vadou jsou stopy po nástroji, jež mají podobu spirál či obtisků drážkování na válcových plochách vývalku. Vznikají díky vysokému tření v místě kontaktu nástroje a tvářence, při velkém tvářecím úhlu a úhlu klínu. V převážné většině případů tyto vady nijak neohrožují vlastnosti vývalku, protože se buď odstraní navazující operací (např. kováním) nebo během válcování vyrovnávacími plochami nástroje. [38; 48; 49]

Krčkování je charakteristické lokálním zmenšením příčného průřezu vývalku. Dochází k němu v případě, že je vysoké poměrné přetvoření (větší než 70 %) spolu s velkými úhly α a β . Navíc zde působí vysoké asymetrické axiální tahové síly, jež vyvozují vysoké axiální napětí, které, pokud je větší než mez kluzu materiálu vývalku, vede ke vzniku krčku (zpravidla v nejmenším průřezu tvářence). Použije-li se k analýze krčkování metoda FEM dojde se k závěru, že ve tvářecí části nástroje se objevuje axiální protažení namísto redukce průřezu vlivem rozšiřujících se stěn klínové části nástroje. Z toho plyne, že nejpříznivější podmínky pro zachování konstantního příčného průřezu nastanou, bude-li tvářecí úhel α menší a úhel klínu β naopak větší. [38; 48; 50; 51; 52]

V polovině 80. let minulého století byl představen takzvaný koeficient krčkování χ , který říká, pokud je $\chi \leq 0,2$, pak nedojde ke krčkování. Vypočte se dle rovnice [38]:

$$\chi = \frac{\sqrt{2 \cdot \tan \alpha \cdot \tan \beta}}{\pi} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{1}{\delta}} \right) \cdot (\delta - 1) \quad (2.39)$$

Objeví-li se výše zmíněné vady na vývalku, je nutné upravit geometrii nástroje, nejčastěji zbrúšením ruční úhlovou bruskou. Následně se provede odladovací série, kdy se upravuje nastavení stroje, poloha válců (jejich sevření) a případně i usazení jednotlivých segmentů nástroje.



Obr. 28 Dutina na čele vývalku.



Obr. 29 Přelozka na dříku.

Posledním příkladem povrchové vady je tvorba *dutiny* (v anglickém jazyce „cavity“) na volném čele vývalku. Tvoří se v případě, že zde není žádný odříznutý odpad, jak ukazuje obr. 28. Takto upravené vývalky se primárně používají jako polotovary pro zápusťkové kování, kdy volný konec vymezuje ustavení v zápusťce. Hloubku dutiny lze korigovat: (1) zvětšením úhlů α , β ; (2) snížením obvodové rychlosti nástroje \rightarrow zmenšení hloubky dutiny až o 20 %; (3) dodržením požadovaných tvářecích teplot. Vytvoření dutiny je podmíněno jednak malými stupni deformace (redukci), jednak tvářením pouze povrchové vrstvy materiálu. Vzniku dutin na čele vývalku lze zabránit úpravou tvaru vstupního polotovaru – konce budou kuželovité. [53; 54]

Přídavek na odstranění dutiny lze posčítat podle následující rovnice [53]:

$$\frac{l}{d_0} = k_{\alpha\beta} \cdot k_v \cdot k_T \cdot (0,662 \cdot \delta - 0,208 \cdot \delta^2 - 0,389), \quad (2.40)$$

kde: l – velikost přídavku [mm],

d_0 – původní průměr polotovaru [mm],

$k_{\alpha\beta}$ – koeficient vlivu úhlů α , β [-], viz následující vztah:

$$k_{\alpha\beta} = 1,766 - 12,110 \cdot \tan \alpha \tan \beta, \quad (2.41)$$

k_v – koeficient vlivu obvodové rychlosti [-], viz následující vztah:

$$k_v = 0,3407 + 0,1217 \cdot \ln v_o, \quad (2.42)$$

k_T – koeficient vlivu teploty [-], viz následující vztah:

$$k_T = 1,6354 - 0,000557 \cdot T \quad (2.43)$$

Při válcování se mohou objevit kromě výše popsaných specifických vad i takové, jež jsou typické pro objemové tváření za tepla. Typický příklad na obr. 29 ukazuje přelozku na dříku vývalku. Vznikají přelozkou válcovaného materiálu z čela na dřík při malých posuvech, respektive otáčkách, a velkých redukcích, anebo pokud nejsou nástrojové prstence vůči sobě rovnoběžné. [54]

2.4.2 Vnitřní vady

Mezi vnitřní vady se primárně řadí trhliny vedoucí v axiální ose vývalku (v jádře), viz obr. 30. Jejich příčinou je cyklické nerovnoměrné smykové namáhání jádra polotovaru a jeho povrchu (v jeho ose střídá tlakové a tahové napětí v závislosti na počtu otáček, které musí polotovar vykonat) a tahové napětí, nutné pro tváření. Jestliže vzniklé napětí přesáhne hodnotu meze kluzu tvářeného materiálu, dojde k rozvoji a šíření trhlin. Tomu se dá předejít zvolením vhodné geometrie nástroje → větší hodnoty úhlů α a β , což se shoduje s potlačení vnějších vad. Smykové napětí je způsobeno příčným pohybem materiálu, tudíž, zvětšuje-li se plocha kontaktu na válcové ploše, zvyšuje se i smykové napětí a tím i pravděpodobnost vad. [52; 55; 56]



Obr. 30 Axiální dutina ve vývalku.

Zásadní vliv na vnitřní vady má [36]:

- velké tahové napětí ve středu vývalku, to se samozřejmě týká celé jeho délky;
- nadměrné smykové napětí vyvolané vnikací částí nástroje;
- nízko únavový cyklus, charakteristický pro PKV.

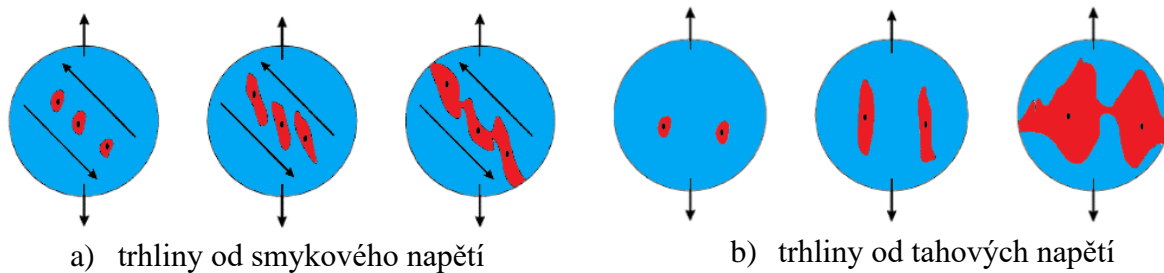
Základním mechanismem vzniku trhlin je Mannesmannův efekt, který se využívá k výrobě tlustostěnných trubek [56]. Princip spočívá v rotaci a cyklickém střídání tahového a tlakového zatížení středu polotovaru, dochází ke změknutí jádra vlivem porušení soudržnosti materiálu při nízkocyklové únavě, což vytváří příznivé podmínky pro rozvoj vnitřních vad. Jejich velikost závisí na velikosti a počtu inkluzí, které vznikají v tvářecí části nástroje. Velikost vad se řídí velikostí smykového napětí, které v tomto případě slouží k nahromadění vad, zatímco tahové napětí má tendenci jednotlivé vady vyvolávat (musejí nastat ideální podmínky, tzn. že zrna s nejvíce krystaly jsou orientována pod úhlem 45° , nastává skluz, protože je zde nejvyšší smykové napětí, které navíc dosáhne kritické hodnoty). Obecně vnitřní vady snižují mechanické namáhání postižené součásti. Na obr. 31 se nacházejí ukázky možných tvarů vnitřních trhlin. [5; 52; 56; 58]



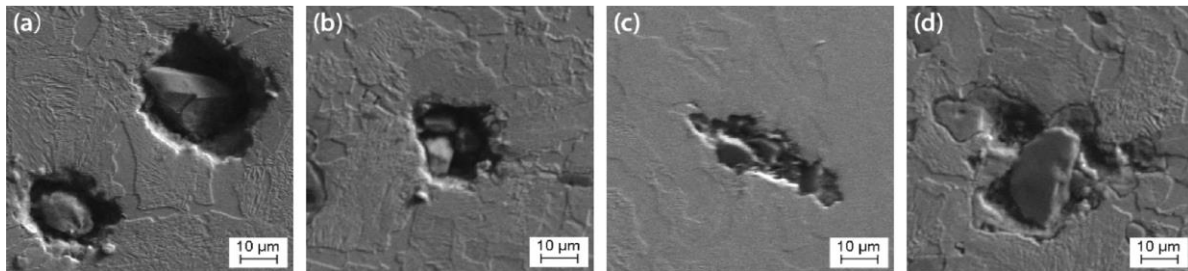
Obr. 31 Ukázka vnitřních trhlin [59].

Morfologie v podélném směru charakterizuje hlavní podélné dutiny, kolem které se mohou lokálně nacházet další menší trhliny. V příčném řezu jsou vady charakterizovány křížovým tvarem (výsledek kombinovaného vlivu smykového a tahového napětí). Obr. 32 a) ukazuje, že vlivem smykového napětí dochází ke vzniku dutin, jež postupnou rotací srůstají. Zatímco obr. 32 b) reprezentuje rozšiřování trhlin vlivem tahových napětí. [56]

Makroskopické trhliny se mohou objevit i díky mikroskopickým defektům ve struktuře polotovaru. Mikromechanismem takovýchto jevů jsou zpravidla vměstky, obsažené v matici základního materiálu. Nejčastěji se jedná o Al_2O_3 a MnS , které se oproti ocelové matici nedeformují (obr. 33 a)), tudíž se kolem nich často vyskytují inkluze s ostrými hranami, fungujícími jako vruby (koncentrátory napětí). Další druhy inkluzí jsou na obr. 33. Z toho vyplývá, že na okrajích bude vysoké napětí spolu s malými kohézními silami (mezi inkluzí a maticí), což vede právě k iniciaci mikroskopických defektů. Je nutné si však uvědomit, že ojedinělé mikroskopické vady nevedou k makroskopickým poruchám soudržnosti. Ta může nastat až v případě, že dojde k jejich spojování za stálého tváření. [49; 59]



Obr.32 Morfologie vnitřních vad [56].



a) bodové b) shluk c) řetězec d) separované

Obr. 33 Mikromechanismus vnitřních vad [59].

2.5 Konstrukce nástrojů PKV

Jak již bylo dříve zmíněno, příčné klínové válcování patří mezi objemové metody tváření, nejčastěji, za tepla. Při válcovacím procesu se přemísťuje masa materiálu v axiálním směru polotovaru (tyč nebo přířez) díky účinku redukčních a vyrovnávacích ploch dvojice nástrojů, umístěných paralelně nad sebou. Výsledkem zabírajících ploch je prodlužování polotovaru za současného redukování příčného průřezu. [7; 36; 37]

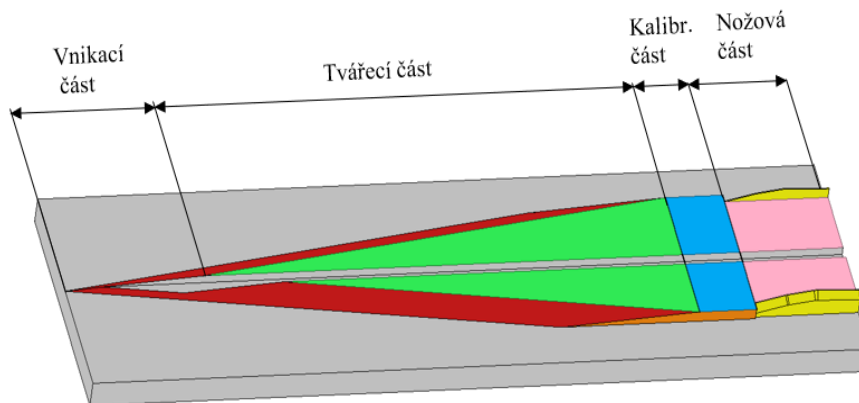
Jelikož je prostorová konstrukce nástroje poměrně náročná, nachází se popis jednotlivých částí a ploch v rozvinutém tvaru, jak ukazuje obr. 34. Nástroj se skládá z těchto částí [38; 60; 61]:

- Vnikací část – je složena z klínu, jehož výška stoupá od nuly po požadovanou výšku redukce, a je definován takzvaným úhlem klínu β . Tato část zajišťuje zároveň i rotaci předvalku a vytvoření V-drážky na jeho povrchu.
- Tvářecí část – patří mezi ty nejdůležitější, protože zde nastává kritická deformace vývalku, tok masy materiálu v axiálním a radiálním směru tvářence. Dochází ke kroucení toku díky rotaci [44]. Určuje velikost přemístění materiálu jak délkou šroubovice, tak velikostí úhlu klínu. Velikost redukce z předcházející nástrojové části zůstává zachována. Při špatně zvolené geometrii zde vznikají defekty.
- Kalibrační část – stanovuje finální rozměry, tudíž se zde nemění velikost redukce, avšak stále se může materiál plasticky deformovat. Ne v takové míře jako u předchozích částí. Zkvalitňuje povrch.

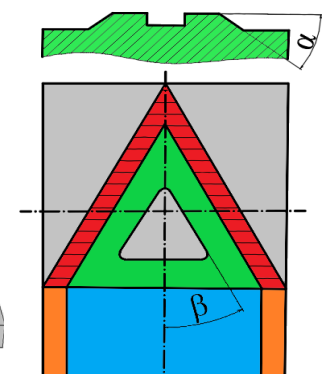
- Nožová část – odděluje přebytečný materiál, takzvaný technologický odpad. Nacházejí se na ní dva až tři oddělovací nože podle toho, zda se vývalek skládá z jednoho nebo dvou zrcadlově symetrických kusů (použití u jednoduchých součástí). [7; 36]

Výše uvedené nástrojové části, znázorněné v rozvinutém tvaru na obr. 35, se skládají z těchto pracovních ploch [7; 36]:

- Redukční šroubové plochy (červená barva) – nejvíce se podílejí na deformaci materiálu a zároveň jej redukuje v jeho příčném průřezu. Velikost redukce, potažmo i její rychlost, je určena redukčním úhlem α . Redukční plochy dále zajišťují rotaci vývalku, a to díky drážkování, které se na nich nachází.
- Vyrovnávací válcové plochy (zelená barva) – vyrovnávají dřívík vývalku. V případě jejich absence dojde k vytvoření šroubovic na jeho povrchu. Velmi často se na nich nachází snížení, které zmenšuje tření mezi nástrojem a vývalkem, což jako druhotný efekt zlepšuje ovalitu a tečení materiálu („nemačká se“).
- Hladící válcové (modrá barva) a kuželové plochy (oranžová barva) – mají dva účely: jednak slouží k finálnímu vyhlazení povrchu tak, aby na něm nebyly vidět stopy po šroubovicích, způsobených jednotlivými plochami na klínu; jednak kalibrují vývalek na požadované rozměry.



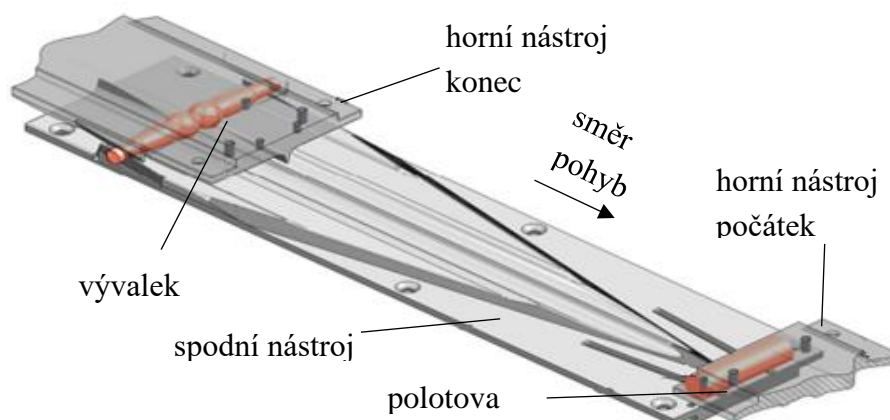
Obr. 34 Nástrojové části [38].



Obr. 35 Plochy na nástroji.

2.5.1 Rozdělení

Hlavní skupinou jsou válcové nástroje, které mají válcovaný profil navinutý na svém plášti. Mezi první, minimálně na území tehdejší ČSSR, patřily stavebnicové, a to hlavně pro svou kompatibilitu a univerzálnost. Velká úskalí se objevila při válcování – pracné a zdoluhavé sestavování nástroje, bezpečnost práce (malé segmenty měly tendenci se uvolňovat). Proto se od stavebnicových nástrojů ustoupilo a jejich místo zaujaly jed noučelové nástroje. Jsou

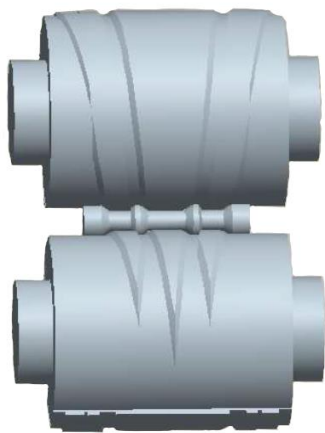


Obr. 36 Schéma tzv. "flat tools" [41]

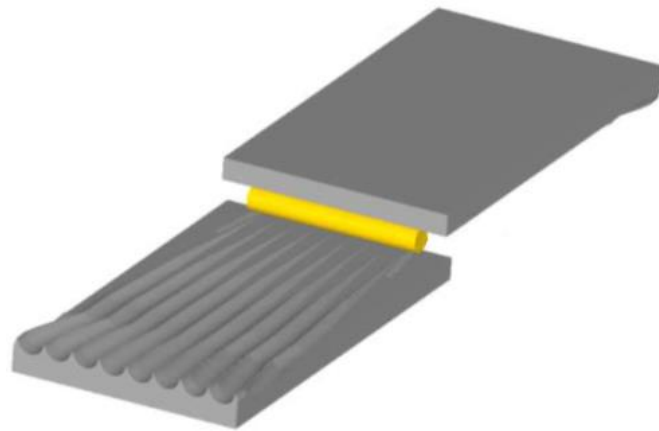
vyráběné z jednoho kusu, slouží k výrobě vždy konkrétního vývalku. Autor [7] uvádí poddruhy, které se však v dnešní době již nepoužívají vzhledem k objemu výroby. Mezi ně patří skládané nástroje buď na vlastní podložce nebo na univerzální podložce. Tento typ nástrojů, uveden v příloze 2, se skládá z podložného segmentu, který je opatřen buď upínacími otvory, k nimž se montují většinou odlévané tvářecí a vyrovnávací lišty, anebo se jedná o hladkou válcovou plochu určenou k přivařování lišt. „Na vlastní podložce“ znamená, že jednotlivé lišty jsou svrtány až při montáži. Oproti tomu univerzální podložka obsahovala řadu drážkových průchozích otvorů, skrz které se protáhly upravené šrouby, dotažené maticemi. [7]

Další velmi početná skupina jsou deskové nástroje, často nazývané v anglickém jazyce „*flat tools*“. Požadovaný válcovaný profil je rozvinutý na ploše desky, jak znázorňuje obr. 36. Opět se jedná o párový nástroj, kde se každá deska pohybuje opačným směrem vůči desce druhé. Oproti výše uvedeným válcovým nástrojům mají deskové jednodušší konstrukci, proto jsou velmi často využívány na vědeckou činnost [38]. Navíc se ukázalo, že poskytují mnohem stabilnější proces válcování oproti válcovým nástrojům, což zároveň vede ke kvalitnějším vývalkům, co se týče parametrů (rozměry, geometrické tolerance apod.). [48; 62; 63]

Multi-wedge cross wedge rolling, zkráceně MCWR, je jedna z modifikací klasického PKV, kdy dochází k plastické deformaci tvářeného materiálu více klíny naráz, viz obr. 37. Hlavní výhodou modifikace je snížení hmotnosti a velikosti nástroje. Využití nachází primárně v hromadné produkci dlouhých hřídelů pro automobilový průmysl nebo malých strojních součástech (ložisková tělíska, mlecí kuličky do pískovacích boxů obr. 38), protože významně snižuje ekonomickou náročnost procesu výroby. Při válcování malých součástí bylo zjištěno, že polotovar o menším průměru oproti požadovanému, je výhodnější, protože se zamezí vzniku vnitřních defektů. [64; 65; 66; 67]



Obr. 37 MCWR hřídele [66].

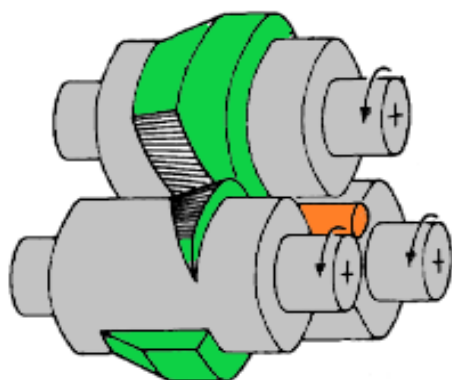


Obr. 38 MCWR mlecí tělíska [65].

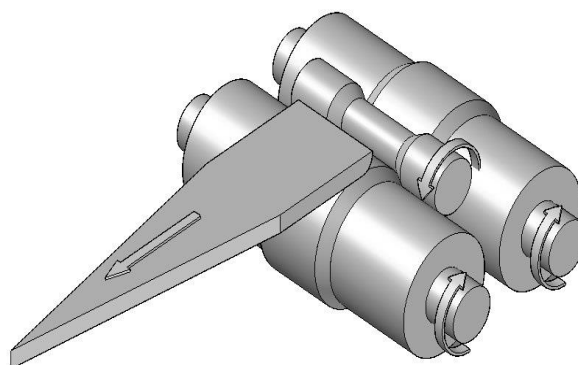
Další modifikací klasického PKV je takzvaná tříválcovačka, viz obr. 39, která, v porovnání s klasickým uspořádáním válců, je méně energeticky náročná. Z názvu je patrné, že se jedná o tři identické válcové nástroje, umístěné ve dvou řadách – v první řadě se nacházejí dva válce, ve druhé jeden, přičemž jeho osa je rovnoběžná s mezerou mezi spodními dvěma válci. Geometrie je na všude shodná, stejně tak smysl otáček. Vzhledem k množství stykových ploch (jak redukčních, tak hlavně hladících) a nižšímu počtu nutných aktivních otáček k vyválcování vývalku je jakost příčného průřezu mnohem vyšší. Navíc se výrobní časy zkrátí, zvýší-li se obvodová rychlost nástrojů. To má příznivý vliv i na teplotu vývalku, která je v osově části vývalku po celou dobu tváření konstantní, zatímco v povrchové části se mírně sníží. Kromě kvalitnějšího vývalku má modifikace ještě jednu pozitivní vlastnost – snížení vibrací (hladší chod při válcování). Mezi velké výhody, mimo již zmíněné, patří možnost válcovat duté součásti s velmi přesnou tloušťkou stěny, tolerance se pohybuje okolo 10 %. Naopak nevýhody

spočívají primárně v samotné konstrukci stroje, která umožňuje zakládání polotovarů pouze z čela pracovních válců, a ceně jak stroje samotného, tak všech tří válců. [48; 68; 69; 670]

Na obr. 40 se nachází ukázka posledního druhu nástroje PKV, a sice takzvané *Wedge-Rolls Rolling*, zkráceně WRR. Za vývojem těchto typů PKV stojí Lublin University of Technology [70]. Jedná se kombinaci deskového a tříválcového nástroje, jde je horní válec nahrazen pohybuující se deskou. Princip spočívá ve vnikání pouze klínové desky, zbylé dva válce fungují pouze jako tvarové podpory (rolny). Díky tomu lze dosáhnout vyšší jakosti povrchu, a zároveň jádro neobsahuje žádné vady. Nespornou výhodou oproti výše uvedenému klasickému PKV a tříválcovače je jednoduchá konstrukce – složitý na výrobu je zde pouze klínový nástroj, rolny mají konečný negativní profil vývalku po celém obvodu, tudíž nízké pořizovací náklady. WRR se využívá při výrobě rotačních, dutých součástí (stěna o velikosti až $0,2 \cdot d_0$). [71; 72]



Obr. 39 Tříválcovačka [69].



Obr. 40 Wedge-Rolls Rolling [71].

2.5.2 Volba úhlů a aktivní otáčky

Mezi nejzákladnější a zároveň nejdůležitější parametry při konstrukci nástroje pro příčné klínové válcování jednoznačně patří tvářecí úhel α a úhel klínu (vnikací) β , viz Obr. 35. Úhly, jak již bylo zmíněno dříve, mají zásadní vliv na napěťové stavy ve tvařenci. Během výzkumu byl zjištěn celkový rozsah použitelných úhlů, které uvádí tab. 3. [7; 36; 38]

Tab. 3 Použitelné nástrojové úhly [36; 38].

	Tvářecí úhel α [°]	Vnikací úhel β [°]
Obecný rozsah	15 ÷ 45	3 ÷ 15
Doporučený rozsah	20 ÷ 30	4 ÷ 10

Diagram na obr. 41 ukazuje celkový rozsah jednotlivých úhlů v závislosti na velikosti redukce, a zároveň z něj lze vyčíst, při jakých tvářecích podmínkách budou vyrobené neshodné kusy. Použije-li se vnikací úhel $\beta > 10^\circ$ spolu s tvářecím úhlem $\alpha > 40^\circ$, je dost pravděpodobné, že dojde ke ztrátě stability dřívku, ten se začne protahovat v axiálním směru (necking). Bude-li naopak hodnota tvářecího úhlu $\alpha < 17^\circ$ při stejném úhlu β , mohou se v axiální části vývalku objevit vnitřní trhliny. [37; 38]

Pokud je zapotřebí přesné určení jednotlivých úhlů, je možné použít k jejich výpočtu následující rovnice [38]:

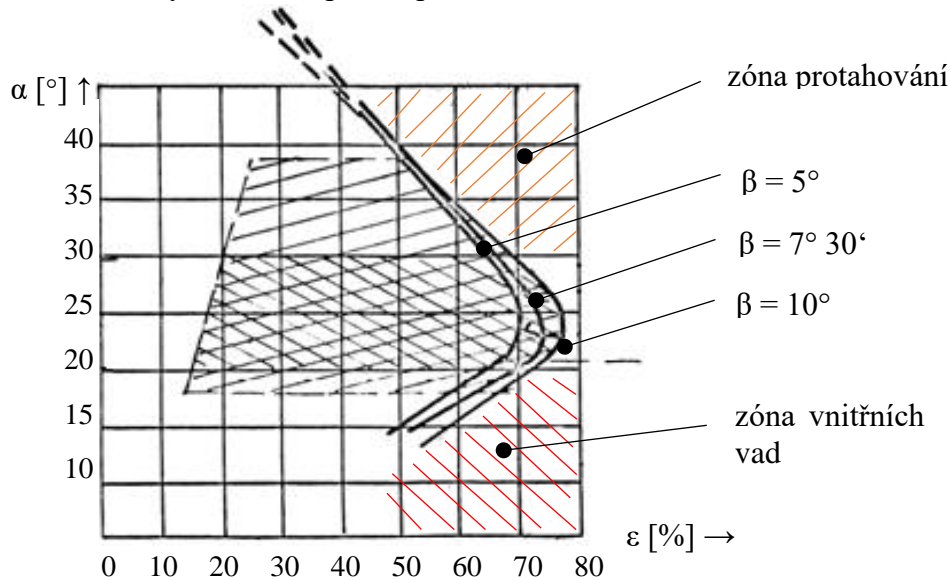
$$\beta \leq \arctan\left(\frac{0,3 + 0,01 \cdot d_0}{\delta^3}\right) \quad (2.44)$$

$$\alpha = 80 \cdot \tan \beta + 15 + \frac{d_0}{4} \quad (2.45)$$

Jestliže se využije výše uvedených vztahů (2.44) (2.45), doporučuje se použít k ověření jejich rozsahu podmínku [38; 73]:

$$0,04 \leq \tan \alpha \cdot \tan \beta \leq 0,08 \quad (2.46)$$

Čím blíže je výsledek k horní hranici podmínky, tím spíše se zamezí vzniku krčkování a překroucení dřívku vývalku. Naopak u spodní hranice hrozí vznik vnitřních vad. [38; 73]



Obr. 41 Diagram úhlů v závislosti na redukci [37].

V rámci výzkumu volby správných úhlů byl proveden rozsáhlý experiment zaměřený na použití variabilních velikostí jednotlivých úhlů. Bylo zjištěno, že při použití úhlu β , který není konstantní, se rapidně zvětšilo zatížení v radiálním i axiálním směru, což vedlo nárůstu potřebné energie, zvýšila se pravděpodobnost výskytu vnitřních vad ve tvářenci, hlavně v osové oblasti. Naopak použití variabilního úhlu α ke snížení zatížení v radiálním i axiálním směru, čímž se zároveň snížila i energetická náročnost. Výsledky experimentů tedy ukázaly, že nejvýhodnější je použití konstantního úhlu β , za použití variabilního tvářecího úhlu α . [36; 74] Dalším důležitým faktorem, který je mimo jiné také ovlivněn nástrojovými úhly, je počet aktivních otáček, jenž musí vývalek vykonat před vyválčováním. Na jejich počtu závisí kvalita vývalku – bude-li jich příliš moc, vzniknou v osové oblasti vnitřní vady. Rozlišují se dva druhy otáček. První z nich jsou počítány pro kuželovou část, tudíž na ploše, kde dominuje tvářecí úhel α , využije se vztahu [36]:

$$n_{ak} = \frac{\frac{1}{k^2} - k}{6 \cdot \pi \cdot \tan \alpha \cdot \tan \beta} \quad (2.47)$$

Druhý z nich je počítán pro dřív, kde má rozhodující vliv vnikací úhel β , a to dle rovnice [36]:

$$n_{av} = \frac{F_z}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \tan \beta} \quad (2.48)$$

kde: F_z – tvářecí síla v ose z [N], viz rovnice (2.24)

Celkové aktivní otáčky jsou součtem aktivních otáček pro kuželovou část a dřív, viz rovnice [36]:

$$n_{ac} = n_{ak} + n_{av} \quad (2.49)$$

2.5.3 Konstrukce ploch

Další plochy, které přijdou do kontaktu s povrchem vývalku, jsou takzvané vyrovnávací válcové plochy, viz obr. 42 označené zelenou barvou. Na nich se může nacházet úprava v podobě odlehčení, což je snížení výšky povrchu v místech, kde by jinak docházelo ke zvýšenému tření a mohlo by dojít ke vzniku vad. Hloubka odlehčení h_v se pohybuje zhruba od 0,3 do 15 mm, podle na velikosti série. Bude-li nástroj pracovat v hromadné výrobě, pravděpodobně se vrátí do dílny na renovaci, proto je vhodné již předem hloubku adekvátně upravit. Vypočítá se podle rovnice [36; 37]:

$$h_v = \pi \cdot R \tan \beta \quad (2.50)$$

Dále se počítá délka hladící plochy l_h , která je určující pro délku nástroje (obr. 42). Čím delší se zvolí, tím delší a dražší nástroj bude, a zároveň se prodlouží výrobní časy. Navíc je nutné dodržet požadavek tváření do určité minimální teploty. Výpočet je následující [36; 38]:

$$1,5 \cdot \pi \cdot R_h < l_h < 2 \cdot \pi \cdot R_h, \quad (2.51)$$

kde: R_h – hlazený poloměr dřívku [mm].

Kvalita hladící plochy je přímo ovlivněna rádiusem zaoblení R_z , který se nachází mezi šikmou redukční plochou a hladící plochou, jak ukazuje obr. 42. Vyšší hodnoty se používají u hůře tvářitelných materiálů, samotná velikost se vypočte dle vztahu [37]:

$$R_z = (0,8 \div 1,5) \cdot v_r, \quad (2.52)$$

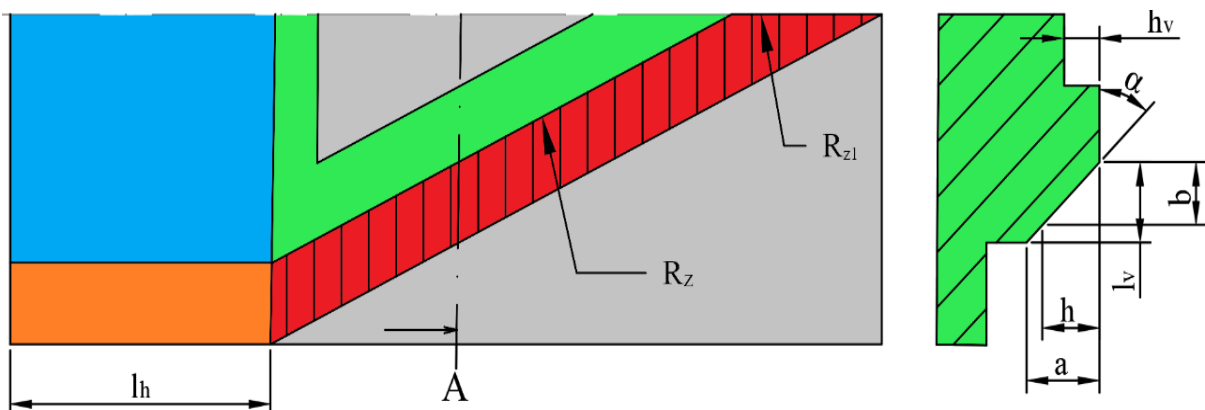
kde: v_r – výška šikmé redukční plochy [mm]. Vypočte se dle vztahu:

$$v_r = l_v + (1,5 \div 2), \quad (2.53)$$

kde: l_v – výška odvalování materiálu po redukční šikmé ploše [mm]. Výpočet podle vztahu:

$$l_v = \frac{a}{\tan \alpha} \quad (2.54)$$

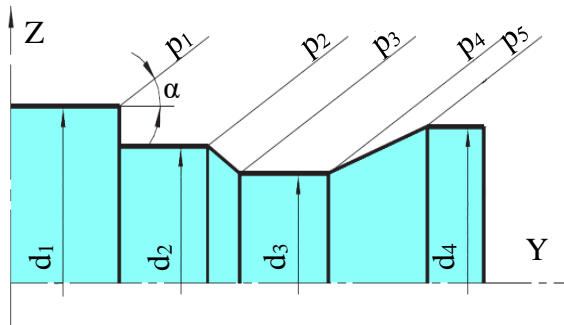
Další rádius se nachází na hraně náběhu redukčních ploch, značí se R_{z1} . Volí se v rozmezí 3 až 5 mm. [37]



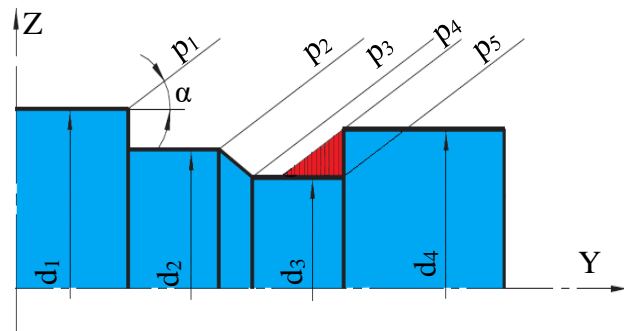
Obr. 42 Nástrojové plochy [37].

Šroubové redukční plochy, promítnuté na rovinu procházející osami obou válců, představují takzvané stopy. Během válcování dochází k posunu jednotlivých stop shodně se zanořováním daných ploch do masu materiálu. Jelikož jsou v projekci na rovinu znázorněny šikmými úsečkami, je nasnadě dbát na jejich správnou konstrukci na nástroji tak, aby nedošlo k protnutí obrysu válcování součásti, tzn. aby nedošlo k „přerušení stopy“. Na obr. 43 je znázorněno

válcování tvářence, jenž splňuje zatím všechny předpoklady, které již byly vysvětleny. Na počátek válcování odkazuje poloha p_1 , doválcování je označeno polohou p_5 , veškeré úsečky mají shodný úhel sklonu, jenž odpovídá tvářecímu úhlu α . Obr. 44 ukazuje přerušenu stopu, k čemuž dojde mezi polohami p_4 , p_5 . Důvodem defektu je změna geometrie vývalku, kdy vnitřní plocha tvářence je kolmá na svou osu, nikoliv zkosená, což vede k vytvoření stupňovitěho průřezu na přechodové ploše tvářence. [36; 38]



Obr. 43 Nepřerušená stopa [38].



Obr. 44 Přerušená stopa [38].

Na požadavek nepřerušené stopy plynule navazuje použití kombinovaných redukčních ploch. Jedná se o spojení šikmých (základních) redukčních ploch a pomocných redukčních ploch, u kterých odpovídá tvářecí úhel α požadovanému úhlu dle výkresové dokumentace. Při promítnutí redukčních ploch na válcovou plochu a jejím následném rozvinu, viz obr. 45, lze vidět, že základní plocha postoupí svou stopou při válcování z polohy p do polohy p_1 , zatímco pomocná plocha se vytvoří v poloze b_1 . Následné válcování je popsáno vždy dvojicí stop a_i b_i . Při počítání změny geometrie PKV nástroje se nejprve ověřuje, zda platí podmínka [38]:

$$e \geq b_{xm} + x_m \quad (2.55)$$

kde: e – polovina délky dřívku, nebo délka celého dřívku u vývalků s nákrůžkem ve střední části [mm],

b_{xm} – šířka základní redukční plochy v místě přechodu do pomocné redukční plochy [mm], vypočte se dle vztahu:

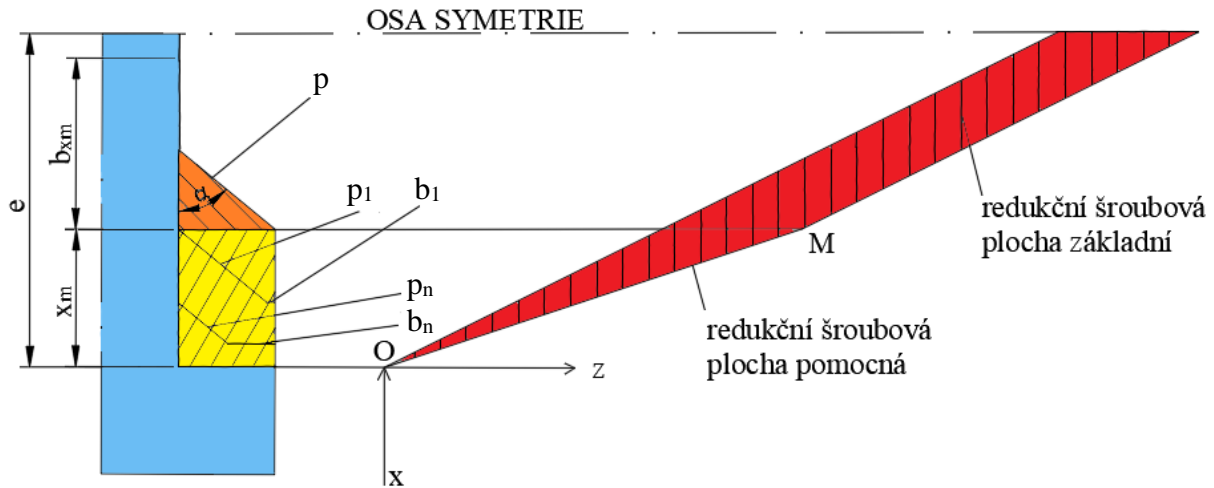
$$b_{xm} = \frac{R - r}{\tan \alpha} \quad (2.56)$$

x_m – vzdálenost pomocné redukční plochy na dřívku [mm], vypočte se dle vztahu:

$$x_m = \frac{1}{3 \cdot \tan \alpha} \cdot \left(\frac{R^3}{r^2} - 3 \cdot R + 2 \cdot r \right) + \frac{\pi}{2} \cdot \left(R - \frac{r^2}{R} \right) \cdot \tan \beta \quad (2.57)$$

$$z = \frac{x_m + b_{xm}}{\tan \beta} \quad (2.58)$$

Pokud podmínka vyhovuje, využijí se vztahy (2.56), (2.57) a (2.58) [38]. Na obr. 45 je znázorněn bod M, který vyjadřuje přechod základní redukční šroubové plochy do pomocné redukční šroubové plochy, zde uvažuje počátek jejich plynulého přechodu. Charakterizují jej vztahy (2.57) pro souřadnici na ose X a (2.58) pro souřadnici na ose Z. Bod O označuje místo, ve kterém se nachází pouze pomocná plocha, a tudíž je to zároveň označení pro konec válcování kolmého vnitřního čela vývalku na daném dřívku. Z výše popsaného vyplývá, že na úsečce |MO| dochází k plynulému přechodu základní plochy z maxima do nuly, a zároveň k přechodu pomocné plochy z nuly do maxima. [36; 37; 38]



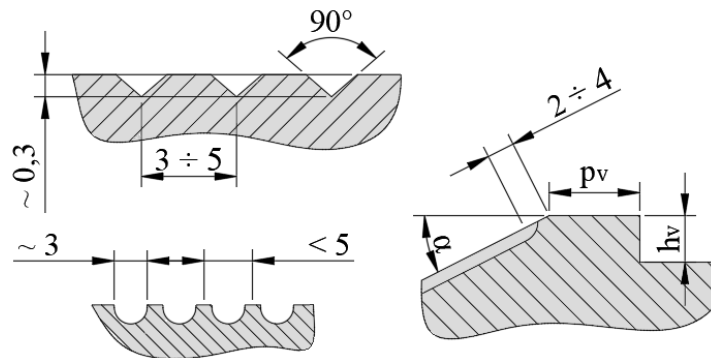
Obr. 45 Konstrukce ploch [36; 37].

Při konstrukci ploch může nastat také druhá varianta, vyjádřená vztahem [36]:

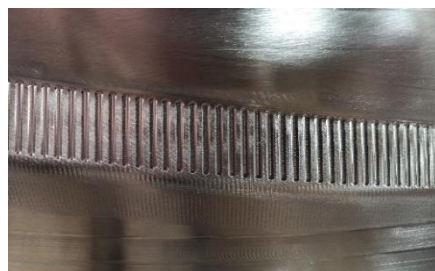
$$e < b_{xm} + x_m \quad (2.59)$$

Jedná se většinou o součásti, které mají nákršky s kolnými čely. Nejvýznamnější změnou oproti podmínce je poloha bodu M. Jelikož počet obrátek, během kterých se vyválcuje tvářenec, je menší, musí být zákonitě posunut co nejvíce k zanořovací části tvářecího klínu, jak ukazuje příloha 3. Pokud by se čtenář více zajímal o problematiku navrhování šroubových ploch, jež splňují podmínku (2.59), doporučuje autor diplomové práce nahlédnout do přílohy 4 a postupovat dle příkladu v nich uvedeným. [36]

K zajištění stabilního procesu válcování vývalku slouží takzvané drážkování, viz obr 46. Nachází se na redukční šroubové ploše a je orientováno kolmo na osu válců, přičemž je požadavek, aby se nacházelo v celé délce plochy. Hloubka drážkování se pohybuje v rozmezí 0,3 až 1 mm, o rozteči zhruba 3 až 5 mm, ale nesmí zasahovat do vyrovnávacích válcových ploch. Pokud by drážkování zasahovalo do válcových ploch, docházelo by k výrobě vývalků s povrchovými vadami. Drážkování v praxi znázorněno na obr. 47. [7; 37; 38]



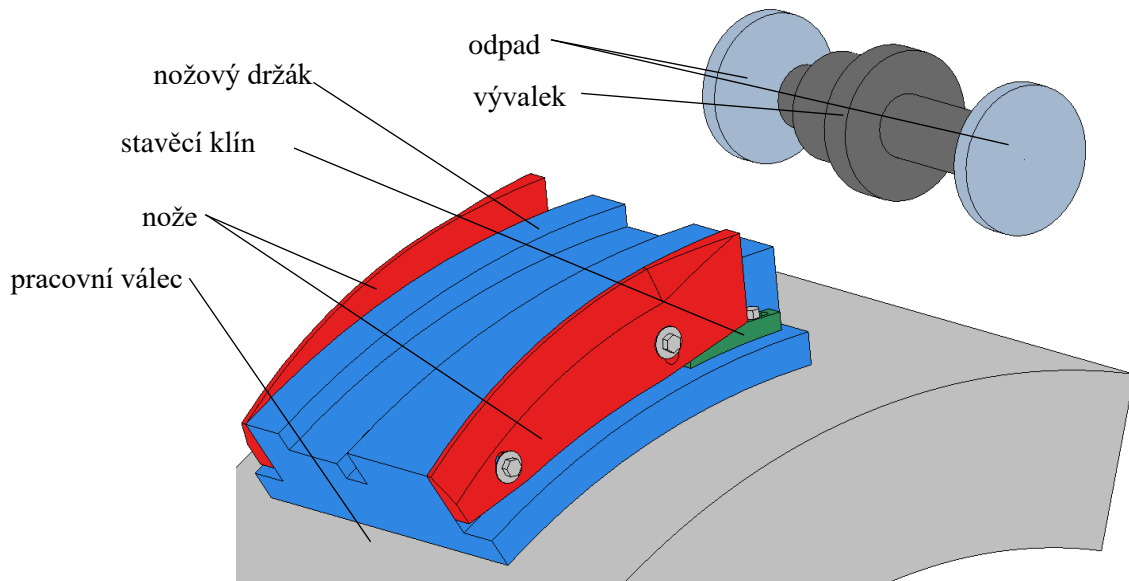
Obr. 46 Konstrukce drážkování [37]



Obr. 47 Reálné drážkování

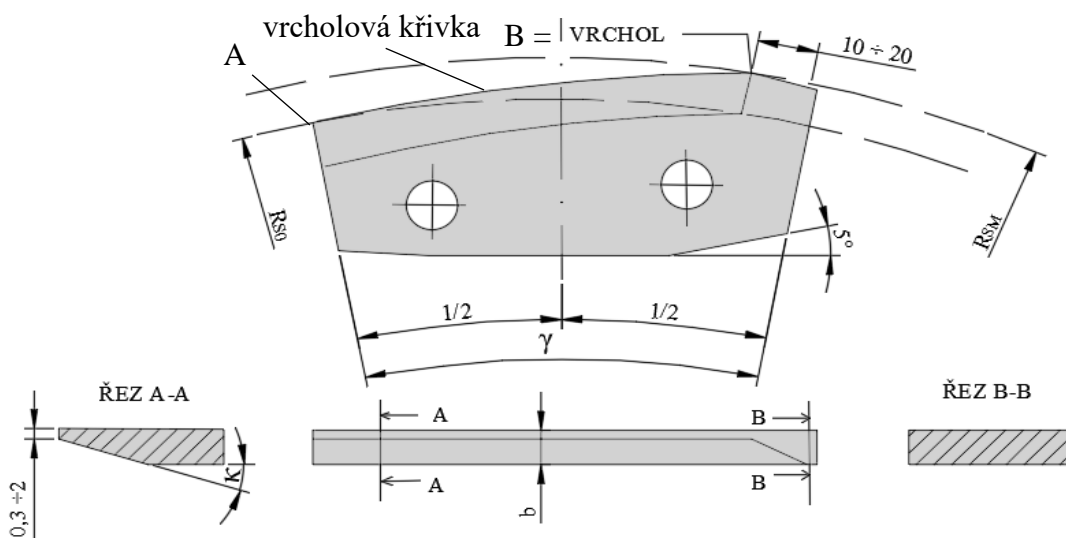
2.5.4 Nožové držáky a nože

Po vyválnování požadovaného tvaru vývalku, dochází k oddělení odpadů (produkt povrchového toku materiálu), případně jednotlivých kusů od polotovaru nebo k rozdělení vývalku, jednalo-li se o zdvojený kus. Vše se děje v části nožových držáků, která plynule navazuje na kalibrační plochy, viz obr. 48. Profil držáků odpovídá zjednodušenému tvaru vývalku a se sníží o $0,1 \div 0,3$ mm, aby nedocházelo k zadrhnutí tvářence a tím k deformaci. Délka držáků musí přesahovat o 15 až 30 mm délku dělicích nožů, a to z důvodu zaručeného odvalení vývalku do sběrné krabice, umístěné na spodním nástroji, a jeho následném vypadnutí při dokončení jedné otáčky pracovního válce. Dělicí proces probíhá zanořováním dvojice protiběžných nožů do děleného materiálu. [36; 37; 38]



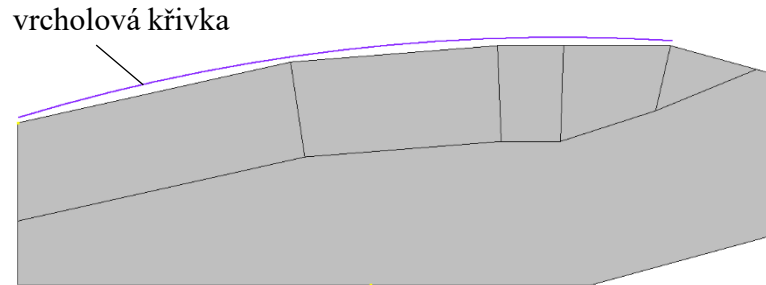
Obr. 48 Nožový držák, včetně vývalku a odpadů

Trajektorie řezu je určena vrcholovou křivkou nožů, která se vytváří během válcování. Na obr. 49 je uveden dělicí nůž se zakótovanou geometrií. Dělicí proces začíná v bodě A, v němž dochází ke vnikání nože do děleného materiálu. Bod leží na kružnici o poloměru R_{S0} . Jak nástroj rotuje podél axiální osy, zanořuje se nůž více do materiálu, až dojde do bodu B. Reprezentuje jednak vrchol nože, zároveň ukončuje zanořování, a nachází se přesně v polovině mezi osami



Obr. 49 Konstrukce jednostranného nože [37]

válců, jež se značí R_{SM} . Na něj dále navazuje takzvaný trhač, tj. kde dochází k odtržení zbytku odpadu od samotného vývalku. Vrcholová křivka je pak spojnice mezi těmito body. [36; 37; 38] V praxi se nejčastěji používá zjednodušený tvar, viz obr 50, kde se vrcholová křivka (reprezentována Archimedovou spirálou) nahradí přímkami. Jedná se hlavně o výrobní zjednodušení, které nemá vliv na kvalitu řezu. Na vrcholovou křivkou se vynesou body, které nejlépe odpovídají požadovanému tvaru nože a následně se spojí přímkami. Musí však zůstat zachován vrchol nože, jelikož je zde nejvíc namáhané místo v řezu. [38]



Obr. 50 Zjednodušený tvar nože.

Délka nože (obr. 49), respektive velikost úhlu (protože se jedná o zakroužené nástroje), se určuje vztahem [37]:

$$\gamma = \frac{5 \cdot \arccos\left(\frac{R_{SM} - v_n}{R_{SM}}\right)}{3,5} \quad (2.60)$$

Zkosení slouží k úpravě pozice (radiální výšky) na držáku, k čemuž se používá stavitelný klín (na Obr. 48 vyznačen tmavě zelenou barvou). V řezech je zakótován úhel břitu κ , jehož velikost se pohybuje mezi 20° až 30° , jeho činná výška musí být vždy větší než poloměr děleného materiálu. Na ploše se navíc nachází drážkování, které napomáhá k rotaci vývalku. [36; 37; 38] Nože lze dělit dvěma způsoby. Zaprvé, zda se jedná o jednostranné nože – oddělují materiál pouze v jednom směru, nebo o oboustranné – nacházejí se uprostřed nožového držáku a půlí vývalky. Jednostranné nože se dále dělí na levé a pravé podle toho, na kterou stranu je orientována činná plocha nože. [36; 37]

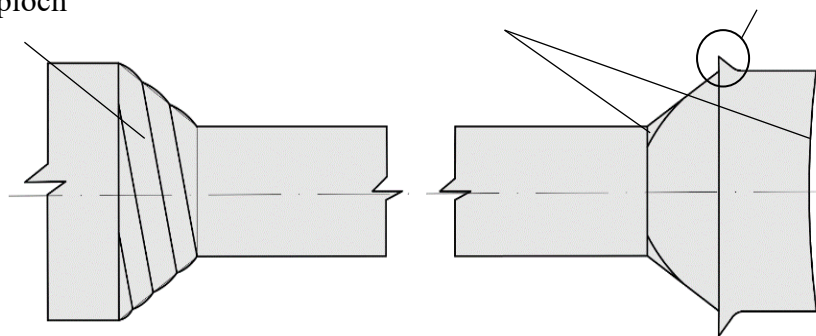
2.5.5 Přesnost, tolerance a přídatky

Vývalek se musí svým tvarem co nejvíce přibližovat hotové součásti. Aby toho byl schopen, jsou kladeny vysoké nároky na jeho kvalitu, která závisí na mnoha parametrech. Mezi ty nejdůležitější se řadí vliv úhlů α a β , velikost redukce, stálost rozměrů nástroje (musí odolávat tepelné dilataci), a samozřejmě jeho přesnosti. [36; 37]

vnější plocha se závitů → deformace,
absence hladicích ploch

nesouměrný kužel

vyhřeznutí



Obr. 51 Dopad úhlů na kvalitu vývalku.

Jak již bylo několikrát zmíněno, velký vliv na vývalek má úhel klínu β . Při pozorování jeho dosahu na kvalitu vývalku, je patrné, že zásadní vliv má hlavně na geometrickou přesnost té části tvářence, která přechází do komolého kužele. Použije-li se velký úhel, dojde k prohnutí volné podstavy kužele. Tomu lze zabránit použitím dodatečné úpravy – přidáním úhlu β' , jehož velikost se pohybuje v rozmezí 30 až 50 % velikosti původního úhlu β . Geometrická úprava se nachází v příloze 4. Oba nástrojové úhly se podílejí při špatné konstrukci na vyhřeznutí materiálu na větším průměru dané redukce, jak ukazuje obr. 51. Vyhřeznutí nastane tehdy, pokud je axiální síla příliš malá, a mělo by se pohybovat v rozmezí 0,1 až 0,4 mm. Nebo mohou vznikat závitky (obr. 51) na vnější ploše, jež vznikají obdobně jako vyhřeznutí. [36; 37]

Velmi důležitým parametrem je délka vývalku, přesnost závisí na jeho dalším zpracování. Pokud tvářenec slouží jako výchozí polotovár pro zápusťkové kování, proto ho lze vyrábět z tyčí, které budou děleny v rámci válcovacího procesu, přičemž bude použit pouze jeden nůž na oddělení hotového polotovaru od zbytku tyče, což vede k určitému znepresnění délky vývalku. Nejpresnější je dělení dvěma noži, avšak za produkce většího odpadu na okrajích polotovaru, proto se musí zmenšit na minimum. [36]

Při konstrukci vývalku, respektive při předepisování tolerancí a přesností, lze uplatnit následující přístupy [36; 37]:

- a) Tvrdé předepisování – vychází se z experimentálně stanovených rozsahů jednotlivých potřebných parametrů. V zásadě platí, že se přídavky pohybují v rozmezí 0,5 až 1 mm na plochu. Nerozlišuje se, zda se jedná o průměr anebo o délku jednotlivých průměrů. Pokud se na hotovém vývalku nacházejí zápichy malých rozměrů, zjednoduší se v daném místě vývalku plnou plochou, zabrání se tím zbytečnému opotřebení nástroje [36]. V tab. 4 jsou uvedeny veškeré potřebné údaje, nutné k tolerování vývalku. Slouží-li vývalek jako výchozí polotovár pro další objemové tváření, pohybují se tolerance v řádech nižších jednotek milimetrů, zejména u hliníku. Pro snadnější orientaci v použitých tolerancích se zde nachází obr. 52. [37]

Tab. 4 Parametry vývalku [37].

Výrobní tolerance tvářených ploch*			
Rozměrové tolerance [mm]		$\varnothing D_{red} \leq 25 \text{ mm}$	$\varnothing D_{red} > 25 \text{ mm}$
	průměrové	$\pm 0,2$	$\pm 0,4 \div 0,5$
	délkové	$\pm 0,3 \div 0,4$	$\pm 0,4$
Délky vývalků [mm]	dělené z jedné strany	$\pm 1,0 \div 1,5$	
	dělené ze dvou stran	$\pm 0,4 \div 0,6$	
Geometrické tolerance [mm]	ovalita průměru	$> 0,25$	
	nesouosost průměrů	$> 0,3$	
	povrchové vady, stopy po nástroji, okuje, oduhličení → do hloubky	max 0,3	

* tolerance platí pro polotovary, které budou dále použity k třískovému obrábění

- b) Komplexní předepisování – návrh vývalku v tomto případě vychází z komplexního určení složitosti hotové součásti. Nejprve se určí, o jaký materiál se jedná (uvažováno pouze pro ocel). Pokud je v chemickém složení je uhlík obsažen do 0,065 % a legury do 0,5 % (Mn, Ni, Cr, Mo, V a W), pak se materiál označí jako **M₁**. Jestliže obsah uhlíku i legur převyšují výše uvedený povolený obsah, patří materiál do skupiny označené jako **M₂**. Dále se provede výpočet rozdělovacího indexu **I** a po vyhledání rozsahu v tab. 5 se určí konkrétní skupina obtížnosti. Výpočet dle rovnice [38]:

$$I = \frac{m_V}{m_O}, \quad (2.61)$$

kde: m_v – hmotnost vývalku [kg],
 m_o – hmotnost výchozího polovaru [kg]

Tab. 1 Skupina obtížnosti podle hmotnosti [38]

Index I	Skupina obtížnosti
0,63 – 1	S _{k1}
0,32 – 0,63	S _{k2}
0,16 – 0,32	S _{k3}
< 0,16	S _{k4}

Na závěr se stanoví parametr w , jenž zohledňuje velikost redukce. Jestliže platí $w > 0,5$, označí se vývalek jako **T₁**, zbylé případy spadají pod **T₂**. Vypočítá se na základě rovnice:

$$w = \frac{d}{d_0} = \frac{1}{\delta} \quad (2.62)$$

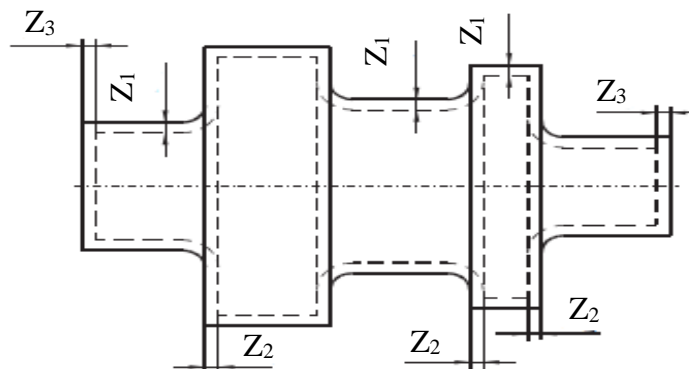
Po vykonání výše uvedeného postupu se určí příslušné přídavky, a to buď na plochu průměru a jeho délku a přídavky na čelní plochy vývalku, jak ukazuje obr. 53. [38] Velikosti se zvolí podle. Změna nastává pouze u Z_3 , jež se počítá dle vztahu [38]:

$$Z_3 = Z_2 + 0,5 \quad (2.63)$$

Tolerance průměrů určují se podle největšího průměru (shodně s kováním [74]). Shodně se určují délkové tolerance. Veškeré tolerance a úchytky jsou v příloze 6. [38]

Existují však dvě výjimky [38]:

- pokud platí $w < 0,5$, zvětší se spodní úchylka o 0,5 mm,
- horní úchylky vnitřních délek (od čela k čelu) jsou zvětšeny o 0,5 mm.



Obr. 52 Přídavky při komplexním předepisování [38].

2.5.6 Vhodné materiály a životnost

Nástroje PKV nejsou zatěžovány tak vysokým tlakovým namáháním jako nástroje pro objemové tváření (zápustky, tažnice apod). Největší zatížení se na nástrojích objevují převážně v podobě smykového namáhání, lze tudíž použít materiály s nižší pevností při zachování houževnatosti. Během tvářecího procesu však dochází k velkému tření mezi tvářeným polotovarem a stykovými plochami nástroje, proto jsou vyžadovány nástroje s vysokou odolností proti otěru při zachování tepelné odolnosti. [7; 37; 76; 77]

Mezi velmi často používané materiály patří nástrojové oceli, konkrétně se jedná například o 19 554, 19 642, případně 19 436, 19 650, 19 721. Jak bylo uvedeno výše, oceli musí splňovat požadavek na vysokou odolnost proti otěru, což může být docíleno jednak chemickým složením

materiálu, jednak chemicko-tepelným zpracováním, konkrétně nitridací (uvádí se navýšení životnosti nástroje až o 40 % [37]). Hloubka nitridační vrstvy by měla odpovídat alespoň 0,4 mm pod povrch nástroje při tvrdosti po kalení 48 HRC (platí pro ocel 19 552). [7; 37; 78]

Jako výchozí polotovary pro nástroj se většinou využívá kovaného prstence, který se následně nadělí na jednotlivé segmenty, z nichž se vyrobí samotný nástroj. Pokud se válcuje ocelový materiál, využije se děleného nástroje, kdy se dílčí segmenty umístí za sebe na obráběcí stroj a obrobí se naráz na jedno upnutí. Jedná-li se o hliník, je nutné, aby segment z prstence odpovídal velikosti celého jednoho kusu nástroje, nesmí být dělený. [7; 37]

Materiál dělicích nožů taktéž bývá nástrojová ocel, například 19 436, 19 552, 19 721. Hlavními požadavky jsou, s ohledem na charakter opotřebení, houževnatost a vysoká odolnost proti ořezu. Tomu odpovídají rychlořezné oceli 19 855 nebo 19 856, které se dále zušlechťují zhruba na tvrdost 55 HRC. Nože musí být zušlechťeny na střední tvrdost. [36; 37]

Životnost nástroje velmi závisí, kromě mechanických vlastností samotného materiálu, také na tvaru vývalku, jeho složitosti. To vše je navíc ovlivněno přípustným opotřebením činných ploch nástroje. Nejvyšší opotřebení je dosaženo u vývalků, které jsou tvarově složité a mají pevně dané úzké toleranční pole. Nejmenší opotřebení, a tudíž nejvyšší životnost, vykazují nástroje pro výrobu polotovarů určených ke kování. [37]

Na funkčních plochách se provádí renovace odebráním potřebného množství svrchního materiálu tak, aby se obnovily tvářecí vlastnosti nástroje. O velikost snížení nástroje se musí upravit sevření mezi válci. Celkový počet renovací závisí na tvaru nástroje, běžně se provádí až 7 renovací. Nadměrně opotřebovaný nástroj zhoršuje jakost povrchu redukováných ploch jejich rozměrů, zvyšuje se ovalita a kuželovitost redukováných průměrů a celkově dochází ke zhoršení válcovacího procesu. Po renovaci musí vždy následovat nitridace. [37]

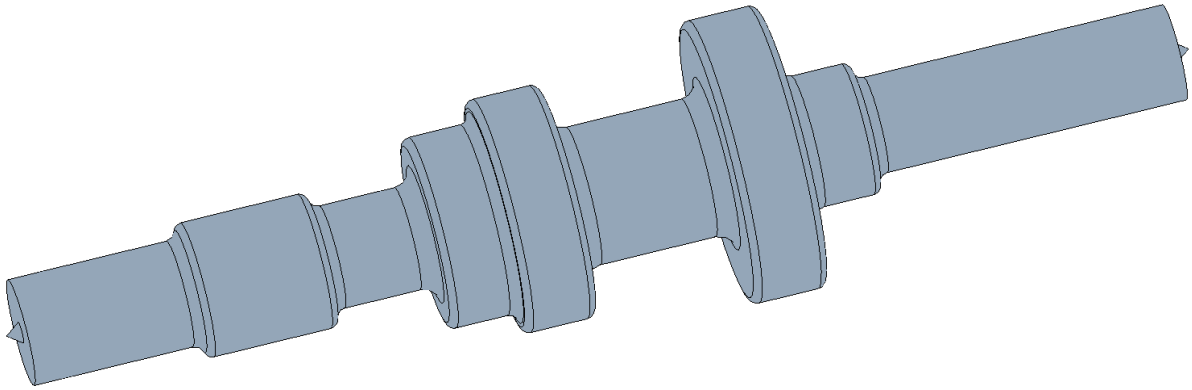
na lze dělit na základní (reflektuje počet vyrobených kusů do první renovace) a celkovou, která je vyjádřena počtem vyrobených kusů během základní životnosti, vynásobená počtem renovací. Obvykle se během jednoho tvářecího cyklu vyrobí 30 až 60 000 ks vývalků, s tím že lze provést až 7 renovací. [7; 37; 54]

Délka životnosti závisí na [7; 37; 54]:

- vlastnostech materiálu nástroje,
- složitosti a materiálu vývalku,
- požadované přesnosti a jakosti povrchu vývalku.

3 NÁVRH VÝROBY

Práce se zaměřuje na návrh nástroje pro výrobu předvalku převodového hřídele (obr. 54), obsažený na výkresu DP_209306_01, jenž se využívá v převodových skříních automobilů. Vývalek je zhotoven z oceli 15 230. Zvolenou technologií je příčné klínové válcování, jenž spadá do objemového tváření zatepla. Jedná se o velmi specifickou výrobní metodu, k níž dosud nebyly vydány žádné normy, proto autor vychází hlavně z praktických zkušeností z výroby.



Obr. 53 Vývalek.

Základním krokem u konstrukce nástroje je určení požadované redukce. Platí, že musí být dosažena na jednu obrátku nástroje a maximální hodnota je 80 % u jednoduchých tvarů. Spočítá se na základě poměru maximálního a nejmenšího průřezu, respektive průměru, podle vztahu (2.1):

$$\varepsilon = \frac{D^2 - d^2}{D^2} \cdot 100 = \frac{80^2 - 27^2}{80^2} \cdot 100 = 88,609 \%$$

Hodnota redukce je zaokrouhlena na 86,6 %, což přesahuje dovolenou maximální přístupnou redukci. Vývalek nelze vyrobit na jednu operaci, jelikož se zvyšuje riziko produkce neshodných kusů.

Z výsledku vyplývá, že nástroj nelze zkonstruovat jako jednooperační. Proto bude součást válcována na dvě operace, jak ukazuje obr. 55, viz následující postup:

- První operace - nejprve se válcuje zjednodušený tvar, na obr. 54 znázorněna světle zelenou barvou tvářená plocha. Velikost redukce, vypočtená podle rovnice (2.1), je:

$$\varepsilon_4^{1op} = \frac{D^2 - d_4^2}{D^2} \cdot 100 = \frac{80^2 - 38^2}{80^2} \cdot 100 = 77,437 \%$$

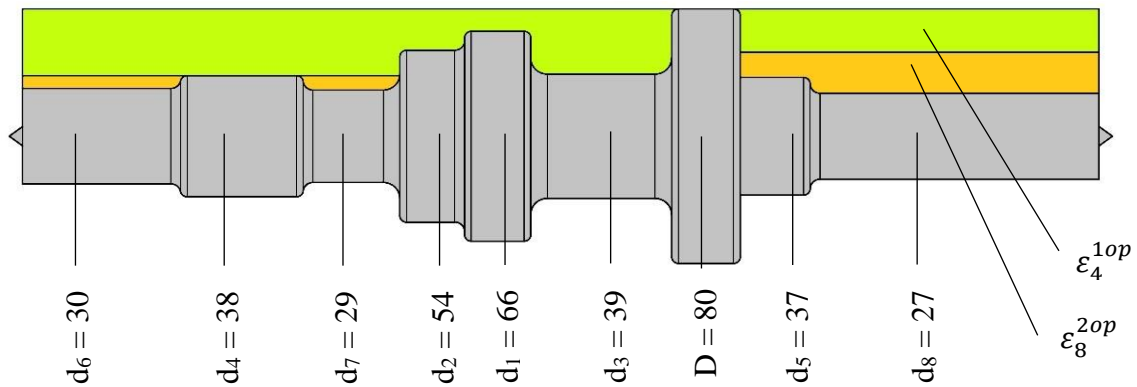
kde: d_4 – průměr, na kterém dochází k největší deformaci, d_4 má velikost 38 mm.

Po zaokrouhlení dosáhla redukce hodnoty 77,5 %, tzn. upravený tvar vývalku lze zhotovit v první operaci.

- Druhá operace – zde dochází k doválcování zbylých požadovaných průměrů. K maximální redukci dochází na průměru 27 mm, tudíž její velikost se bude počítat podle (2.1):

$$\varepsilon_8^{2op} = \frac{d_9^2 - d_8^2}{d_9^2} \cdot 100 = \frac{45^2 - 27^2}{45^2} \cdot 100 = 64 \%$$

Z posledního výpočtu je patrné, že d_9 byl zvolen jako mezikrok k doválcování vývalků v takové velikosti, aby bylo dostatek materiálu při druhé operaci. Pokud by zde bylo méně materiálu, nemusela by se přenášet rotace z pracovních válců na vývalek. Což by mohlo za následek deformaci příčných průřezů.



Obr. 54 Válcování na dvě operace.

Druhým krokem je určení velikosti polotovaru, který v tomto případě vychází z objemu hotové součásti. K usnadnění výpočtu autor použil CAD software Autodesk Inventor Professional 2022. Z předem obdrženého výkresu byl zhotoven 3D model a z něj následně zjištěna velikost objemu V_s , jež činí 434 517,256 mm³. Celkový postup určení požadovaných rozměrů je následující:

- objem odpadu se stanoví pomocí vztahu [37]:

$$V_o = 0,2 \cdot D \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (3.1)$$

kde: D – největší průměr součásti [mm], dle výkresu DP_209306_01 80 mm,

$$V_o = 0,2 \cdot 80 \cdot \frac{\pi \cdot 80^2}{4} = 80\,424,77 \text{ mm}^3$$

- celkový objem polotovaru se rovná součtu objemu hotové součásti V_s a objemu odpadu V_o , viz následující rovnice:

$$V_p = V_s + 2 \cdot V_o \quad (3.2)$$

$$V_p = 434\,517,256 + 2 \cdot 80\,424,77 = 595\,368,796 \text{ mm}^3$$

Objem polotovaru autor zaokrouhlil na celé číslo, tj. 595 369 mm³, kvůli snazšímu určení jeho délkového rozměru.

- délka polotovaru L_p vychází z výše uvedeného objemu polotovaru, kdy se délka vyjádří na levou stranu rovnice. Vzorec má tvar:

$$L_p = \frac{4 \cdot V_p}{\pi \cdot D^2} \quad (3.3)$$

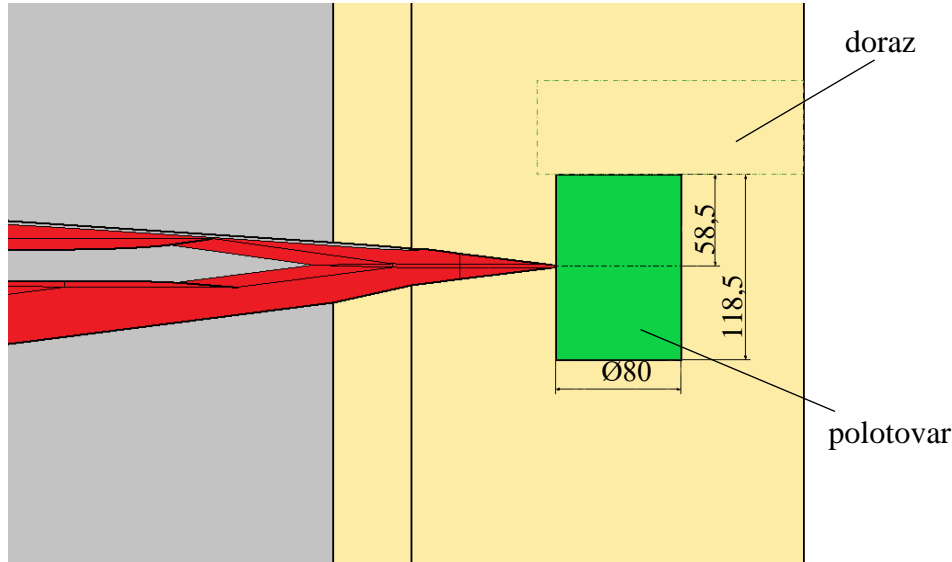
$$L_p = \frac{4 \cdot 595\,369}{\pi \cdot 80^2} = 118,44 \text{ mm}$$

Při PKV se vychází z maximálního průměru polotovaru, jenž není tvářen a zůstává zachován. Celkovou délku autor zaokrouhlil na 118,5 mm.

Vývalek bude válcován z přířezu (ocel 15 230) o průměru 80 mm a délce 118,5 mm. Polotovar bude do stroje zakládán v podobě špalíků, jelikož se s nimi snadno manipuluje. Budou děleny na pásové pile z tyčového materiálu v dostupné metráži vybraného hutního podniku.

3.1 Rozvržení nástroje

V počáteční fázi první operace dochází k zanořování vnikací části nástroje do ohřátého polotovaru. Vnikací klín dělí tvářený špalík na dvě shodné poloviny tak, aby během válcování zůstal vývalek správně vystředěn a tvářený materiál se rovnoměrně přesouval v axiálním směru k čelům na obou stranách. Nejvhodnější bod vniku je na d_1 (obr. 55) v polovině jeho dříku.



Obr. 55 Umístění polotovaru na nástroji.

Polotovaru bude do stroje zakládán zleva, tudíž doraz, respektive místo vniku, je nutné spočítat podle pravé strany vývalku. Nejsnazší způsob je převedení dílčích délkových rozměrů na procenta a sečíst je, viz následující příklad pro průměr 27 mm:

- nejprve se zjistila délka dříku podle výpočtu:

$$L_8 = l_5 - l_8 \quad (3.4)$$

kde: l_5 – délka náležící k průměru d_5 [mm],
 l_8 – délka náležící k průměru d_8 [mm].

$$L_8 = 41,5 - 20,5 = 21 \text{ mm}$$

- výsledek se dále převedl na procenta:

$$L_{8\%} = \frac{L_8}{L_c} \cdot 100 \quad (3.5)$$

kde: L_c – celková délka vývalku [mm].

$$L_{8\%} = \frac{21}{322,7} \cdot 100 = 26,84 \%$$

Zbylé délkové rozměry se nacházejí v příloze 7.

- následuje součet dílčích procentuálních délek:

$$L_{Z\%} = L_{8\%} + L_{3\%} + \frac{1}{2}L_{1\%} + L_{\%} \quad (3.6)$$

$$= 26,84 + 13,11 + \frac{1}{2} \cdot 6,14 + 6,35 = 49,37 \%$$

Z matematického hlediska se jeví jako lepší varianta umístit bod vnikacího klínu do přechodu mezi d_1 a d_2 . Bohužel přístup nereflektuje skutečnost, že během válcování

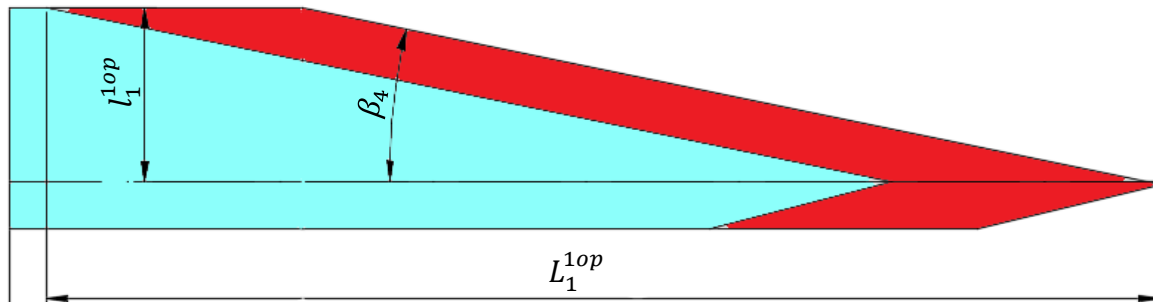
nedochází k vedení vývalku. Proto může dojít vlivem špatného záběru ke vzniku vad (nedoválcovaná hrana, ovalita apod.).

- na závěr se výše uvedené převede na polotovar a určí se tak vzdálenost pravého čela od místa zanoření, viz rovnice:

$$L_{doraz} = \frac{L_{z\%}}{100} \cdot L_p \quad (3.7)$$

$$= \frac{43,37}{100} \cdot 118,5 = 58,503 \text{ mm}$$

Vzdálenost pravého čela od místa zanoření je po zaokrouhlení 58,5 mm. Shodně bude nastaven i doraz na daném dorazu umístěném na horním válci. Výše uvedené znázorňuje obr. 56.



Obr. 56 Stoupání.

Při tváření platí zákon zachování objemu, při víceoperačním tváření se pracuje se stejně velkým objemným tělesem. Proto je nutné spočítat délku dřívků pro průměry 38 mm na levé straně a 45 mm na pravé straně. Díky přesouvání se materiálu v axiálním směru je nutné k délce dřívku připočítat navíc přídavek 5 mm, a to z bezpečnostních důvodů. Následuje postup výpočtu:

- levá strana od zmíněného průměru se vypočte:

$$V_1^{1op} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_6^2 \cdot l_6 + d_4^2 \cdot (l_4 + 5) + d_7^2 \cdot l_7) \quad (3.8)$$

$$= \frac{\pi}{4} \cdot (30^2 \cdot 47,3 + 38^2 \cdot (36,8 + 5) + 29^2 \cdot 29) = 99\,995,5 \text{ mm}^3$$

Přídavek se připočítává k tomu průměru, který se válcuje v první operaci a bude sloužit jako výchozí pro druhou operaci.

- délka dřívku válcovaného průměru se spočítá dle vztahu:

$$l_1^{1op} = \frac{4 \cdot V_1^{1op}}{\pi \cdot d_4^2} \quad (3.9)$$

$$= \frac{4 \cdot 99\,995,5}{\pi \cdot 38^2} = 88,1704 \text{ mm}$$

Výsledek autor zaokrouhlil na 88,2 mm.

- délka redukčních ploch vychází ze vztahu stoupání závitu, jenž po úpravě má tvar:

$$L_1^{1op} = \frac{l_1^{1op}}{\tan \beta_4} \quad (3.10)$$

$$= \frac{88,2}{\tan 7,3^\circ} = 688,508 \text{ mm}$$

Délka redukční plochy je (stoupání), jak znázorňuje schematicky obr. 57, po zaokrouhlení 688,5 mm. Během konstrukce nástroje jsou tyto údaje hlavně používány jako orientační.

Pravá strana vývalku má totožnou skladbu výpočtu jako levá. Opět je zde důležité přičíst 5 mm jako přídavek na bezpečnost. Skládá se z průměrů 37 mm a 27 mm. Postup výpočtu je následující:

- stanovení celkového objemu na pravé straně odpovídá rovnici

$$V_2^{1op} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_5^2 \cdot l_5 + d_7^2 \cdot l_7 + d_9^2 \cdot 5) \quad (3.11)$$

kde: d_9 – doplňkový průměr o velikosti 45 mm.

$$= \frac{\pi}{4} \cdot (37^2 \cdot 21 + 27^2 \cdot 86,6 + 45^2 \cdot 5) = 80\,114,853 \text{ mm}^2$$

- délka dřívku se vypočte podle rovnice:

$$l_2^{1op} = \frac{4 \cdot V_2^{1op}}{\pi \cdot d_9^2} \quad (3.12)$$

$$= \frac{4 \cdot 80\,114,853}{\pi \cdot 45^2} = 50,373 \text{ mm}$$

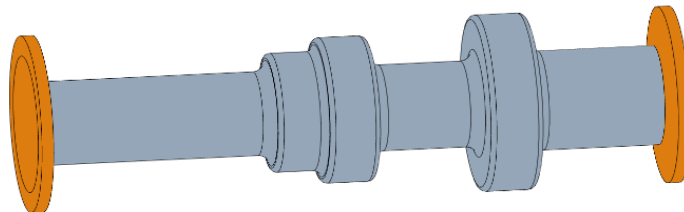
Výpočet je zaokrouhlen na 50,4 mm.

- délka redukčních ploch se vypočte dle vztahu:

$$L_2^{1op} = \frac{l_2^{1op}}{\tan \beta_4} \quad (3.13)$$

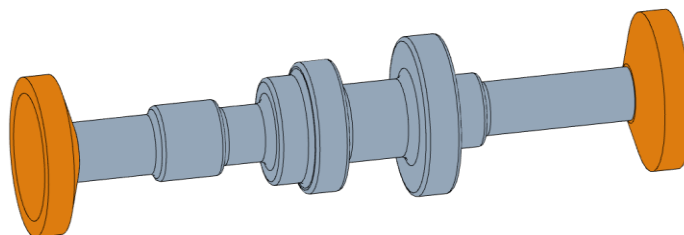
$$= \frac{50,4}{\tan 8,7^\circ} = 329,365 \text{ mm}$$

Na obr. 58 se nachází tvar vývalku po první operaci. Šedá barva odkazuje na tělo vývalku, které bylo v této operaci vyválcované. Modrá barva označuje dřívky, z nichž se v druhé operaci bude válcovat zbylá část vývalku. Hnědá barva reprezentuje odpad, jenž se postupně zvětší během tváření a po kalibrování bude oddělen dělicími noži.



Obr. 57 Vývalek po první operaci.

Druhá operace se skládá z tvářecí části, kde se doválcují okrajové části vývalku, jak ukazuje obr. 59. Po ní následuje kalibrační část, která odstraňuje vady a deformace tvaru, zároveň zlepšuje požadovanou válcovitost polotovaru hřídele. Na konci nástroje se nachází samostatný nožový držák osazený dvěma noži. Slouží k oddělení odpadu.



Obr. 58 Vývalek po druhé operaci.

3.2 Technologické a konstrukční výpočty nástroje

Po určení redukce následuje zvolení vnikacích úhlů (úhlů klínů) β a tvářecích úhlů α . Jde o poměrně náročnou disciplínu z hlediska správného tvářecího procesu, tudíž se na ní klade velký důraz, protože se zároveň jedná o alfa a omega celého příčného klínového válcování.

Válcování proběhne na dvě operace, proto i jednotlivé úhly jsou určeny pro dílčí operace zvlášť, V první operaci se válcují průměry 66 mm, 54 mm, 39 mm a 38 mm z počátečního průměru 80 mm, viz obr. 55. Určování probíhalo takto:

- Nejprve se spočítal deformační poměr podle rovnice (2.2), následovalo určení dílčích úhlů dle vzorců (2.44) a (2.45), včetně ověření dle podmínky (2.46).
- Druhá varianta vycházela z výpočtu dílčích redukcí pro jednotlivé válcované průměry dle rovnice (2.1) a vynesení do obr. 41, přičemž se tvářecí úhly odhadly dle velikosti dílčích délek.

V průběhu stanovování úhlů autor práce přišel na to, že vztahy (2.44) a (2.45) neodpovídají doporučenému rozsahu obsaženém v tab. 3. Proto autor využil kombinace výše uvedených variant v následující podobě:

1. výpočet deformačního poměru a redukce, podle nichž stanovil tvářecí úhel α s přihlédnutím k obr. 41 a dílčí délce dřívku válcovaného průměru,
2. stanovení vnikacího úhlu β podle délky dřívku,
3. kontrola součinu tangent jednotlivých úhlů na daném průměru podle podmínky (2.46) tak, aby se co nejvíce přiblížil k horní hranici (snížení rizika deformací a výskytu vad).

Pro lepší pochopení rozhodovacího algoritmu volby úhlů se zde nachází ukázka pro průměr 38 mm, který je pro první operaci stěžejní. Nejprve byl stanoven deformační poměr podle rovnice (2.2):

$$\delta_4 = \frac{D}{d_4} = \frac{80}{38} \cong 2,1053 [-]$$

Poté se určila redukce ϵ_4 , podle níž byl odečten z obr. 41 tvářecí úhel α_4 na velikost 25° . Vnikací úhel β_4 o velikosti $7,3^\circ$ byl zvolen na základě křivky v obr. 41, jež odpovídá $\beta = 10^\circ$ a horní hranici platné podmínky, viz (2.46):

$$\begin{aligned} \tan \alpha \cdot \tan \beta &\leq 0,08 \\ \tan 25^\circ \cdot \tan 7,3^\circ &\leq 0,08 \\ 0,0543 &\leq 0,08 \end{aligned}$$

Dalším důvodem $\beta_4 = 7,3^\circ$ byl i fakt, že je omezená celková délka nástroje, respektive opásání kolem pracovního válce, které nesmí být větší než 330° . Stejným způsobem je uvažováno nad β_9 . Shodný přístup byl aplikován na zbylé úhly, použité v první operaci, jak ukazuje tab. 4.

Tab. 2 Volba pracovních úhlů pro 1. operaci.

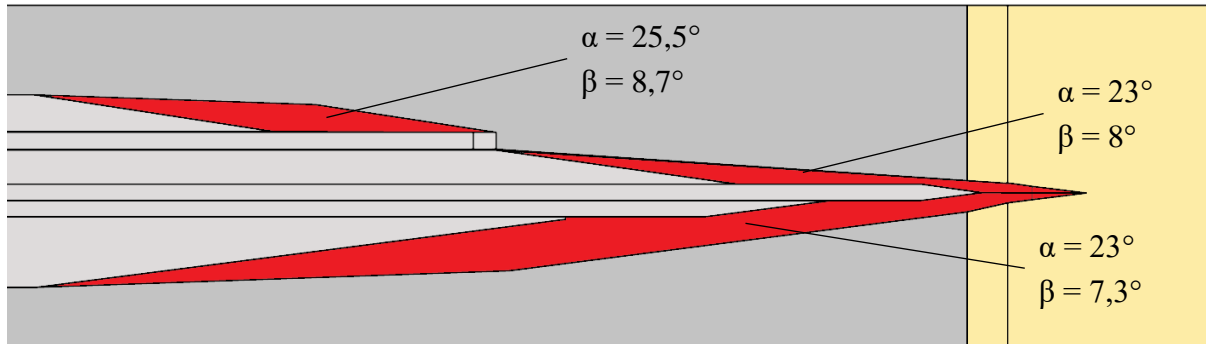
	d_i [mm]	δ_i [-]	ϵ_i [%]	α_i [°]	β_i [°]	ověření $\tan(\alpha) \cdot \tan(\beta)$
1	66	1,2121	31,94	23	7,3	0,0543
2	54	1,4815	54,44	23	7,3	0,0543
3	39	2,0513	76,23	23	8	0,0596
4	38	2,1053	77,50	23	7,3	0,0543
9	45	1,777	68,35	25,5	8,7	0,0729

Na rozvinutém nástroji na obr. 60 lze vidět, že jednotlivé úsečky, reprezentující dílčí funkční plochy, na sebe plynule navazují. Výjimku tvoří okrajový průměr 45 mm, jelikož se nachází za průměrem 80 mm, na němž nedochází k tvářecímu procesu.

Ve druhé operaci se válcují průměry 37 mm, 30 mm, 29 mm a 27 mm z předchozích průměrů 38 mm a 45 mm, které jsou v navazujících výpočtech uvažovány jako výchozí. Postup stanovení úhlů byl stejný jako již výše popsany, dílčí výsledky jsou uvedeny v tab. 5.

Tab. 3 Volba nástrojových úhlů pro 2. operaci.

	d_i [mm]	δ_i [-]	ε_i [%]	α_i [°]	β_i [°]	ověření $\tan(\alpha) \cdot \tan(\beta)$
5	37	1,027	32,39	25	9	0,0738
6	30	1,2667	37,67	22,5	7	0,0508
7	29	1,3103	41,76	22,5	6,2	0,045
8	27	1,4074	49,52	25	8	0,0655



Obr. 59 Zjednodušený rozvin s úhly.

3.2.1 Kinematika a stykové plochy

Při válcování dochází k posunu nástroje po tvářenci, díky čemuž probíhá tvářecí proces. Níže uvedené výpočty pro $d_4 = 38$ mm slouží jako názorná ukázka postupu určení kinematiky. Postup je následující:

- velikost posunu (posunutí stopy) s se vypočte dle rovnice (2.7):

$$s_4 = \pi \cdot R \cdot \tan \beta = \pi \cdot 40 \cdot \tan 7,3^\circ = 16,1 \text{ mm},$$
- v návaznosti na posunutí stopy se počítá velikost válcovacího kroku u podle rovnice (2.8):

$$u_4 = k^2 \cdot \pi \cdot R \cdot \tan \beta = \frac{r_4^2}{R^2} \cdot \pi \cdot R \cdot \tan \beta = \frac{r_4^2}{R} \cdot \pi \cdot \tan \beta =$$

$$= \frac{19^2}{40} \cdot \pi \cdot \tan 7,3^\circ = 3,632 \text{ mm}$$

- materiál se během válcování nechová jako ideálně tuhý, tudíž se deformuje a je zapotřebí přepočítat válcovací krok podle rovnice (2.10):

$$u_{d4} = u_4 \cdot k_{d5} = 3,632 \cdot 1,725 = 6,265 \text{ mm},$$

kde: k_d – koeficient zvětšení, vypočtený dle rovnice (2.11):

$$k_{d4} = 2,2 - k_4 = 2,2 - 0,475 = 1,725$$

- určení druhu stykové plochy podle nerovnosti, která vychází nejdříve vypočtením přepony b , viz (2.16):

$$b_4 = \frac{R - r_4}{\tan \alpha_4} = \frac{40 - 19}{\tan 23^\circ} = 49,4729 \text{ mm}$$

Z porovnání výše uvedených výsledků podle rovnic pro rozdělení stykových ploch podle [36] vyplývá, že d_4 patří do skupiny $u_d < b$, tj do skupiny číslo jedna. Zbylé výpočty jsou uvedeny v příloze 8.

Po určení délek kroku u_{di} je zapotřebí stanovit velikosti stykové plochy dle příslušného kartézského souřadného systému. Pro skupinu číslo jedna ($u_d < b$), je postup následující:

- nejprve se stanovila velikost první plochy v ose y podle vztahu (2.12):

$$S_{P4}^{y1} = \frac{a_{14} \cdot u_{d4}}{2} = \frac{10,3987 \cdot 6,265}{2} = 32,5758 \text{ mm}^2,$$

kde: a_{14} – výška trojúhelníka č. 1; vypočtena dle rovnice (2.13):

$$\begin{aligned} a_{14} &= \sqrt{2 \cdot r_4 \cdot v_4 + v_4^2} = \sqrt{2 \cdot r_4 \cdot u_{d4} \cdot \tan \alpha_4 + (u_{d4} \cdot \tan \alpha_4)^2} \\ &= \sqrt{2 \cdot 19 \cdot 6,265 \cdot \tan 23^\circ + (6,265 \cdot \tan 23^\circ)^2} = \\ &= 10,3987 \text{ mm}, \end{aligned}$$

- dále byla vypočtena velikost druhé plochy v ose y podle vztahu (2.15):

$$\begin{aligned} S_{P4}^{y2} &= b_4 \cdot \frac{a_{14} + a_{24}}{2} - \frac{a_{14} \cdot u_{d4}}{2} = 49,7 \cdot \frac{10,3987 + 14,8267}{2} - \\ &- \frac{14,8267 \cdot 6,265}{2} = 591,412 \text{ mm}^2, \end{aligned}$$

kde: a_{24} – výška trojúhelníka č. 2; vypočtena dle rovnice (2.17):

$$\begin{aligned} a_{24} &= \sqrt{2 \cdot r_4 \cdot v_4 - v_4^2} = \sqrt{2 \cdot r_4 \cdot u_{d4} \cdot \tan \alpha_4 - (u_{d4} \cdot \tan \alpha_4)^2} \\ &= \sqrt{2 \cdot 19 \cdot 6,265 \cdot \tan 23^\circ - (6,265 \cdot \tan 23^\circ)^2} = \\ &= 14,8267 \text{ mm}. \end{aligned}$$

- styková plocha v ose x byla vypočtena podle vztahu (2.18):

$$\begin{aligned} S_{P4}^x &= \frac{a_{24}}{2} \cdot \left(R - r_4 + \frac{v_4}{2} \right) + \frac{a_{14}}{2} \cdot (R - r_4 - v_4) \\ &= \frac{a_{24}}{2} \cdot \left(R - r_4 + \frac{u_{d4} \cdot \tan \alpha_4}{2} \right) + \frac{a_{14}}{2} \cdot (R - r_4 - u_{d4} \cdot \tan \alpha_4) \\ &= \frac{14,8267}{2} \cdot \left(40 - 19 + \frac{6,265 \cdot \tan 23^\circ}{2} \right) + \frac{103987}{2} \\ &\quad \cdot (40 - 19 - 6,265 \cdot \tan 23^\circ) = \\ &= 257,611 \text{ mm}^2. \end{aligned}$$

- jako poslední byla vypočtena velikost plochy v ose z dle rovnice (2.19):

$$S_{P4}^z = S_{P4}^x \cdot \tan \alpha_4 = 257,611 \cdot \tan 23^\circ = 109,35 \text{ mm}^2.$$

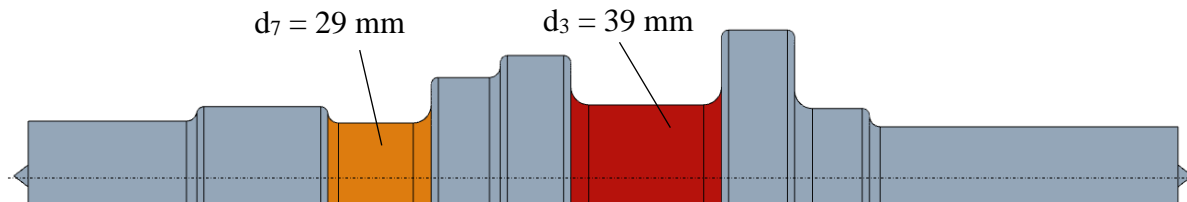
Velikosti zbylých ploch uvádí tab. 6. Musejí se spočítat kvůli zjištění maximálního zatížení tvářecími silami, které pak dále vstupují do výpočtu kroučícího momentu.

Tab. 4 Velikosti ploch dílčích průměrů v [mm^2]

	d_1	d_2	d_9	d_3	d_3	d_5	d_6	d_7	d_8
S_{y1}	162,076	93,403	76,596	40,707	32,575	74,391	20,341	15,296	25,455
S_{y2}	209,146	469,508	573,629	617,193	591,411	53,588	62,949	69,477	169,241
S_x	113,829	215,167	289,502	270,077	257,611	37,608	29,213	31,179	83,933
S_z	48,317	91,333	138,085	114,641	109,349	17,536	12,1	12,915	39,139

3.2.2 Rozměry ploch

V předcházející kapitole byl podrobně vysvětlen technologický postup válcování součásti na dvě operace. Vzhledem k tvaru polotovaru převodového hřídele je zapotřebí ověřit, zda lze vyválcovat označená místa na obr. 61 pomocí jednoduché nebo upravené geometrie, tzn. definování vnikacího úhlu β a změna tvářecího úhlu α . Tvářecí úhly mohou dosahovat více než



Obr. 60 Upravené plochy.

90°.

V rámci první operace bude délka dílčích činných ploch záviset primárně na šířce dřívku na průměru $d_3 = 39$ mm. Postup konstrukce je následující:

- nejprve se určí šířka základní redukční plochy b_{xm3} podle rovnice (2.56):

$$b_{xm3} = \frac{R - r_3}{\tan \alpha_3} = \frac{40 - 19,5}{\tan 23^\circ} = 48,295 \text{ mm}$$

- dále se určí vzdálenost pomocné redukční plochy na dřívku pomocí rovnice (2.57)

$$\begin{aligned} x_{m3} &= \frac{1}{3 \cdot \tan \alpha_3} \cdot \left(\frac{R^3}{r_3^2} - 3 \cdot R + 2 \cdot r_3 \right) + \frac{\pi}{2} \cdot \left(R - \frac{r_3^2}{R} \right) \cdot \tan \beta_3 \\ &= \frac{1}{3 \cdot \tan 23^\circ} \cdot \left(\frac{40^3}{19,5^2} - 3 \cdot 40 + 2 \cdot 19,5 \right) + \frac{\pi}{2} \cdot \left(40 - \frac{19,5^2}{40} \right) \cdot \tan 8^\circ \\ &= 75,295 \text{ mm} \end{aligned}$$

- navazuje rozhodnutí, zda budou použity „jednoduché“ nebo složité redukční plochy, jenž se určí podle podmínky z nerovnice (2.59):

$$\begin{aligned} e_3 &< b_{xm3} + x_{m3} \\ 42,3 &< 48,295 + 75,295 \\ 42,3 &< 123,59 \end{aligned}$$

kde: e_3 – délka dřívku příslušného průměru [mm]; velikost 42,3 mm určena výkresem DP-209306-01.

Z výše uvedených výsledků vyplývá, že se konstrukce ploch musí provést podle složité varianty. Výpočet upravené vede na řešení kubických rovnic.

Autor [38] odvodil a upravil následující rovnici:

$$v_{r3}^3 + a_{r3} \cdot v_{r3}^2 + b_{r3} \cdot v_{r3} + c_{r3} = 0 \quad (3.14)$$

kde: v_r – šířka základní redukční plochy při použití kubických rovnic [mm],

a_r – koeficient kvadratického členu, výpočet uveden v příloze 9,

b_r – koeficient lineárního členu, výpočet uveden v příloze 9,

c_r – absolutní člen, výpočet uveden v příloze 9.

Vzhledem k obtížnosti řešení rovnice (3.14) je vhodné ji převést na redukovaný tvar [36; 78]:

$$y_3^3 + p_p \cdot y + q = 0 \quad (3.15)$$

kde: y_3 – vyjadřuje substituci pro v_r , jak vyplývá z rovnice [36]:

$$v_{r3} = y_3 - \frac{a_{r3}}{3} \quad (3.16)$$

p – koeficient v lineárním členu redukované rovnice, výpočet uveden v příloze 9,

q – absolutní člen redukované rovnice, výpočet uveden v příloze 9.

Charakter kubické rovnice se odvíjí od počtu a druhu jejích kořenů, proto se zavádí takzvaný diskriminant. Pokud vyjde větší než nula, rovnice má jeden reálný kořen a dva komplexně sdružené imaginární kořeny, s nimiž v praxi nelze počítat [36; 79]. Diskriminant se vypočte podle rovnice [79]:

$$\begin{aligned} D_d &= \left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3 \\ &= \left(\frac{-623\,322}{2}\right)^2 + \left(\frac{-70,608}{3}\right)^3 = 97\,132\,557\,623 \end{aligned} \quad (3.17)$$

Reálný kořen má tvar [36]:

$$y_3 = A + B \quad (3.18)$$

kde: A – výpočet uveden v příloze 9,

B – výpočet uveden v příloze 9.

$$= 85,422 + 0,276 \cong 85,7$$

Šířka základní redukční plochy při použití kubických rovnic tudíž vychází ze substituce, viz rovnice (3.16):

$$v_{r3} = y_3 - \frac{a_{r3}}{3} = 85,7 + \frac{149,095}{3} = 36 \text{ mm}$$

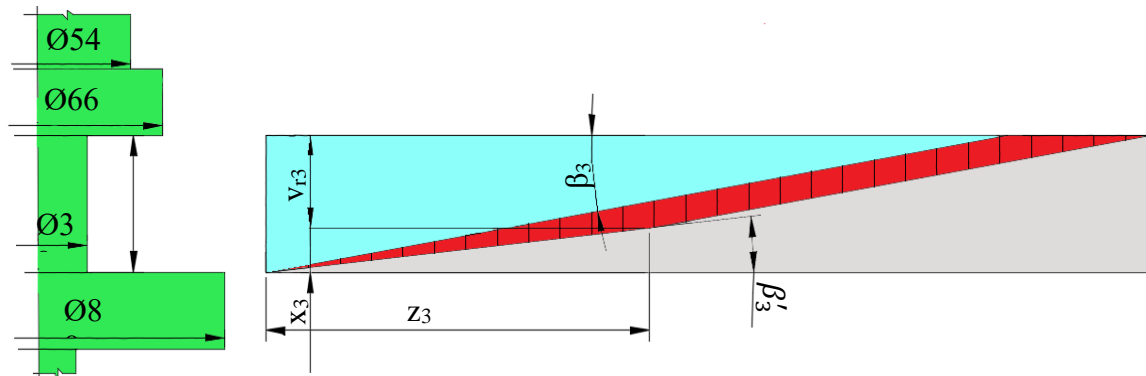
Určení celkové šířky kombinovaných ploch je nutné určit souřadnice bodu x , jenž se stanoví podle vztahu [36]:

$$x_3 = e_3 - v_{r3} = 42,3 - 36 = 6,3 \text{ mm} \quad (3.19)$$

Souřadnice v ose z se vypočte podle vztahu [38]:

$$z_3 = \frac{e_3}{\tan \beta_3} = \frac{42,3}{\tan 9^\circ} = 267,07 \text{ mm} \quad (3.20)$$

Pro lepší pochopení výše popsaných kroků a konstrukce plochy je zde umístěn obr. 62 (není v měřítku), na němž jsou zakótovány příslušné souřadnice bodu, od něhož se mění tvářecí úhel na kombinovaných redukčních plochách.



Obr. 61 Náčrt přechodové plochy.

V druhé operaci se dosáhne požadovaného tvaru díky redukcí z průměru $d_4 = 38$ mm na průměr $d_7 = 29$ mm. Řešení je následující:

- opět se nejdříve vypočte šířka základní redukční plochy b_{xm7} podle rovnice (2.56):

$$b_{xm7} = \frac{r_4 - r_7}{\tan \alpha_7} = \frac{19 - 14,5}{\tan 30^\circ} = 7,79 \text{ mm}$$

- vzdálenost pomocné redukční plochy na dřívku se vypočte pomocí rovnice (2.57)

$$\begin{aligned} x_{m7} &= \frac{1}{3 \cdot \tan \alpha_7} \cdot \left(\frac{r_4^3}{r_7^2} - 3 \cdot r_4 + 2 \cdot r_7 \right) + \frac{\pi}{2} \cdot \left(r_4 - \frac{r_7^2}{r_4} \right) \cdot \tan \beta_7 \\ &= \frac{1}{3 \cdot \tan 30^\circ} \cdot \left(\frac{19^3}{14,5^2} - 3 \cdot 19 + 2 \cdot 14,5 \right) + \frac{\pi}{2} \cdot \left(19 - \frac{14,5^2}{19} \right) \cdot \tan 7^\circ \\ &= 4,2 \text{ mm} \end{aligned}$$

- následuje rozhodnutí, zda se lze použít „jednoduché“ kombinované redukční plochy či nikoliv. Provádí se pomocí součtu parametrů b_{xm7} a x_{m7} , načež se porovnají se skutečnou délkou příslušného dřívku, viz rovnice (2.55):

$$e_7 \geq b_{xm7} + x_{m7}$$

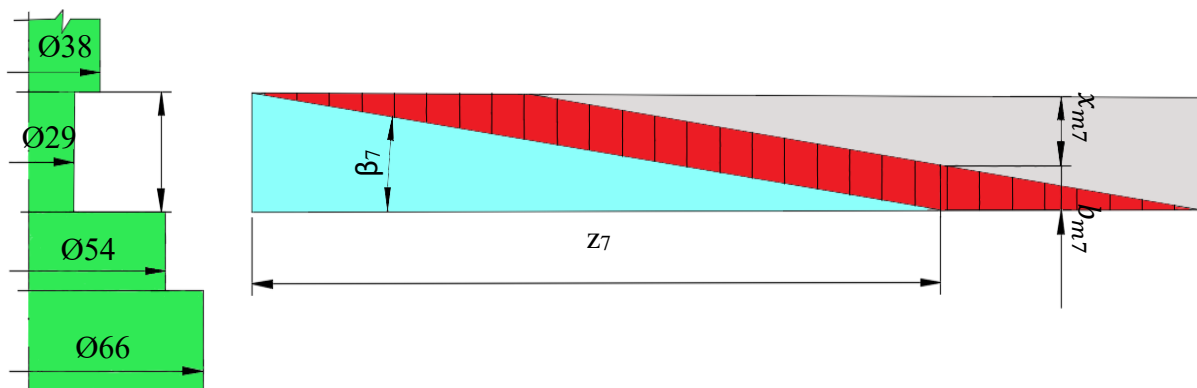
$$29 \geq 7,79 + 4,2 = 11,99$$

kde: e_7 – délka dřívku příslušného průměru [mm]; stanovena podle výkresu DP_209306_01 na velikost 29 mm.

- podmínka byla splněna, tudíž se jedná o jednoduché kombinované redukční plochy.
- při rozvinu nástroje do roviny se finální souřadnice v ose z ručí ze vztahu (2.58):

$$z_7 = \frac{x_{m7} + b_{xm7}}{\tan \beta_7} = \frac{4,2 + 7,79}{\tan 7^\circ} = 97,65 \text{ mm}$$

Vypočtené souřadnice jsou vyneseny na obr. 63.



Obr. 62 Náčrt redukční plochy.

Na druhou operaci plynule navazuje kalibrační část nástroje, která je složena z hladících a vyrovnávacích ploch. Do výpočtu délky hladící plochy stupuje parametr R_h , což je největší hlazený průměr dřívku. Samotná délka se určí ze vztahu (2.51):

$$l_h < 1,8 \cdot \pi \cdot R_h$$

$$l_h < 1,8 \cdot \pi \cdot 15$$

$$= 84,8 \text{ mm}$$

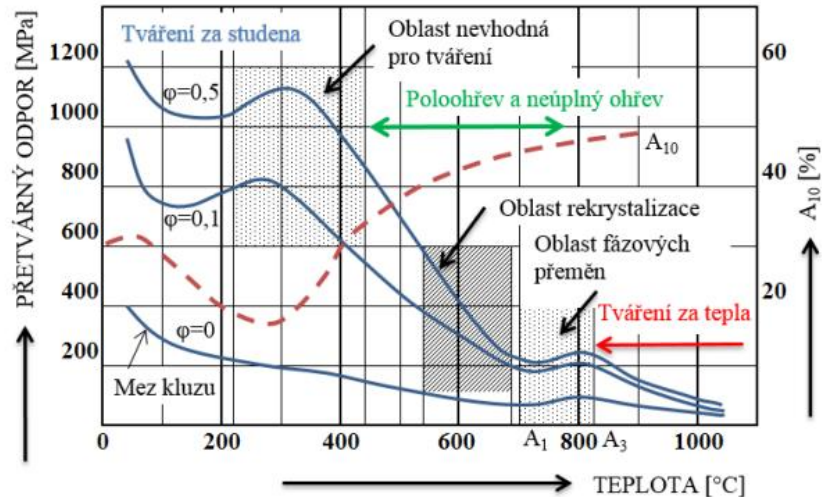
kde: 1,8 – reprezentuje součinitel velikosti plochy,

R_h – největší hlazený poloměr [mm]; jako největší poloměr byl zvolen poloměr r_6 o velikosti 15 mm, který bude válcován jako jeden z posledních.

Daný poloměr, respektive průměr, byl zvolen jednak že je válcován na závěr válcovacího procesu, jednak z důvodu stoprocentního zajištění kalibrace všech rozměrů, které se během druhé operace válcují.

3.2.3 Tvářecí síly

Síly jsou určující například pro ložiska, proto se níže nachází vzorový výpočet pro $d_9 = 45$ mm. Konkrétní průměr byl zvolen na podle maximální působící síly, podle které se dále počítá maximální výkon elektromotoru.



Obr. 63 Rozdělení tvářecích procesů podle teploty [81]

Při výpočtu dílčích sil a momentů bylo v rámci teoretické části práce počítáno s deformačním odporem. Z logiky věci je to však milný úsudek, jelikož materiál během tváření za tepla výrazně mění své mechanické vlastnosti – zvyšuje se tvařitelnost za současného snížení přetvárného odporu, viz obr. 64, [54; 80]. Proto se autor práce domnívá, že [38] uvažoval tváření za studena, viz definice deformačního odporu, zatímco při vzorovém výpočtu kroutícího momentu bylo počítáno pouze s přetvárným odporem za tepla, jenž nezahrnuje vnější vlivy (např. koeficient tření), ale vychází z rychlosti deformace. Síly byly určeny v následujícím pořadí:

- při rozkladu působících sil na vývalek je nejdůležitější silová složka v ose x, která se spočítá podle vztahu (2.24):

$$F_{x9} = S_{p9}^x \cdot \sigma_{dt} = 289,502 \cdot 126 = 36\,477,3 \text{ N}$$

kde: σ_{dt} – deformační odpor materiálu za tepla [MPa]; stanoven podle vztahu [*]:

$$\sigma_{dt} = \sigma_{pt} \cdot \psi = 63 \cdot 2 = 126 \text{ MPa}, \quad (3.21)$$

σ_{pt} – přetvárný odpor za tepla (pevnost za tepla) [MPa]; po konzultaci s panem Mangerou, jenž PKV nástroje konstruuje, zvolena 63 MPa, jedná se o nejčastěji využívanou hodnotu σ_{pt} ,

ψ – součinitel vlivu rychlosti deformace [-]; vychází z rychlosti deformace, autor [36] uvádí, že se pohybuje v rozmezí od 50 do 60 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$, proto byla zvolena hodnota 2.

- silová složka v ose y se vypočte jako součet dílčích ploch v příslušné ose vynásobené deformačním odporem, viz vztah (2.26):

$$F_{y9} = (S_{p9}^{y1} + S_{p9}^{y2}) \cdot \sigma_{dt} = (76,596 + 573,63) \cdot 126 = 81\,928,5 \text{ N}$$

- poslední se stanoví silová složka v ose z podle vztahu (2.27):

$$F_{z9} = S_{p9}^x \cdot \sigma_{dt} \cdot \tan \alpha_9 = 289,502 \cdot 126 \cdot \tan 25,5^\circ = 5\,581,81 \text{ N}$$

Výsledky výše uvedených sil korespondují s velikostí objemu materiálu, který musí být přetvořen. Výpočty jednotlivých složek sil pro dílčí průměry jsou uvedeny v tab. 7.

Tab. 5 Výsledky působících tvářecích sil v [N] na dílčí průměry.

	d ₁	d ₂	d ₉	d ₃	d ₃	d ₅	d ₆	d ₇	d ₈
F _x	14342,5	27111,1	36477,3	34029,7	32459,1	4738,63	3680,92	3928,66	10575,6
F _y	46774,1	70926,9	81928,5	82895,4	78622,4	16125,	10494,5	10681,5	24531,8
F _z	1837,31	3473,01	5581,81	4782,57	4158,09	750,525	451,960	426,789	1486,31

3.2.4 Kroutící moment

Maximální silové zatížení je určujícím prvkem při zvolení vhodného stroje. Volba vychází na základě stanovení kroutícího momentu. Nejprve byl stanoven kroutící moment čistých deformačních prací dle vztahu (2.29):

$$\begin{aligned}
 M_{kd} &= \sigma_{dt} \cdot \left[(S_{p9}^{y_1} + S_{p9}^{y_2}) \cdot \frac{a_{29}}{2} \cdot \frac{n_t}{n_v} + F_{x9} \cdot \tan \beta_9 \cdot \frac{R + r_9}{2} \cdot \frac{n_t}{n_v} \right] \\
 &= 126 \cdot \left[(76,596 + 573,63) \cdot \frac{20,068}{2} \cdot 14,03 + 36\,477,3 \cdot \tan 8,7^\circ \cdot \frac{40 + 22,5}{2} \cdot 14,03 \right] \cdot \frac{1}{1000} \\
 &= 320\,006 \text{ Nm}
 \end{aligned}$$

kde: $\frac{n_t}{n_v}$ – poměr otáček tvářence n_t ku otáčkám pracovních válců n_v [-]; aby se usnadnil výpočet, využila se substituce dle rovnice [36]:

$$\begin{aligned}
 \frac{n_t}{n_v} &= \frac{4 \cdot R_V}{3 \cdot R + r_9} & (3.22) \\
 &= \frac{4 \cdot 1000}{3 \cdot 40 + 22,5} = 14,03 [-]
 \end{aligned}$$

Dále se vypočte ztrátový moment, který kompenzuje ztráty třením mezi vývalkem a nástrojem. Stanoví se podle vztahu (2.30):

$$\begin{aligned}
 M_{kz} &= \sigma_{dt} \cdot f \cdot \left(S_{p9}^{y_1} + \frac{S_{p9}^{y_2}}{2 \cdot \cos \alpha_9} \right) \cdot (R - r_9) \cdot \frac{n_t}{n_v} \\
 &= 126 \cdot 0,35 \cdot \left(76,596 + \frac{573,63}{2 \cdot \cos 8,7^\circ} \right) \cdot (40 - 22,5) \cdot 14,03 \cdot \frac{1}{1000} = 4\,271,61 \text{ Nm}
 \end{aligned}$$

Celkový kroutící moment byl vypočten dle vztahu (2.28):

$$\begin{aligned}
 M_{kC} &= 4 \cdot (M_d + M_z) \\
 &= 4 \cdot (320\,006 + 4\,271,61) = 1\,297\,112 \text{ Nm}
 \end{aligned}$$

3.3 Zvolení stroje

Při výběru stroje je nutné vycházet z rozměrů a tvaru válcované součásti. Řešený hřídel má maximální průměr 80 mm a celkovou délku 322,7 mm. Tvarově patří mezi poměrně komplikované vývalky tudíž je nutné zaručit, aby nástroj měl dostatečnou masu materiálu. Z čehož vychází, že sevření mezi válci musí zajišťovat dostatek prostoru jak pro válcování, tak pro upnutí nástroje, který bude několikrát za svou životnost renovován.

Po zvážení všech kritérií byla vybrána rotační válcovačka od české firmy Šmeral a.s. se sídlem v Brně. Jedná se o typ ULS 100 RB, který splňuje požadavky na velikost sevření mezi válci v rozsahu 150 až 250 mm, při maximálním průměru 100 mm zpracovávaných polotovarů.

Pracovní válce mají bezvúlové kuželové uložení, díky kterým lze dosáhnout vysoké přesnosti, přičemž jsou upínány pomocí hydrauliky. Pláště jsou opatřeny T-drážkami pro upínání nástrojů. Spodní válec je pohyblivý, tudíž se dá přestatovat rozteč mezi válci, a nachází se na něm kapsa, sloužící k unášení vývalků z pracovního prostoru stroje. Přestavování se provádí pomocí šnekové převodovky. Pohon zajišťuje dvojice samostatných torkmotorů, což je varianta elektromotoru schopná vyvinout vysoké kroutící momenty. [81]

Samotný stroj se nachází na obr. 65, jedná se však o variantu ULS RA/A1. Hlavní rozdíl tkví v použitém upínání, kdy RB je hydraulické, kdežto RA je mechanické. V tab. 6 se nacházejí důležité technické údaje. [81]



Obr. 64 Válcovačka ULS 100 RA/A1 [81].

Tab. 6 Technická data k ULS 100 RB [81].

Ø zpracovávaných polotovarů	mm	40 - 100
Maximální délka polotovarů	mm	500
Počet otáček pracovních válců	min ⁻¹	5 – 10
Ø pracovních válců	mm	1000
Šířka válců	mm	100
Sevření mezi válci	mm	150 – 250
Přestavení spodního válce	mm	+/- 50
Maximální kroutící moment na 1 válec	kNm	100
Výkon hlavního elektromotoru	kW	240

3.4 Konstrukce nástroje

Základem nástroje, po určení velikosti ploch, je jeho výška. Vychází se z možností stroje, kdy se od maximálního sevření s odečte nejmenší průměr d_{\min} vývalku, a podělí 2 (jelikož se jedná o dvoudílný nástroj), viz následující výpočet [37]:

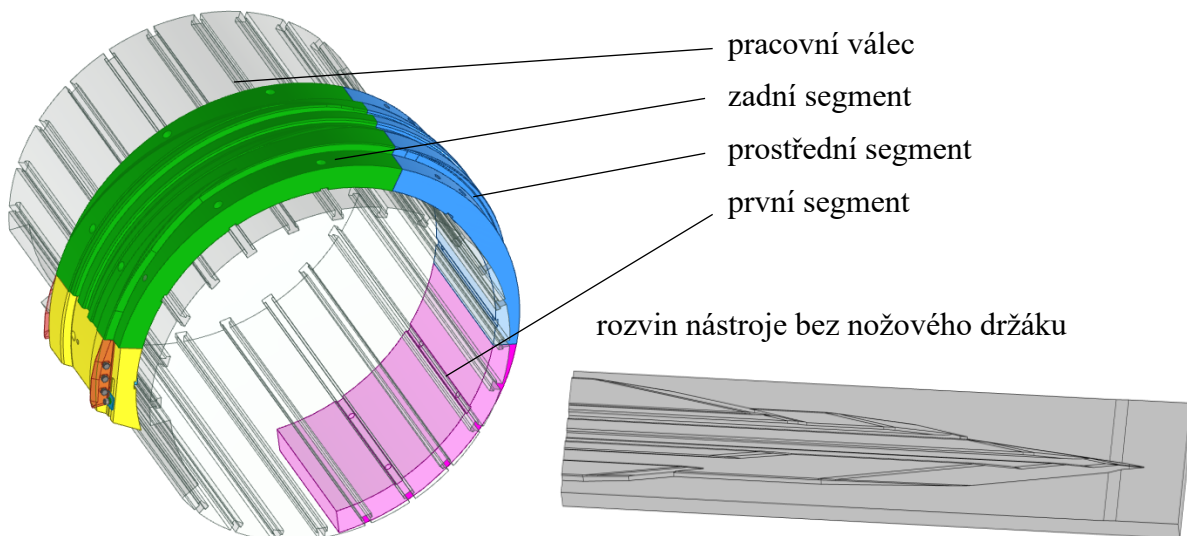
$$\begin{aligned}
 V_N &= \frac{(s_v - d_{\min})}{2} & (3.23) \\
 &= \frac{(250 - 80)}{2} = 85 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

kde: s_v – sevření mezi válci [mm], viz tab. 6,

d_{\min} – nejmenší průměr vývalku [mm], v tomto se jedná o průměr d_7 o velikosti 80 mm.

Plochy, které nejsou v kontaktu s tvářeným polotovarem, jsou sníženy o 2 mm. Jako referenční plocha se v tomto případě bere dno drážky pro průměr 80 mm. Celkovou délku nástroje lze spočítat sečtením všech přepon dílčích vnikacích úhlů. Výpočet slouží jako orientační, jelikož dochází k úpravám geometrie, hlavně kvůli simulaci. Velmi důležitá poznámka – nástroj je vždy kótován pomocí úhlů, včetně pohledu rozvinu. Maximální úhel nástroje je podle modelu sestavy pro spodní nástroj na $237,8^\circ$, jak ukazuje obr. 66. Celý nástroj je složen ze tří segmentů, které jsou vyrobené společně na CNC stroji z kovaných prstenců, jenž jsou předem rozděleny na požadované rozměry.

Na redukčních plochách se nachází drážkování, které zajišťuje rotaci vývalku po celý čas válcovacího procesu. Je vyrobeno stopkovou kulovou frézou S 533 od firmy DORMET PRAMET. Na výkresech jsou drážky značeny kvůli zjednodušení jako šrafování pod úhlem 90° . Důležité informace (hloubka 0,3 mm, šířka 2 mm, rozteč 4 mm) jsou uvedeny vždy nad razítkem a kopírují tvar plochy, na které jsou vyrobeny.



Obr. 65 Osazení válce nástrojem.

Teplo způsobuje tepelnou roztažnost materiálu, což vede k změně vnějších rozměrů. Proto se musí zvětšit parametry pracovní části nástroje tak, aby po zchlazení vývalku se rozměry shodovaly s výkresovou dokumentací. Díky stavitelnému sevření válců a velkému tolerančnímu poli na průměrech vývalku, lze tepelnou roztažnost zanedbat, avšak u délkových rozměrů toto neplatí a musí se provést korekce. Výpočet tepelné roztažnosti oceli byl proveden dle rovnice (3.24):

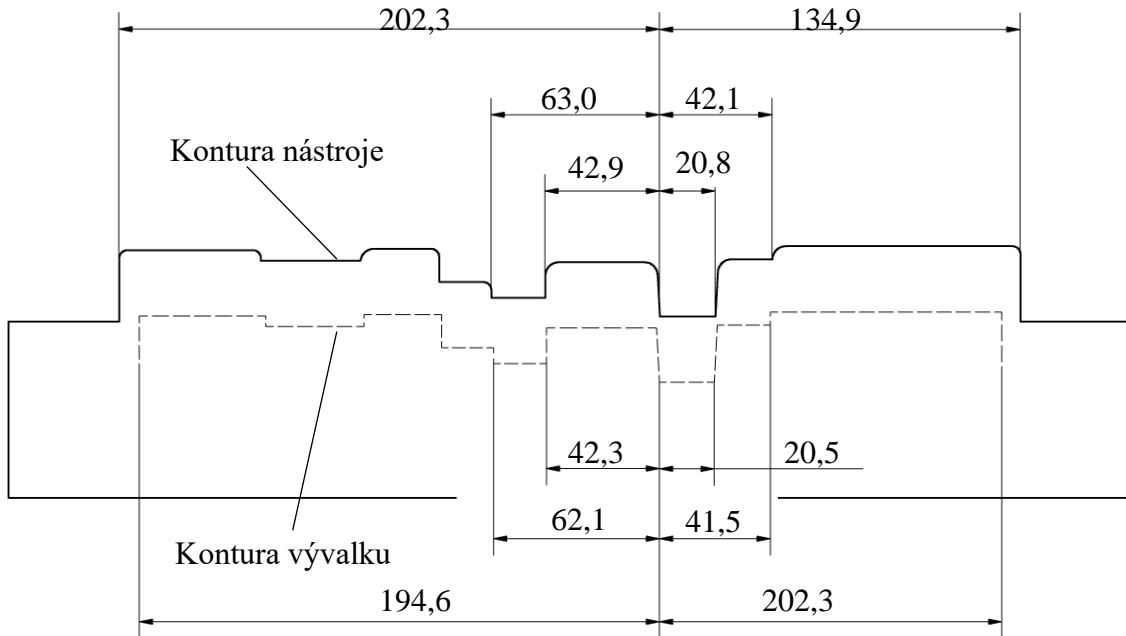
$$\Delta l_i = l_{i0} \cdot \alpha_t \cdot \Delta T \quad (3.24)$$

kde: l_{i0} – počáteční délka v [mm],
 α_T – součinitel teplotní roztažnosti v [K^{-1}], pro ocel 15 240 uvádí materiálový list, že $\alpha_T = 11,8 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ [83],
 ΔT – rozdíl teplot v [K]. Jako počáteční teplota byla zvolena teplota $20^\circ C$ (292,15 K). Konečná teplota, přepočtena na kelviny, byla zvolena dle kovací teploty, viz materiálový list oceli 15 240 [22].

Pro ilustraci byl zvolen průměr 80 mm o šířce 20,5 mm, na němž byl spočítán přírůstek Δl dle rovnice (3.24):

$$\begin{aligned} \Delta l_7 &= l_{70} \cdot \alpha_t \cdot \Delta T \\ &= 20,5 \cdot (11,8 \cdot 10^{-6}) \cdot 1160 = 0,2806 \text{ mm} \end{aligned}$$

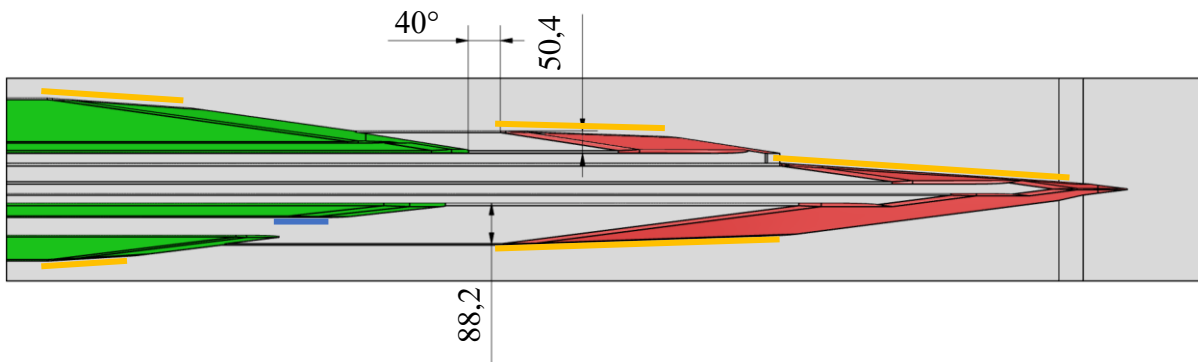
Výsledek byl zaokrouhlen na 0,3 mm, tzn. po doválcování bude délka dříku 20,8 mm. O shodnou velikost se musí zvětšit příslušná část nástroje, jak znázorňují příslušné kontury na obr. 67. Další délkové rozměry byly spočteny dle výše uvedené ukázky a nacházejí se v příloze 10. Délky 202,3 mm a 134,9 mm jsou navíc zvětšeny o 5 mm. Důvodem je požadavek na kolmá čela koncových dříků, na kterých jsou při konečné fázi válcování odděleny odpady a tím i požadovaný tvar čel vytvořen.



Obr. 66 Tepelná roztažnost nástroje.

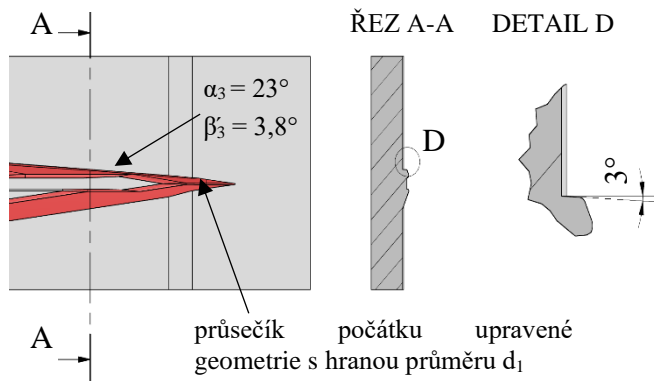
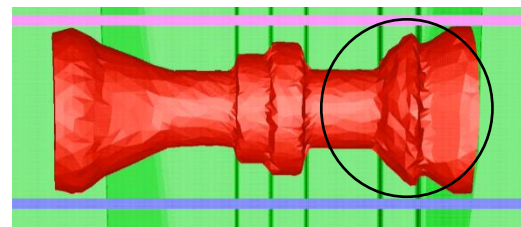
Vývalek bude vyroben na dvě operace, proto musí být mezi dílčími operacemi vytvořen přechod. Jeho velikost je 40° a jedná se o protažení posledního profilu válcovaného v první operaci, jak ukazuje obr. 68. Používá se kvůli první kalibraci vývalku a lepšího navedení na druhou operaci tak, aby nedošlo k vychýlení vývalku z osy válcování. Na obr. 67 jsou zároveň zakótovány dříky pro průměry d_4 a d_9 .

Na činných plochách nástroje se nacházejí upravené vnikací úhly β' (na obr. 68 zvýrazněné oranžovou barvou), hodnoty jsou vždy poloviční oproti původním úhlům β . Jsou umístěny vždy na geometrii, na které jsou přímo napojeny odpady určené k oddělení od vývalku. Jedná se tudíž o poslední válcované průměry, tj. d_4 a d_9 pro první operaci a d_6 a d_8 . Úpravy se provádí zejména kvůli zamezení styku odpadů s funkčními částmi nástroje, protože by jinak vznikaly přeložky. Pokud by se během simulace nebo válcovacích zkoušek vyskytly neshodné kusy, lze upravit i geometrii označenou modrou barvou na obr. 67.



Obr. 67 Geometrie spodního nástroje.

Na d_3 se také nachází úprava, a to z důvodu nutnosti vyválnování kolmého čela, jenž se nachází v přechodu d_3 na D , navíc se mění velikost tvářecího úhlu α_3 z 23° na 87° . hodnota vnikacího úhlu β_3 je $3,80^\circ$ a protažena do průsečíku s hranou označující koncovou šířku průměru d_1 , jak je znázorněno na obr. 69. Pokud se neprovede výše zmíněná úprava, projeví se vnější vada (obr. 70), nejčastěji jako nedoválnovaná hrana. Vzniká kvůli nedostatečnému navedení materiálu přechodovými plochami.


 Obr. 69 Úprava d_3 .


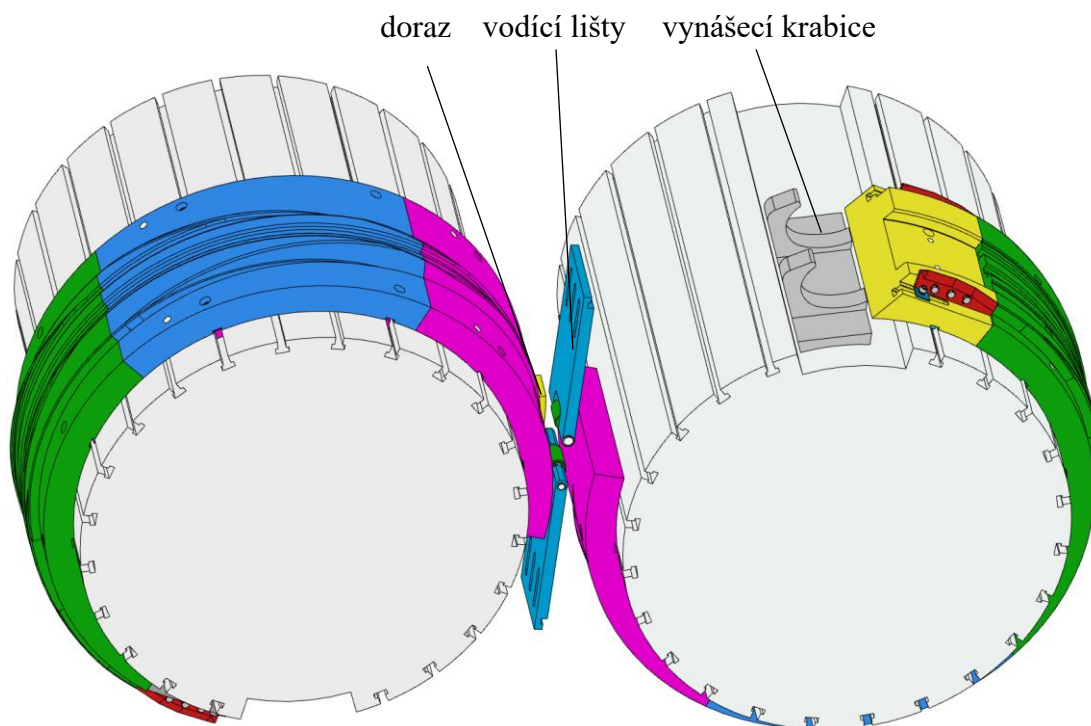
Obr. 68 Nedoválnovaná hrana.

Na prvním segmentu (po směru válcování) horního nástroje je umístěn stavitelný doraz. Vzdálenost se vždy nastavuje k bodu vniku do polotovaru. K ustavení slouží vodící T-drážky (norma ČSN 02 1030) o velikosti 14, jež jsou vyfrézovány v masě nástroje. Doraz se nachází na nakládací ploše, která je zvýšená oproti zbylým segmentům o 2 mm tak, aby byla ve shodné výšce jako drážka pro $D = 80$ mm. Umisťuje se standartně na horní nástroj kvůli snadnějšímu vypadnutí vývalku z pracovního prostoru válčovačky. Vývalek během válčovacího procesu se pohybuje volně, pouze je podpíráný podél své axiální osy takzvanými vodícími lištami, opatřenými rolnou. Stykové plochy jsou mezi rolnou a největším průměrem tvářence, tj. na $D = 80$ mm. V tomto případě jsou rolny umístěny symetricky a pouze v nejbližším okolí podpíraného průměru. Lišty se šroubují k otočným ramenům, jež jsou součástí stroje. Obr. 70 znázorňuje celkovou sestavu PKV nástroje umístěnou na pracovních válcích, která se rozčleněna na:

- Číslo výkresu DP-209306-S00 – jedná se o kompletní sestavu segmentů a nožových držáků osazených na horním a spodním pracovním válci. Nachází se zde zároveň i obě vodící lišty, bez otočných ramen, na kterých jsou uloženy.
- Č. v. DP-209306-S01 – sestava spodního válce, osazeného příslušným nožovým držákem DP-209306-S03, segmenty DP-209306-Z01 až DP-209306-Z03. Vše je přimontované pomocí šroubů, včetně matic do T-drážek a vodících kamenů.
- Č. v. DP-209306-S02 – sestava horního válce rovněž osazeného nožovým držákem DP-209306-S04, dvěma segmenty, které jsou shodné se sestavou DP-209306-S01. Poslední segment (ve směru válcování) je změněn kvůli stavitelnému dorazu, který se se nachází z důvodu lepšího přenášení rotace na vývalek.
- Č. v. DP-209306-S03 – sestava spodního nožového držáku, který má upravenou geometrii (zkosené zadní čelo při přechodu do vybrání na válci) pro lepší vývod vývalku z pracovní části nástroje. Je osazený dvěma dělicími noži (DP-209306-X01 a DP-209306-X02) po stranách. Zároveň se uprostřed nachází vybrání.
- Č. v. DP-209306-S04 – jsou to vodící lišty, které napomáhají k ustavení vývalku a zajišťují jeho polohu během válčovacího procesu. Lišty jsou totožné a uloženy symetricky. Rolna podpírá průměr 80 mm, uložena na čepu, který je zalisován do tělesa vodící lišty.

- Č. v. DP-209306-S05 – jedná se o horní nožový držák, společně s dělicími noži. Geometrie je zde jednoduchá, tzn. kolmé čelo v rovině s čelem vybrání na válci. Upínání je shodné jako na DP-209306-S03.

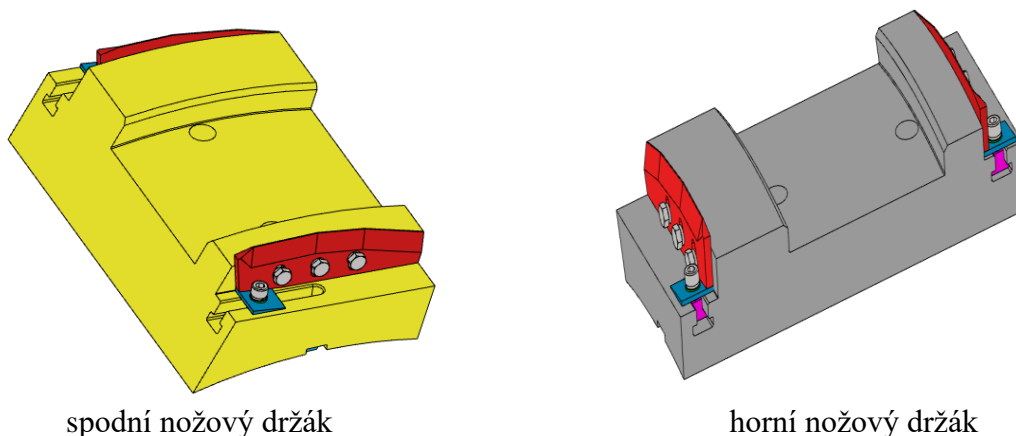
Všechny segmenty jsou vyrobeny z oceli 19 642, která se doporučuje pro nástroje pro tváření za tepla, zejména pro nástroje se složitými tvary. Bohužel materiálová norma byla v roce 2002 zrušena, proto byl použit ekvivalent podle DIN 35NiCrMo16. Jedná se o nikel-chrom-molybdenovou ocel s velkou prokalitelností, která odolává trhlinám, vzniklých po čas tepelné únavy. Segmenty budou kaleny a popuštěny na tvrdost 56 HRC. [83; 84]



Obr. 70 Celková sestava pracovních osazených nástrojů a vodícími lištami

3.4.1 Konstrukce nožů a držáků

Na konci válcovacího procesu dochází k oddělení přebytečného materiálu, odpadu, pomocí dělicích nožů, které jsou přišroubovány na nožovém držáku. Plynule navazují na předcházející segmenty, jejich středová část tam, kde je střed vývalku, je značně odlehčená, aby zůstala zachována ovalita vývalku, dána kalibrační částí nástroje. Podepření se nachází pouze na



Obr. 71 Nožové držáky

krajních průměrech, a sice d_6 a d_8 . vzdálenost mezi vnějšími stěnami tohoto podepření je shodná jako délka vývalku, zvětšená o tepelnou roztažnost. Na obr. 72 jsou umístěny oba nožové držáky. Žlutý patří ke spodnímu nástroji, jeho zkosená část pomáhá k lepšímu navedení vývalku do vynášecí krabice. Šedý nožový držák náleží k hornímu nástroji a je zarovnaný přesně na stěnu vybrání.

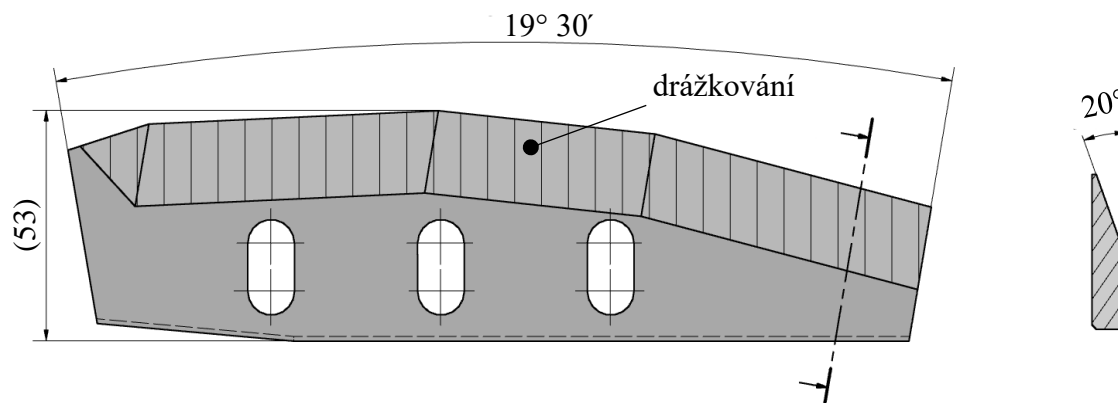
Držáky budou vyrobeny z oceli W300 ISOBLOC (elektrostruskové přetavování) od výrobce BÖHLER. Použití nachází hlavně u nástrojů, které zpracovávají slitiny lehkých kovů a zápustkové vložky. Materiál vykazuje vysokou houževnatost a tažnost, spolu s dobrou tvrdostí za tepla. Držáky nebudou nijak tepelně zpracovány, jelikož na nich neprobíhá primární proces tváření. Materiálový list s příslušnými hodnotami obsahuje příloha 11. [85]

Jak již bylo zmíněno, k dělení slouží dělicí nože, u nichž je základním parametrem délka stoupání vrcholové křivky, jinými slovy jejich úhel. Níže se nachází vzorový výpočet pro dělicí nůž DP-209306-X01, velikost úhlu se vypočte podle vztahu (2.60):

$$\begin{aligned} \gamma_{d30} &= \frac{5 \cdot \arccos\left(\frac{R_{SM} - v_n}{R_{SM}}\right)}{3,5} = \gamma = \frac{5 \cdot \arccos\left(\frac{R_{SM} - (1,15 \cdot R_d)}{R_{SM}}\right)}{3,5} = \\ &= \frac{5 \cdot \arccos\left(\frac{610 - (1,15 \cdot 15)}{610}\right)}{3,5} = 19^\circ 30' \end{aligned}$$

Velikost dělicího nože je $19^\circ 30'$. Vstupní hodnoty pro dělicí nůž DP-209306-X02, který dělí průměr 27, jsou $R_{SM} = 608,5$ mm, $v_n = 15,525$. Celková délka pak činí $18^\circ 30'$.

Obr. 72 ukazuje model nože DP-209306-X01. Byla použita jednodušší varianta, která není konstruována podle Archimedovy spirály, která zde slouží jako vrcholová křivka, nýbrž se využilo pouze několika bodů, po jejich spojení se vytvořila požadovaná geometrie nože. Jedná se o levný a časově úsporný design, který se v praxi hojně využívá. Nůž je opatřen zkosením mezi spodní dosedací plochou a čelem. Slouží k přesnějšímu zajištění polohy nože pomocí stavěcího klínu, jenž má úhel 5° . Upínání nožů je řešeno trojicí šroubů s nízkou šestihrannou hlavou (norma ISO 4017). Spojení je dostatečně pevné, ale zároveň lze rychle a snadno demontovat a nahradit. Klín zamezuje pohybu v radiálním směru, taktéž i dosedací plocha nože. Na zkosených stranách (úhel $\kappa = 20^\circ$) se opět nachází drážkování, hodnoty jsou shodné s drážkováním na nástroji.

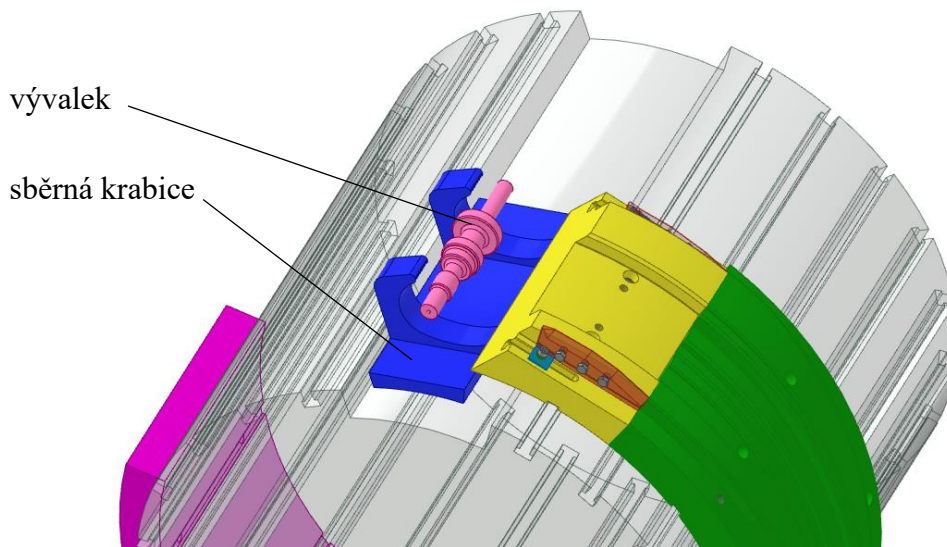


Obr. 72 Dělicí nůž DP-209306-X01

Nože budou vyrobeny z oceli W403 WMR (vakuově přetavená) od výrobce BÖHLER. Vyznačuje se vysokou odolností proti opotřebení za tepla, zároveň vykazuje vysokou tvrdost. Je vhodná pro operace, kde dochází k cyklickému teplotnímu namáhání, jelikož dobře odolává vůči trhlinám vzniklých díky tomuto typu namáhání. Ocel má obsah uhlíku kolem 0,38 %, tzn.

patří mezi středně uhlíkové oceli. Materiálový list s příslušnými parametry se nachází v příloze 12. Nože budou kaleny a popuštěny na horní hranici tvrdosti, tj. 55 HRC. [86]

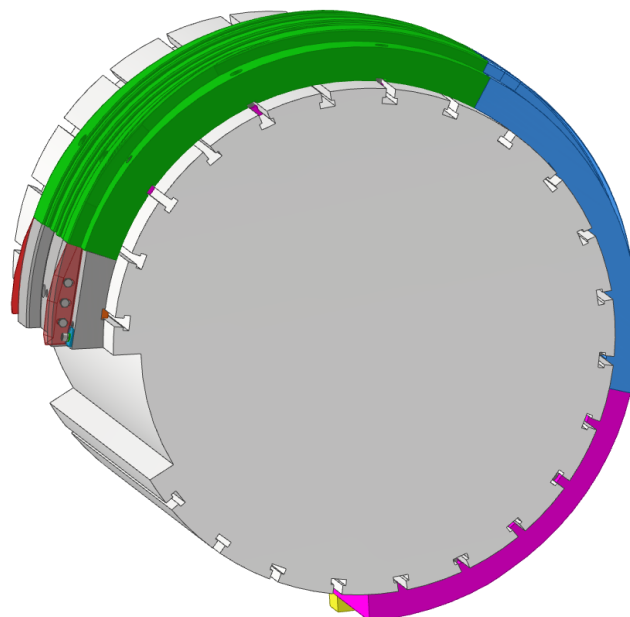
Poslední věcí, která je součástí celého procesu válcování je takzvaná sběrná krabice na vývalky, viz obr. 74. Slouží odstranění vývalku z pracovního prostoru stroje. Díky otáčení válců je vývalek zachycen v krabici a po vykonání požadované otáčky z ní vypadne na dopravník. Konstrukce je různorodá a odvíjí se od tvaru a velikosti vývalku. Mohou tedy být i univerzální. Výkres krabice není v práci zahrnut, jelikož se nejedná o stěžejní část při návrhu nástroje pro PKV.



Obr. 73 Vynášecí krabice

3.4.2 Upínání nástroje

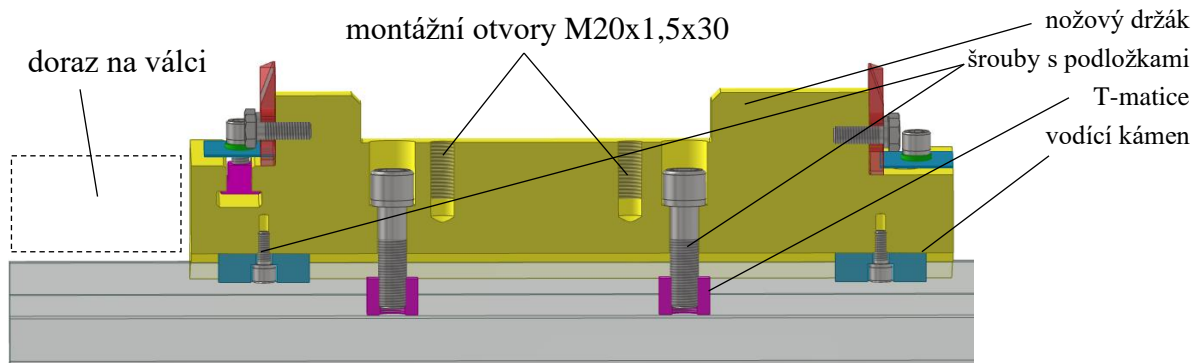
Montáž všech částí nástroje se provádí od posledního segmentu, tj. od nožového držáku, po první segment. Důvodem je jasné zarovnání s vybráním na válci. Zbylé části se postupně přikládají jedna za druhou, jak ukazuje obr. 75 (od šedého nožového držáku po purpurový segment), a přitlačují se vždy k předchozímu segmentu. Na spodní straně obou nožových držáků je vyfrézovaná drážka o velikosti 22 H8, do které se upíná vždy dvojice vodících



Obr. 74 Horní nástroj

kamenů, jenž přesně vymezují polohu v obrobených T-drážkách (norma ČSN 02 1030) na pracovním válci. Vodící kámen (výkres DP-209306-X04) se skládá ze dvou částí, z nichž jedna je široká a zapadá právě do drážky na nástroji (v toleranci j7), druhá menší část se zakládá do válce. Upevňuje se pomocí dvojice šroubů s vnitřním šestihranem M8x20 (norma ČSN 02 1143), zajištěné pružnou podložkou (norma ČSN 02 1740). Zbylé segmenty jsou pouze přišroubovány šrouby k válci pomocí šroubu s vnitřním šestihranem a T-matice.

Jak nožové držáky, tak dílčí segmenty jsou upevněny na válci pomocí šroubů s vnitřním šestihranem M16x70 (norma ČSN 02 1143), které dotahují matice vložené v obrobených upínacích T- drážkách (norma ČSN 02 1529), v kombinaci opět s pružnou podložkou (norma ČSN 02 1740), jak je znázorněno na Obr. 75.

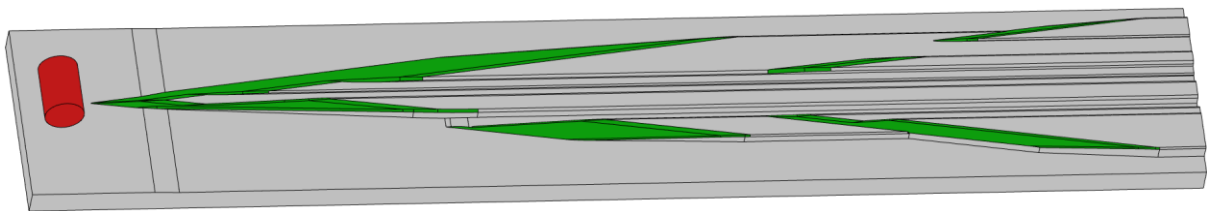


Obr. 75 Upínání

K samotné manipulaci s nástrojovými částmi se používají montážní otvory, umístěné na pohledových stranách. Každý segment je opatřen dvěma otvory o velikosti M20x1,5 o hloubce závitu 30 mm. Umístění otvorů je důležité kvůli snadné manipulaci s nástrojovým dílem jak při upínání, tak při výměně.

3.4.3 Simulace

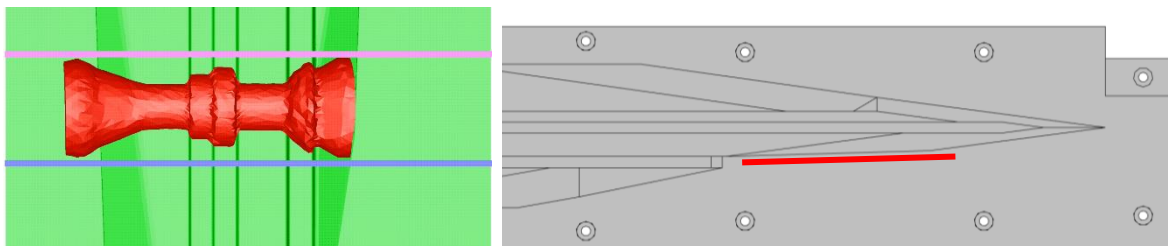
V moderní výrobě se k verifikaci konstrukce využívá mnoho druhů simulací. Jedna z nich je založena na principu metody konečných prvků. Na řešený díl je aplikována síť, která je složena z prvků (nejčastější tvar trojúhelníku), který má konečnou velikost. V každém krajním bodě prvku, nazývaným též uzel, jsou sestaveny soustavy lineárních rovnic, které se pomocí výpočetních systémů dále řeší. [87]



Obr. 76 Model určený k simulaci.

Ověření konstrukce PKV nástroje bylo uskutečněno pomocí softwaru FORGE 3, verze 6.1. c. Jedná se o software, jenž využívá metodu konečných prvků. Celý proces probíhal za konstantní teploty 1200 °C, která se vztahuje na polotovár. Mesh (velikost sítě) byl nastaven na velikost 10, protože byl použit velký polotovar (Ø80x118,5 mm) a dráha nástroje dosahovala délky více než 2 000 mm. Kvůli délce nástroje byl použit větší výpočetový krok 80 mm. Rychlost deformace byla nastavena na 465 mm·s⁻¹, což odpovídá 8,9 ot·min⁻¹ pracovního válce. Nástroj, v deskovém tvaru kvůli jednodušší simulaci (výsledky nejsou nijak ovlivněny), byl uvažován jako ideálně tuhý, tzn. nedeformoval se, k přetvoření došlo pouze u vývalku. Aby se zachovala rotace vývalku, bylo zapotřebí nastavit na šikmých redukčních plochách vyšší hodnotu

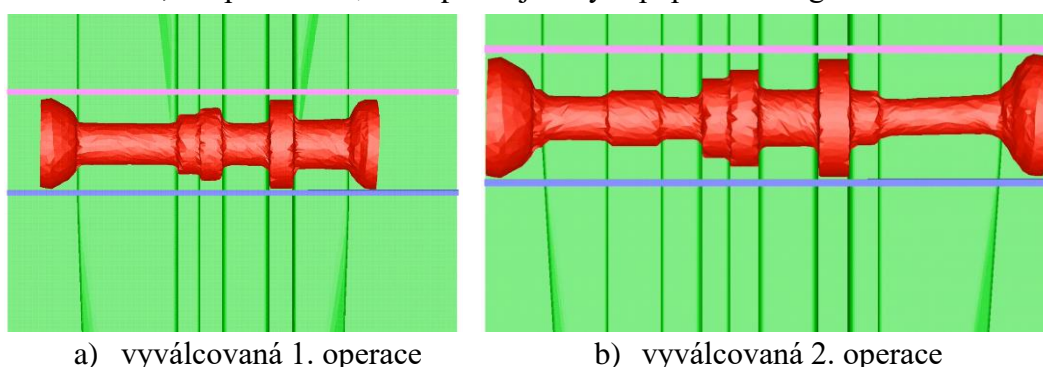
součinitele tření, která byla 0,6, na zbylých částech nástroje je hodnota nižší, tj. 0,2. Obecně se PKV nástroje simulují bez drážkování, a to z důvodu urychlení výpočtových časů. Obr. 76 znázorňuje simulovaný nástroj se založeným polotovarem ve výchozí poloze. Horní část nástroje je totožná jako spodní. Simulace neobsahuje dělicí operaci na konci válcovacího procesu.



Obr. 77 Chybná geometrie.

Celkem proběhly dvě ověřovací simulace. V první simulaci se vada objevila na začátku v zanořovací fázi. Byla použita nesprávná geometrie, která se nedostatečně zanořovala do polotovaru. Naopak materiál byl spíše natahován na druhou stranu nástroje, a proto se nepodařilo vytvarovat kolmé čelo na průměru 80 mm. Popsanou chybu znázorňuje obr. 77, označení červenou barvou. Další chybou bylo špatné ustavení polotovaru, který nebyl správně vycentrován, proto byla větší masa materiálu tažena na levou stranu (při pohledu zepředu). Při druhé simulaci byly použity nástroje s upravenou geometrií a lépe ustavený polotovar. Po přepočítání nebyly nalezeny žádné chyby jak ve formě nedoválcovaných částí, tak se ani neobjevily žádné povrchové vady. Proto byla simulace (obr. 78) prohlášena za úspěšnou a nástroj zhodnocen jako vyhovující.

Maximální tangenciální síla (ve směru válcování) je 86,3 kN, což odpovídá počátku válcování průměru 45 mm při délce 46 mm (po ohřátí) v první operaci, jelikož zde redukce dosahuje 68,35 %. Průběh tangenciální síly popisuje graf v příloze 12, orientace síly je proti směru pohybu nástroje. Z nuly dochází k plynulému nárůstu tvářecí síly, jak nástroj postupně vniká do materiálu, a zastavuje se po doválcování průměru 39 mm. Následuje pokles síly, protože se válcují průměry, jenž na sebe plynule navazují. Druhý peak odpovídá průměru 45 mm, z již popsaných důvodů. Další pokles síly odpovídá kalibrační části mezi první a druhou operací. Zbytek grafu popisuje druhou operaci, ve které nejsou dosahovány redukce větší než 64 % (průměr 27 mm, o délce dířku 86,6 mm). Konečný pokles reprezentuje kalibrační část nástroje, která má velikost zhruba $8^{\circ} 30'$. Maximální radiální síla (kolmo na nástroj) dosahuje velikosti 201,1 kN. Průběh, viz příloha 12, koresponduje s výše popsanou tangenciální silou.



Obr. 78 Výsledek druhé simulace.

V rámci simulace byl použita ocel 32CrMoV12-10 (ekvivalent oceli 15 230), který je obsažen v databázi softwaru. K popsání materiálového modelu byly použity Hensel-Spittelovy rovnice, které lépe vystihují chování tvářeného materiálu. Počítá se v nich, jak s teplotou tvářecího děje, tak jeho rychlostí, poměrnou deformaci a samozřejmě napětí. V příloze 13 se nachází materiálový model, který byl použit při simulaci. Příloha 14 obsahuje napětí a deformace. [88]

4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZPRACOVÁNÍ

Je nutné vyhotovit ekonomickou rozvahu nad rentabilitou. Kvůli snížení nákladů je uvažováno, že jednotlivé polotovary budou děleny tyčí metodou lámání, která zajišťuje minimální odpad. Bude použita standartní délka tyče, tzn. že $L_T = 6000$ mm. Pro zjednodušení se dá předpokládat, že firma disponuje veškerým potřebným zařízením, kromě tavicí pece. Nejprve je nutné stanovit cenu polotovaru a celkovou cenu nákladů spojených s koupí materiálu, viz následující postup:

- určení hmotnosti jednoho polotovaru:

$$m_p = V_p \cdot \rho \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} \text{kde: } \rho & - \text{ hustota oceli } [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}], \rho = 7\,850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}, \\ & = 595\,368,796 \cdot 10^{-9} \cdot 7850 = 4,68 \text{ kg}. \end{aligned}$$

- počet kusů z jedné tyče:

$$P_p = \frac{L_T}{L_p} = \frac{6000}{118,5} = 50,63 \text{ ks}. \quad (4.2)$$

Z jedné tyče lze vyrobit celkem 50 použitelných polotovarů.

- celkový počet potřebných tyčí:

$$P_T = \frac{n_s}{P_p} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} \text{kde: } n_s & - \text{ velikost série [ks], zvolena } 200\,000 \text{ ks}, \\ & = \frac{200\,000}{50} = 4\,000 \text{ ks}. \end{aligned}$$

- celková hmotnost polotovarů tyčoviny:

$$m_{CPT} = P_T \cdot \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L_T \cdot 10^{-9} \right) \cdot \rho \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} \text{kde: } d & - \text{ průměr polotovaru a zároveň největší průměr polotovaru hřídele} \\ & \text{ [mm], kde } D = 80 \text{ mm}, \\ & = 4000 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 80^2}{4} \cdot 6000 \cdot 10^{-9} \right) \cdot 7850 = 947\,002 \text{ kg}. \end{aligned}$$

- celková hmotnost odpadu:

$$m_{odpadu} = P_T \cdot \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L_{odpadu} \cdot 10^{-9} \right) \cdot \rho \quad (4.5)$$

kde: L_{odpadu} – délka odpadu z tyče v [mm], po nadělení všech polotovarů k válcování, vypočtený dle rovnice:

$$L_{odpadu} = L_T - L_p \cdot P_p \quad (4.6)$$

$$= 6000 - 118,5 \cdot 50 = 75 \text{ mm},$$

$$= 4000 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 80^2}{4} \cdot 75 \cdot 10^{-9} \right) \cdot 7850 = 11\,837,5 \text{ kg}.$$

- celkové náklady na tyčové polotovary:

$$N_{CT} = m_{CPT} \cdot C_{oceli} - m_{odpadu} \cdot C_{odpadu} \quad (4.7)$$

kde: C_{oceli} – cena oceli [$\text{Kč}\cdot\text{kg}^{-1}$], jež je 62,81 Kč/kg k dubnu 2024 [89],
 C_{odpadu} – výkupní cena ocelového šrotu [$\text{Kč}\cdot\text{kg}^{-1}$], jež činí 4,20 Kč k dubnu 2024 [90],

$$N_{CT} = 947\,002 \cdot 62,81 - 11\,837,5 \cdot 4,20 = 59\,431\,458,5 \text{ Kč.}$$

- cena polotovaru převodové hřídele:

$$C_p = C_{oceli} \cdot m_p - (V_o \cdot \rho) \cdot C_{odpadu} \quad (4.8)$$

$$= 62,81 \cdot 4,68 - (80\,424,77 \cdot 10^{-9} \cdot 7850) \cdot 4,20 = 291,3 \text{ Kč.}$$

Náklady na nákup tyčového materiálu v množství 4 000 kusů vycházejí na 59 431 459 Kč, a to po odečtení vrácených finančních prostředků z prodeje odpadu. Cena jednoho polotovaru je 292 Kč za kus.

Následuje odhad nákladů k výrobě jednoho vývalku. Předpokládá se, že celkový výrobní takt stroje se bude pohybovat okolo 8 vývalků za minutu, tzn. pracovní válce provedou 8 otáček za minutu. Čas, potřebný k vyrobení požadované série, se vypočte následovně:

- celkový počet vývalků vyrobených během jednoho dne v třisměnném provozu (cyklu):

$$N_{vývalků} = N_{otáček} \cdot t_{prac} \cdot 60 \quad (4.9)$$

kde: $N_{otáček}$ – počet otáček pracovních válců [min^{-1}], zvoleno 8 min^{-1} ,

t_{prac} – doba práce stroje [hod], vzhledem k třisměnnému provozu se předpokládá čistá práce stroje zhruba 80 % z celé směny (cyklu), což činí 19 hodin,

$$= 8 \cdot 19 \cdot 60 = 9\,120 \text{ kusů.}$$

- celkový počet cyklů potřebných k dokončení celé série:

$$N_{CC} = \frac{n_s}{N_{vývalků}} = \frac{200\,000}{9\,120} = 21,9 \text{ směn.} \quad (4.10)$$

Série by měla být při třisměnném provozu dokončena během 22 směn (cyklů), při produkci 9 120 vývalků během jednoho cyklu.

Válcovací trať se skládá z vibračního dopravníku ROBOTERM VZ 1800, z indukčního ohříváče přířezů ROBOTERM KSO 500 a válcovačky ULS 100 RB [82; 91]. Další přídatná zařízení, určená k chlazení nástrojů, nejsou uvažována. Je zaveden předpoklad, že všechny stroje, které jsou součástí válcovací tratě, jsou již po odpisu. Vývalky, volně uložené v bedně, chladnou na vzduchu. Celková cena vývalku se skládá z těchto nákladů:

- náklady na elektrickou energii:

$$N_{el} = N_{CC} \cdot t_{prac} \cdot P_{el} \cdot C_{el} \quad (4.11)$$

kde: P_{el} – celkový příkon všech elektrických zařízení [kW], jehož součet je 784,4 kW,

C_{el} – cena elektřiny [$\text{Kč}\cdot\text{kWh}^{-1}$], dle [92] je cena elektřiny 1,883 Kč/kWh podle sazby C03d,

$$= 25 \cdot 19 \cdot 784,4 \cdot 1,883 = 701\,586,97 \text{ Kč.}$$

- náklady na mzdy zaměstnance:

$$N_{zam} = N_{CC} \cdot 3 \cdot 7,5 \cdot \frac{C_{hod}}{2} \cdot N_{pojištění} \quad (4.12)$$

kde: C_{hod} – hodinová mzda zaměstnance [$\text{Kč} \cdot \text{hod}^{-1}$], jež činí $250 \text{ Kč} \cdot \text{hod}^{-1}$.
 Předpokládá se, že zaměstnanec se stará o další výrobní linky, proto se vyplácí pouze polovina hodinové mzdy,

$N_{\text{pojištění}}$ – náklady na pojištění zaměstnance [%], které hradí zaměstnavatel, činí 34 %,

$$= 22 \cdot 7,5 \cdot \frac{250}{2} \cdot 1,34 = 27\,637,5 \text{ Kč.}$$

- amortizace používaného nástroje:

$$N_{\text{amort}} = N_{\text{CC}} \cdot t_{\text{prac}} \cdot A_{\text{amor}} \quad (4.13)$$

kde: A_{amor} – cena amortizace nástroje [$\text{Kč} \cdot \text{h}^{-1}$], jelikož lze nástroj renovovat, stanovila se amortizace na $300 \text{ Kč} \cdot \text{h}^{-1}$,

$$= 22 \cdot 19 \cdot 300 = 125\,400 \text{ Kč.}$$

- celkové náklady na jeden vývalek:

$$N_{\text{celk}} = \frac{N_{\text{CT}} + C_{\text{nástroj}} + N_{\text{el}} + N_{\text{zam}} + N_{\text{amort}}}{n_s} \quad (4.14)$$

kde: $C_{\text{nástroj}}$ – cena nástroje [Kč]. Jedná se o celkem složitý nástroj, proto byla cena odborně odhadnuta na $3\,320\,000 \text{ Kč}$. V částce je obsažen jeho návrh (výkresová dokumentace, výpočty, simulace apod.), výrobní náklady (výroba na CNC, TZP, odlaďování přímo na stroji apod.) a celkem pět renovací, při předpokládané výdrži zhruba $50\,000$ vývalků.

$$= \frac{59\,431\,458,5 + 3\,320\,000 + 701\,586,97 + 27\,637 + 125\,400}{200\,000}$$

$$= 319,93 \text{ Kč.}$$

Náklady na jeden vývalek jsou po zaokrouhlení 320 Kč . Výsledná cena jednoho vývalku byla navýšena o 15 % kvůli ziskovosti, tj. $C_v = 368 \text{ Kč}$.

Nyní je důležité určit, kdy se vložené finance do konstrukce a výroby nástroje vrátí. K tomu je zapotřebí určit následující složky:

- fixní náklady, navýšené o 20 % kvůli cenám za nástroje a přípravky uvažované u pomocných technologií apod., jsou:

$$N_{\text{fix}} = C_{\text{nástroj}} \cdot 1,2 = 3\,700\,000 \cdot 1,2 = 3\,984\,000 \text{ Kč.} \quad (4.15)$$

- variabilní náklady, navýšené o 15 % (zahrnují např. cenu dopravy, manipulaci a provoz zbylých pomocných technologií, kancelářskou činnost v rámci firmy apod.), činí:

$$N_{\text{var}} = \frac{N_{\text{CT}} + N_{\text{el}} + N_{\text{zam}} + N_{\text{amort}}}{n_s} \cdot 1,15 \quad (4.16)$$

$$= \frac{59\,431\,458,5 + 701\,586,97 + 27\,637 + 125\,400}{200\,000} \cdot 1,15 = 346,64 \text{ Kč}$$

- bod zvratu

$$B_{\text{zvrat}} = \frac{N_{\text{fix}}}{C_v - N_{\text{var}}} = \frac{3\,984\,000}{368 - 346,64} = 186\,517 \text{ kus.} \quad (4.17)$$

Při ceně 368 Kč za vývalek byl stanoven bod zvratu při dosažení prodeje $186\,517$ kusu, o variabilních nákladech $3\,984\,000 \text{ Kč}$. Při produkci $200\,000$ vývalků se očekává, že celkové tržby dosáhnou hodnoty až $73\,600\,000 \text{ Kč}$.

ZÁVĚR

Práce se zabývala návrhem výroby převodového hřídele, respektive jeho polotovaru, metodou objemového tváření za tepla. Výrobní série čítala 200 000 ks/rok, proto byla vybrána technologie příčného klínového válcování, která kombinuje výhody kování a válcování. Součást se pouze válcuje, další zpracování zde není uvažováno.

Nejprve se zhodnotila technologičnost součásti pomocí výpočtu redukce. Horní hranice byla při počátečním návrhu překročena o 8,6 %, proto musí být nástroj konstruován jako dvouoperační. Dále byl určen polotovar pro válcování ve formě přířezu o rozměrech 80x118,5 mm, který bude nalámán z tyče standartní délky. Následovaly technologické výpočty, například rozměry ploch, určení tvářecích úhlů a úprava geometrie nástroje kvůli kritickým velikostem dřívků a silové zatížení. Jako výrobní stroj byla zvolena válcovačka ULS 100 RB, která je schopna válcovat polotovary o maximálním průměru 100 mm.

Další praktická část se věnovala návrhu nástroje, který byl konstruován jako dvouoperační. V první operaci byly vyválcovány největší průměry a jeden pomocný, který sloužil jako výchozí pro navazující operaci. Byl zvolen pomocný průměr o velikosti 45 mm, který svým objemem odpovídá potřebným doválcovaným objemům. Druhá operace kalibruje již vyrobené průměry a válcuje další, které tvoří finální vývalek. Navazující operací je oddělení odpadů na čelech vývalku. Nástroj byl rozdělen celkem na čtyři části, z nichž první je zanořující segment, na který něj plynule navazují další dva a celou sestavu pak uzavírá nožový držák osazený párem nožů. Horní a spodní nástroj se liší pouze v úpravě geometrie zadní části nožových držáků kvůli lepšímu vypadnutí vývalku po dokončení tvářecího procesu. Na horním zanořovacím segmentu se navíc nachází stavitelný doraz. Maximální opásání nástroje okolo pracovního válce je $277^{\circ}18'$. Nástroj spolu s potřebnou výkresovou dokumentací byl vytvořen v programu Autodesk Inventor 2022.

V průběhu návrhu proběhla simulace, která ověřila, že navrženým nástrojem lze vyrobit požadovanou součást. Navíc pomohla odhalit místo, kde docházelo u prvotního návrhu k defektům. Po úspěšné úpravě geometrie potvrdila, že vývalek lze vyválcovat s minimálními přijatelnými odchylkami. Simulace navíc stanovila, že maximální zatížení bude dosahovat síly až 201,5 kN v radiálním směru, což je násobně více než co byla vypočtena ve výpočtové části. Za lépe vyhovující reálnému stavu při tváření lze však považovat sílu ze simulace, jelikož byla počítána za podmínek, více odpovídají realitě při válcování. V simulaci byl použit materiálový model, který využívá Hensel-Spittelovy rovnice, zohledňují napěťové chování za určitých teplot.

Jako poslední bylo provedeno technicko-ekonomické zhodnocení navrhovaného řešení. Cena samotného vývalku byla stanovena na 368 Kč za kus. Očekávaná návratnost investic do vývoje nástroje se předpokládá po dosažení 186 517. vyrobeného kusu z důvodu nízké ziskovosti. Cena nástroje, včetně renovací a tepelného zpracování, byla odhadnuta na 3 320 000 Kč.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. MORAVEC, Ján. *Teória tvárnenia kovov*. Vysokoškolské učebnice (Žilinská univerzita). V Žiline: Žilinská univerzita, 2015. ISBN 978-80-554-1095-1.
 2. KRÍŽ, Rudolf a VÁVRA, Pavel. *Strojírenská příručka: 24 oddílů v osmi svazcích*. Praha: Scientia, 1998. ISBN 80-718-3054-2.
 3. FLOREC, Ivo. *Kovářství*. Praha: Grada Publishing, 2003. ISBN 80-247-0611-3.
 4. NĚMEC, Milan; SUCHÁNEK, Jan a ŠANOVEC, Jan. *Základy technologie I. 2.* přepracované vydání. Praha: Česká technika - nakladatelství ČCUT, 2011. ISBN 978-80-01-04867-2.
 5. FOREJT, Milan a PÍŠKA, Miroslav. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
 6. LIDMILA, Zdeněk. *Teorie a technologie tváření II*. Brno: Univerzita obrany, 2008. ISBN 978-80-7231-580-2.
 7. HOLUB, Jiří. *Příčné klínové válcování*. Praha: Nakladatelství technické literatury, n.p., 1972. ISBN 04-213-72.
 8. ŽÍDEK, Milan a KUŘE, František. *Válcování*. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská Ostrava, 1983.
 9. MICHNA, Štefan a NÁPRSTKOVÁ, Nataša. *Tváření*. V Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně, 2012. ISBN 978-80-7414-445-5.
 10. *Billets and Slabs*. Online. In: Steel House – Poladis Sakhli. Dostupné z: <https://steelhouse.ge/en/product/billets-and-slabs/>. [cit. 2024-03-06].
 11. *MILD STEEL SHEET METAL PLATE*. Online. In: EBAY. 2024. Dostupné z: <https://www.ebay.co.uk/itm/225549331910>. [cit. 2024-03-06].
 12. *Structural Steel 6" SCH 80x12m Coated line pipes*. Online. In: Shop online Industrial supplies -Gz Industrial supplies Nigeria. 2024. Dostupné z: <https://www.gz-supplies.com/structural-steel-6-sch-80x12m-coated-line-pipes/>. [cit. 2024-03-06].
 13. NAUNHEIMER, H; BERTSCHE, B; RYBORZ, J a NOVAK, W. Specification and Design of Shafts. Online. In: *Automotive transmissions: fundamentals, selection, design, and application*. 2nd ed. Berlin: Springer, c2011, s. 278–299. ISBN 978-3-642-16213-8. Dostupné z: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-16214-5_8. [cit. 2024-02-24].
 14. CHILDS, Peter R.N. Shafts. Online. *Mechanical Design Engineering Handbook*. 2014, s. 255-315. ISBN 9780080977591. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097759-1.00007-1>. [cit. 2024-03-06].
 15. VLK, František. *Převodová ústrojí motorových vozidel: spojky : převodovky : rozvodovky : diferenciály : hnací hřídele : klouby*. 2. vyd. Brno: VLK, 2000. ISBN 80-238-5275-2.
 16. VLK, František. *Teorie a konstrukce motocyklů*. Brno: František Vlk, 2004. ISBN 80-239-1601-7.
 17. VLK, František. *Automobilová technická příručka*. Brno: František Vlk, 2003. ISBN 80-238-9681-4.
 18. *Převodní tabulky Wr.Nr., ČSN, DIN, EN, AISI, AFNOR, BS, ASTM | PLECH SERVER*. Online. On-line výpočet hmotnosti plechů | PLECH SERVER. Dostupné z: <https://www.i-plech.cz/prevodni-tabulky-csn-din-en.html>. [cit. 2024-03-07].
 19. *Oceli Třídy 15. | TumliKOVO:Technologie strojího obrábění kovů*. Online. Technologie strojího obrábění kovů a broušení nástrojů. 2010. Dostupné
-

- z: <http://www.tumlikovo.cz/rubriky/materialy/konstrukcni-oceli/oceli-tridy-15/>. [cit. 2024-03-06].
20. *Ferona online - Materiálové normy*. Online. Ferona online. 2017. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/materialove-normy/>. [cit. 2024-03-06].
 21. LEINVEBER, Jiří a VÁVRA, Pavel. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 5., upr. vyd. Úvaly: Albra, 2011. ISBN 978-807-3610-814.
 22. ÚŘAD PRO NORMALIZACI A MĚŘENÍ. ČSN 41 5230, *Ocel 15 230 Cr -V*. 2. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1980.
 23. *32CrMo12 / 1.7361 - SteelNumber - Chemical composition, equivalent, properties*. Online. European Steel and Alloy Grades / Numbers - free database for search. 2023. Dostupné z: https://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=859. [cit. 2024-03-06].
 24. BERNÁŠEK, Vladimír a HOREJŠ, Jan. *Technologie slévání*. 3., upr. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2006. ISBN 80-704-3491-0.
 25. NĚMEC, Milan; BEDNÁŘ, Bohumír a BRYKSÍ STUNOVÁ, Barbora. *Teorie slévání*. 2. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-06026-1.
 26. PILOUS, Václav. *Technologie kovových materiálů*. 2. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2008. ISBN 978-80-7043-699-8.
 27. *What Are The Advantages of Forging Over Casting? - Blacksmith U*. Online. In: Blacksmith U - Easy to understand information for new blacksmiths. Dostupné z: <https://blacksmithu.com/advantages-forging-casting/>. [cit. 2024-03-07].
 28. ŘASA, Jaroslva; GABRIEL, Václav a KAFKA, Jindřich. *Strojírenská technologie 3: metody, stroje a nástroje pro obrábění*. 2. Praha: Scientia, spol s r. o., 2005. ISBN 80-7183-337-1.
 29. *CNC Turning: What It Is and How It Benefits Your Business | AT-Machining*. Online. In: Top China CNC Machining Service | Quick, Accurate, Flexible, No MOQ. Dostupné z: <https://at-machining.com/cnc-turning-what-and-how/>. [cit. 2024-03-07].
 30. DVOŘÁK, Milan. *Technologie II*. Vyd. 3., dopl., v Akademickém nakl. CERM 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2683-7.
 31. PATER, Zbigniew a TOFIL, Arkadiusz. OVERVIEW OF THE RESEARCH ON ROLL FORGING PROCESSES. Online. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2017, roč. 11, č. 2, s. 72-86. ISSN 2080-4075. Dostupné z: <https://doi.org/10.12913/22998624/70645>. [cit. 2024-03-07].
 32. *PRODUCTION PROCESS - Siderval*. Online. In: SIDERVAL | Steel and titanium components. 2024. Dostupné z: <https://www.siderval.it/en/production-process/>. [cit. 2024-03-07].
 33. VACH, Antonín. *Kování*. Učební texty vysokých škol / Vysoká škola báňská v Ostravě. Ostrava: Ediční středisko Vysoké školy báňské, 1956.
 34. PATER, Zbigniew; TOMCZAK, Janusz a BULZAK, Tomasz. New forming possibilities in cross wedge rolling processes. Online. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2018, roč. 18, č. 1, s. 149-161. ISSN 16449665. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.06.005>. [cit. 2024-05-02].
 35. *Make in India in machinery may get leg up from ambitious steel output plan | Company News - Business Standard*. Online. In: Business News, Finance News, Union Budget 2024, India News, Stock Markets BSE/NSE News, SENSEX, NIFTY. 2024. Dostupné z: <https://www.business-standard.com/article/companies/make-in-india-in-machinery->

-
- [may-get-leg-up-from-ambitious-steel-output-plan-118112700772_1.html?fbclid=IwAR0rByWNGU5pwa-06bkRhPV6odAmDJLX05GjS2G8GcGw1i5jSmeZtBD0opU](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00315-0). [cit. 2024-03-07].
36. ZÁLEŠÁK, Jan. *Příčné klínové válcování*. Brno: CVTS Dům techniky, 1972.
37. HLADKÝ, Václav. *Příčné klínové válcování v praxi na rotačních strojích typu UL. 1*. Koncernový podnik Šmeralovy závody. Brno: Koncernový Výzkumný ústav tvářecích strojů a technologie tváření, 1981.
38. PATER, Z. Cross-Wedge Rolling. Online. *Comprehensive Materials Processing*. 2014, s. 211-279. ISBN 9780080965338. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00315-0>. [cit. 2024-03-07].
39. BULZAK, Tomasz; PATER, Zbigniew a TOMCZAK, Janusz. Numerical and experimental analysis of a cross wedge rolling process for producing ball studs. Online. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2017, roč. 17, č. 4, s. 729-737. ISSN 16449665. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.02.002>. [cit. 2024-02-27].
40. KATEDRA STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE. *Katedra tváření kovů a plastů - Skripta*. Online. TECHNICKÁ UNIVERZITA LIBEREC. Úvod - Katedra strojírenské technologie. 2018. Dostupné z: https://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/02.htm. [cit. 2024-02-26].
41. BULZAK, Tomasz; PATER, Zbigniew a TOMCZAK, Janusz. Numerical and experimental analysis of a cross wedge rolling process for producing ball studs. Online. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2017, roč. 17, č. 4, s. 729-737. ISSN 16449665. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.02.002>. [cit. 2024-02-27].
42. NEIKOV, Oleg D., NEIKOV, Oleg D.; NABOYCHENKO, Stanislav S. a YEFIMOV, Nikolay A. (ed.). Chapter 2 - Mechanical Crushing and Grinding. Online. In: *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders*. Second edition. Elsevier, 2019, s. 65-90. ISBN 9780081005439. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081005439000026>. [cit. 2024-04-25].
43. WEROŃSKI, Wiesław S.; GONTARZ, Andrzej a PATER, Zbigniew. FORMING PROCESS OF SCREW SPIKE IN DOUBLECONFIGURATION. Online. *VIII International Conference on Computational Plasticity*. 2005, s. 1-4. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/237714786_FORMING_PROCESS_OF_SCREW_SPIKE_IN_DOUBLE_CONFIGURATION. [cit. 2024-04-25].
44. WANG, Min-ting; LI, Xue-tong a DU, Feng-shan. Analysis of Metal Forming in Two-Roll Cross Wedge Rolling Process Using Finite Element Method. Online. *Journal of Iron and Steel Research*. 2009, roč. 16, č. 1, s. 38-43. ISSN 1006-706X. Dostupné z: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801225-3.00006-1](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801225-3.00006-1). [cit. 2024-02-26].
45. DONG, Yaomin; TAGAVI, Kaveh A.; LOVELL, Michael R. a DENG, Zhi. Analysis of stress in cross wedge rolling with application to failure. Online. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2000, roč. 42, č. 7, s. 1233-1253. ISSN 0020-7403. Dostupné z: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(99\)00035-1](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(99)00035-1). [cit. 2024-02-26].
46. PATER, Zbigniew. Stress state in cross wedge rolling process. Online. *Archives of Metallurgy*. 2003, roč. 48, č. 1, s. 21-35. Dostupné
-

- z: https://www.researchgate.net/publication/287954909_Stress_state_in_cross_wedge_rolling_process. [cit. 2024-04-25].
47. PATER, Zb a WEROŃSKI, W. Determination of the Contact Area Between the Rolling Tools and the Workpiece in Cross Rolling Process. Online. *Journal of Materials Processing Technology*. 1994, roč. 45, č. 1-4, s. 105-110. ISSN 0924-0136. Dostupné z: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)90326-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)90326-3). [cit. 2024-02-26].
48. FU, X. P. a DEAN, T. A. Past developments, current applications and trends in the cross wedge rolling process. Online. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1993, roč. 33, č. 3, s. 367-400. ISSN 0890-6955. Dostupné z: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0890-6955\(93\)90047-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0890-6955(93)90047-X). [cit. 2024-02-26].
49. LI, Qiang a LOVELL, Michael. Cross wedge rolling failure mechanisms and industrial application. Online. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2008, roč. 37, č. 3, s. 265-278. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-007-0979-y>. [cit. 2024-02-26].
50. JOHNSON, W. a MAMALIS, A. G. A Survey of Some Physical Defects Arising in Metal Working Processes. Online. *Proceedings of the Seventeenth International Machine Tool Design and Research Conference*. 1977, s. 607-621. ISBN 978-1-349-81486-2. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-1-349-81484-8_68. [cit. 2024-04-25].
51. PATER, Zb; WEROŃSKI, J a GONTARZ, A. Study of the process stability of cross wedge rolling. Online. *Journal of Materials Processing Technology*. 1999, roč. 92-93, s. 458-462. ISSN 0924-0136. Dostupné z: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00229-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00229-0). [cit. 2024-02-26].
52. ZHENG, Zhenhua. Experimental Study on Cross Wedge Rolling of 21-4N Heat Resistant Steel. Online. *Metals*. 2019, roč. 9, č. 1. ISSN 2075-4701. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/met9010039>. [cit. 2024-02-26].
53. PATER, Zbigniew; TOMCZAK, Janusz a BULZAK, Tomasz. Cavity formation in cross-wedge rolling processes. Online. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2019, roč. 26, č. 10, s. 1-10. Dostupné z: [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s42243-018-0075-6\(0123456789\(\)\)..-volV\)\(0123456789\(\)\)..-volV](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s42243-018-0075-6(0123456789())..-volV)(0123456789())..-volV). [cit. 2024-02-27].
54. HAŠEK, Vladimír. *Kování*. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965.
55. JIA, Zhi; WEI, Baolin a SUN, Xuab. Study on the formation and prevention mechanism of internal voids in cross wedge rolling. Online. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021, roč. 115, s. 3579-3587. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00170-021-07367-x>. [cit. 2024-02-27].
56. LI, Qiang; LOVELL, Michael R.; SLAUGHTER, William a TAGAVI, Kevah. Investigation of the morphology of internal defects in cross wedge rolling. Online. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002, roč. 125-126, s. 248-257. ISSN 0924-0136. Dostupné z: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00303-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00303-5). [cit. 2024-02-27].
57. ELFMARK, Jiří. *Tváření kovů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1992. ISBN 80-03-00651-1.
58. WÓJCIK, Ł. a PATER, Z. Physical Simulation of the Mannesmann Effect in the Rolling Process. Online. *Archives of Metallurgy and Materials*. S. 1369-1375. ISSN 2300-1909. Dostupné z: <https://doi.org/10.24425/amm.2019.130103>. [cit. 2024-04-25].

-
59. YANG, Cuiping; DONG, Hongbiao a HU, Zhenghuan. Micro-mechanism of central damage formation during cross wedge rolling. Online. *Journal of Materials Processing Technology*. 2018, roč. 252, s. 322-332. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.09.041>. [cit. 2024-02-27].
60. LOVELL, Michael R. Evaluation of Critical Interfacial Friction in Cross Wedge Rolling. Online. *Journal of Tribology*. 2001, roč. 123, č. 2, s. 424-429. ISSN 0742-4787. Dostupné z: <https://doi.org/10.1115/1.1308016>. [cit. 2024-02-27].
61. DONG, Yamion; TAGAVI, Kaveh A. a LOVELL, Michael R. Analysis of interfacial slip in cross-wedge rolling: a numerical and phenomenological investigation. Online. *Journal of Materials Processing Technology*. 2000, roč. 97, č. 1-3, s. 44-53. ISSN 09240136. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00285-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00285-X). [cit. 2024-04-25].
62. SHCHUKIN, Valery Ya.; KOZHEVNIKOVA, G.V. a PETRENKO, V.V. Cross-Wedge Rolling at Pti Nas Belarus. Online. *Applied Mechanics and Materials*. 2012, roč. 201-202, s. 1198-1202. ISSN 1662-7482. Dostupné z: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.201-202.1198>. [cit. 2024-02-27].
63. MEYER, Matthias; STONIS, Malte a BEHRENS, Bernd Arno. Cross Wedge Rolling of Preforms for Crankshafts. Online. *Key Engineering Materials*. 2012, roč. 504-506, s. 205-210. ISSN 1662-9795. Dostupné z: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.504-506.205>. [cit. 2024-02-27].
64. ZHAO, Jing a LU, Li Qun. The Application of Multi-Wedge Cross Wedge Rolling Forming Long Shaft Technology. Online. *Applied Mechanics and Materials*. 2011, roč. 101-102, s. 1002-1005. ISSN 1662-7482. Dostupné z: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.101-102.1002>. [cit. 2024-02-27].
65. BARTNICKI, Jarosław; PATER, Zbigniew; GONTARZ, Andrzej a TOMCZAK, Janusz. INNOVATIVE METAL FORMING TECHNOLOGIES. Online. *Journal of Machine Engineering*. 2014, roč. 14, č. 1, s. 5-17. Dostupné z: <https://bibliotekanauki.pl/articles/100068>. [cit. 2024-02-27].
66. ZHAO, Jing; LU, Liqun a HU, Zhenghuan. Simulation of forming automotive semi-axes with multi-wedge cross wedge rolling. Online. *International Journal of Computer Applications in Technology*. 2011, roč. 41, č. 1/2. ISSN 0952-8091. Dostupné z: <https://doi.org/10.1504/IJCAT.2011.042226>. [cit. 2024-04-25].
67. PATER, Zbigniew; TOMCZAK, Janusz a BULZAK, Tomasz. A Cross Wedge Rolling Process for Forming 70 mm Diameter Balls from Heads of Scrap Railway Rails. Online. *Procedia Manufacturing*. 2017, roč. 11, č. 2351-9789, s. 466-473. ISSN 23519789. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.137>. [cit. 2024-02-26].
68. PATER, Zbigniew. A Comparison of Two-Roll and Three-Roll Cross Wedge Rolling Processes. Online. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2023, roč. 17, č. 1, s. 252-266. ISSN 2080-4075. Dostupné z: <https://doi.org/10.12913/22998624/158029>. [cit. 2024-02-27].
69. DANNO, Atsushi a TANAKA, Toshiaki. Hot forming of stepped steel shafts by wedge rolling with three rolls. Online. *Journal of Mechanical Working Technology*. 1984, roč. 9, č. 1, s. 21-35. ISSN 03783804. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0378-3804\(84\)90091-3](https://doi.org/10.1016/0378-3804(84)90091-3). [cit. 2024-02-27].
70. BARTNICKI, J. a PATER, Z. Numerical simulation of three-rolls cross-wedge rolling of hollowed shaft. Online. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005, roč. 164-
-

- 165, s. 1154-1159. ISSN 09240136. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.120>. [cit. 2024-05-04].
71. PATER, Zbigniew. Development of Cross-Wedge Rolling Theory and Technology. Online. *Steel Research International*. 2010, roč. 81, č. 9, s. 25-32. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/287496473_Development_of_Cross-Wedge_Rolling_Theory_and_Technology. [cit. 2024-02-27].
72. PATER, Z.; GONTARZ, A. a WERONSKI, W. Cross-wedge rolling by means of one flat wedge and two shaped rolls. Online. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006, roč. 177, č. 1-3, s. 550-554. ISSN 09240136. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.232>. [cit. 2024-02-27].
73. PATER, Z. Tools optimisation in cross wedge rolling. Online. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003, roč. 139, č. 1-3, s. 153-159. ISSN 09240136. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00212-7](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00212-7). [cit. 2024-02-27].
74. PATER, Zbigniew; TOMCZAK, Janusz; BULZAK, Tomasz a LI, Zixuan. Analysis of the use of variable angular parameter tools in cross-wedge rolling. Online. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022, roč. 83, s. 768-786. ISSN 15266125. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.09.052>. [cit. 2024-02-27].
75. ČSN 42 9030 *Výkovky ocelové zápusťkové: Přídavky na obrábění, mezní úchylky rozměrů a tvarů*. Praha: Český normalizační institut, 1986.
76. KOTOUČ, Jiří. *Tvářecí nástroje*. Praha: České vysoké učení technické, 1993. ISBN 80-010-1003-1.
77. ŠANOVEC, Jan a ČERMÁK, Jan. *Přípravky a nástroje pro tváření kovů za tepla*. Praha: ČVUT Praha, 1973.
78. LEINVEBER, Jiří a VÁVRA, Pavel. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 5., upr. vyd. Úvaly: Albra, 2011. ISBN 978-807-3610-814.
79. BARTSCH, Hans-Jochen. *Matematické vzorce*. 3., rev. vyd. Praha: Mladá fronta, 1996. ISBN 80-204-0607-7.
80. ARISTOV, V. M. *Strojírenství*. Sv. 6., Technologie strojírenské výroby. Praha: Průmyslové vydavatelství, 1952.
81. STARÝ, Petr. *Výroba šroubu*. Brno, 2018. 45 s, 1 příloha, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce doc. Ing. Michaela Císařová, Ph.D.
82. Šmeral - ULS 100 RA. Online. Šmeral - Tvářecí stroje. Dostupné z: <https://www.smeral.cz/cs/product/30/uls-100-ra>. [cit. 2024-04-29].
83. ÚŘAD PRO NORMALIZACI A MĚŘENÍ. ČSN 41 9642, *Ocel 19 642 Ni-Cr-Mo*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1971.
84. *Mat.No. 1.7218, DIN 25CrMo4, AISI 4130 - Co., Ltd*. Online. Alloy steel bars ,Medium to thick special steel plates,Alloy wire rods, Continuous casting alloy billets,Forged (Rolled) Steel Grinding BallManufacturers, Suppliers, Exporters - Shanghai hengtie metal Co.,Ltd. 2014. Dostupné z: https://www.htsteelmill.com/mat-no-1-7218-din-25crmo4-aisi-4130.html?gad_source=1&gclid=CjwKCAjw_e2wBhAEEiwAyFFFo28IS8xktHfMyK3lrfGD3VVncQogQwV7U4DUse4giiouzVL2cNH2ViBoCyAoQAvD_BwE. [cit. 2024-04-29].

-
85. *W300ISOBLOC - BÖHLER Czechia*. Online. Welcome | voestalpine High Performance Metals. 2024. Dostupné z: <https://www.bohler.cz/cs/products/w300isobloc/>. [cit. 2024-04-29].
 86. *W403VMR - BÖHLER Czechia*. Online. Welcome | voestalpine High Performance Metals. 2024. Dostupné z: <https://www.bohler.cz/cs/products/w403vmr/>. [cit. 2024-04-29].
 87. ŘIHÁČEK, Jan. *Počítačová podpora technologie: Část tváření*. Brno, 2015.
 88. WANG, Haoran; WANG, Wei; ZHAI, Ruixue; MA, Rui; ZHAO, Jun et al. Constitutive Equations for Describing the Warm and Hot Deformation Behavior of 20Cr2Ni4A Alloy Steel. Online. *Metals*. 2020, roč. 10, č. 9. ISSN 2075-4701. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/met10091169>. [cit. 2024-04-29].
 89. *Ferona online - Tyč ocelová kruhová válcovaná za tepla, EN 10060, |průměr|80*. Online. Ferona online - Vítejte. 2017. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/detail/22741/tyc-ocelova-kruhova-valcovana-za-tepla-en-10060-prumer-80>. [cit. 2024-04-29].
 90. *Ceník | Barko, s.r.o.* Online. Výkup druhotných surovin | Barko, s.r.o. | Barko, s.r.o. 2024. Dostupné z: https://druhotnesuroviny.cz/cenik?_gl=1*17h32gn*_up*MQ..*_ga*MTE5NjUwMTM0MS4xNzEzNDU3ODgy*_ga_E3835B9533*MTcxMzQ1Nzg4MS4xLjEuMTcxMzQ1Nzk3OC4wLjAuMA. [cit. 2024-04-29].
 91. *Produkty | ROBOTERM spol. s r.o.* Online. ROBOTERM spol. s r.o. 2022. Dostupné z: <https://www.roboterm.cz/cz/indukce/produkty/>. [cit. 2024-04-29].
 92. *Sazba C03d, tarif C03d - elektrina: popis, ceníky pro sazbu C03d | Kurzy.cz*. Online. Kurzy měn, akcie, komodity, zákony, zaměstnání - Kurzy.cz | Kurzy.cz. 2024. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/elektrina/c03d>. [cit. 2024-04-29].
-

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly

Označení	Legenda	Jednotka
A_{amor}	cena amortizace nástroje	[Kč·h ⁻¹]
a_i	výška trojúhelníku	[mm]
a_r	koeficient kvadratického členu	[-]
$B_{\text{zvrát}}$	bod zvratu	[ks]
b	velikost přepony	[mm]
b_r	koeficient lineárního členu	[-]
b_{xm}	šířka základní redukční plochy	[mm]
C_{el}	cena elektřiny	[Kč·kWh ⁻¹]
C_{hod}	hodinová mzda	[Kč·hod ⁻¹]
C_{oceli}	cena oceli	[Kč·kg ⁻¹]
C_{odpadu}	výkupní cena ocelového šrotu	[Kč·kg ⁻¹]
C_p	cena polotovaru převodové hřídele	[Kč]
c_r	absolutní člen	[-]
D	původní průměr polotvaru	[mm]
D_d	diskriminant	[-]
D_{red}	redukovaný průměr	[mm]
d_i	dílčí průměr vývalku	[mm]
d_0	původní průměr	[mm]
e	délka dřívku	[mm]
F_x	tangenciální složka síly	[N]
F_y	axiální složka síly	[N]
F_z	radiální složka síly	[N]
f	koeficient tření	[-]
h_v	hloubka vybrání	[mm]
h_n	výška činné plochy nástroje	[mm]
I	rozdělovací index	[-]
k	substituce rovnice	[-]
k_d	koeficient zvětšení	[-]
k_T	koeficient vlivu teploty	[-]
k_v	koeficient vlivu obvodové rychlosti	[-]
$k_{\alpha\beta}$	koeficient vlivu úhlů α β	[-]
L_c	celková délka vývalku	[mm]

Označení	Legenda	Jednotka
L_p	délka polotovaru	[mm]
L_T	délka tyče	[mm]
L_{doraz}	délka dorazu	[mm]
L_i	dílčí délka	[mm]
$L_{i\%}$	procentuální dílčí délka	[%]
L_{odpau}	délka odpadu z tyče	[mm]
$L_{Z\%}$	součet procentuálních délek	[mm]
L_1^{1op}	délka redukční plochy prvního dříku v první operaci	[mm]
L_2^{1op}	délka redukční plochy druhého dříku v první operaci	[mm]
l	velikost přídavku	[mm]
l_h	délka hladící části	[mm]
l_v	výška odvalování materiálu po šikmé redukční ploše	[mm]
l_1^{1op}	délka prvního dříku v první operaci	[mm]
l_2^{1op}	délka druhého dříku v první operaci	[mm]
Δl_i	tepelná roztažnost oceli	[mm]
M_{kc}	celkový kroutící moment	[Nm]
M_{kd}	moment čistých deformačních prací	[Nm]
M_{kz}	ztrátový moment	[Nm]
m_{CPT}	celková hmotnost polotovarů tyčoviny	[kg]
m_{odpadu}	celková hmotnost odpadu	[kg]
m_p	hmotnost polotovaru	[kg]
N_{CC}	celkový počet cyklů k dokončení série	[ks]
N_{CT}	náklady na tyčové polotovary	[Kč]
N_{amort}	amortizace používaného nástroje	[Kč]
N_{celk}	celkové náklady na jeden vývalek	[Kč]
N_{el}	náklady na elektrickou energii	[kWh]
N_{fix}	fixní náklady	[Kč]
$N_{otáček}$	počet otáček pracovních válců	[min ⁻¹]
$N_{pojištění}$	náklady na pojištění zaměstnance	[%]
N_{var}	variabilní náklady	[Kč]
$N_{vývalků}$	celkový počet vývalků	[ks]
N_{zam}	náklady na mzdy zaměstnance	[Kč]
n	počet nutných otáček	[-]
n_{ac}	celkové aktivní otáčky	[-]

Označení	Legenda	Jednotka
n_{ak}	aktivní otáčky válcové části	[-]
n_{ak}	aktivní otáčky kuželové části	[-]
n_s	velikost série	[ks]
n_t	otáčky tvářence	[ot·min ⁻¹]
n_v	otáčky pracovních válců	[ot·min ⁻¹]
P_{el}	celkový příkon	[kW]
P_P	počet kusů z tyče	[ks]
p_i	poloha stopy	[-]
p_p	koeficient v lineárním členu redukované rovnice	[-]
p_v	šířka hladícího povrchu	[mm]
q	absolutní člen redukované rovnice	[-]
R	větší poloměr válcované tyče z dvojice	[mm]
R_h	hlazený poloměr dřívku	[mm]
R_d	dělený poloměr	[mm]
R_{sm}	poloměr vrcholu nože	[mm]
R_{s0}	poloměr počátku nože	[mm]
R_v	poloměr válce	[mm]
R_z	rádus zaoblení	[mm]
r_t	válcovací poloměr	[mm]
S_{ki}	skupina obtížnosti	[-]
S_p^z	velikost vyrovnávací plochy v ose x	[mm ²]
S_p^{yi}	velikost vyrovnávací plochy v ose y	[mm ²]
S_p^z	velikost vyrovnávací plochy v ose z	[mm ²]
S_0	plocha původního příčného průřezu	[mm ²]
S_1	plocha konečného příčného průřezu	[mm ²]
s	posunutí stopy	[mm]
s_v	sevření mezi válci	[mm]
T	teplota	[°C]
ΔT	rozdíl teplot	[K]
t	čas potřebný k dokončení válcování	[s]
t_n	tloušťka nože	[mm]
t_{prac}	doba práce stroje	[hod]
u	válcovací krok	[mm]
u_d	zvětšený válcovací krok	[mm ²]

Označení	Legenda	Jednotka
V_N	výška nástroje	[mm]
V_s	objem součásti	[mm ³]
V_o	objem odpadu	[mm ³]
V_p	objem polotovaru	[mm ³]
V_1^{1op}	objem prvního dříku v první operaci	[mm ³]
V_2^{1op}	objem druhého dříku v první operaci	[mm ³]
v	šířka pole	[mm]
v_n	rychlost nástroje	[m·s ⁻¹]
v_o	obvodová rychlost	[mm·s ⁻¹]
v_r	výška šikmé redukční plochy	[mm]
w	parametr zohledňující velikost redukce	[-]
x_m	vzdálenost pomocné redukční plochy na dříku	[mm]
y_r	substituce pro v_r	[mm]
Z_i	přídavek	[mm]
z_i	souřadnice v ose z	[mm]
α	tvářecí úhel	[°]
α_T	součinitel teplotní roztažnosti	[K ⁻¹]
β	vnikací úhel	[°]
β'	pomocný vnikací úhel	[°]
λ	válcovací koeficient	[-]
δ_i	deformační poměr	[-]
ε_i	redukce	[%]
κ	úhel břitu	[°]
λ	válcovací koeficient	[-]
ρ	hustota oceli	[kg·m ⁻³]
σ_d	deformační odpor	[MPa]
σ_{dt}	deformační odpor materiálu za tepla	[MPa]
σ_p	přirozený přetvárný odpor	[MPa]
σ_n	normálové napětí	[MPa]
σ_k	mez kluzu	[MPa]
σ_1 a σ_3	napětí na Mohrových kružnicích	[MPa]
τ_f	smykové kontaktní napětí	[MPa]
τ_{max}	maximální smykové napětí	[MPa]

Označení	Legenda	Jednotka
χ	koeficient krčkování	[-]
ψ	součinitel vlivu rychlosti deformace	[-]

Zkratky

Označení	Legenda
CNC	computer numerical control
ISOBLOC	elektrostruskové přetavování
PKV	příčné klínové válcování
TZP	tepelné zpracování
WMR	vakuově přetavená

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Normálové napětí v průřezu
Příloha 2	Univerzální nožový segment
Příloha 3	Konstrukce ploch podle omezující podmínky
Příloha 4	Konstrukce ploch pro zamezení nekvalitního vývalku
Příloha 5	Přídavky na obrábění
Příloha 6	Tolerance a úchytky
Příloha 7	Délkové rozměry vývalku
Příloha 8	Kinematika
Příloha 9	Rozměry ploch
Příloha 10	Materiálový list oceli W300 ISOBLOCK
Příloha 11	Materiálový list oceli W403 WMR
Příloha 12	Průběhy zatěžujících sil
Příloha 13	Materiálový model oceli 32CrMoV12-10
Příloha 14	Deformace a napětí

SEZNAM VÝKRESŮ

Celková sestava	2024-DP-209306-S00
Celková sestava – kusovník	2024-DP-209306-K00
Spodní osazení	2024-DP-209306-S01
Spodní osazení – kusovník	2024-DP-209306-K01
Horní osazení	2024-DP-209306-S02
Horní osazení – kusovník	2024-DP-209306-K02
Spodní držák s noži	2024-DP-209306-S03
Spodní držák s noži – kusovník	2024-DP-209306-K03
Vodící lišta	2024-DP-209306-S04
Vodící lišta – kusovník	2024-DP-209306-K04
Horní držák s noži	2024-DP-209306-S05
Horní držák s noži – kusovník	2024-DP-209306-K05
Hřídél	2024-DP-209306-01
Spodní držák nože	2024-DP-209306-301
Deska	2024-DP-209306-401
Rolna	2024-DP-209306-402
Čep	2024-DP-209306-403
Horní držák nože	2024-DP-209306-601
Nůž d30	2024-DP-209306-X01
Nůž d27	2024-DP-209306-X02
Vodící kámen	2024-DP-209306-X04
Podložka	2024-DP-209306-X06
Doraz	2024-DP-209306-X07
Zadní segment	2024-DP-209306-Z01
Prostřední segment	2024-DP-209306-Z02
První segment	2024-DP-209306-Z03
Horní segment	2024-DP-209306-Z04

Normálové napětí v průřezu [38]

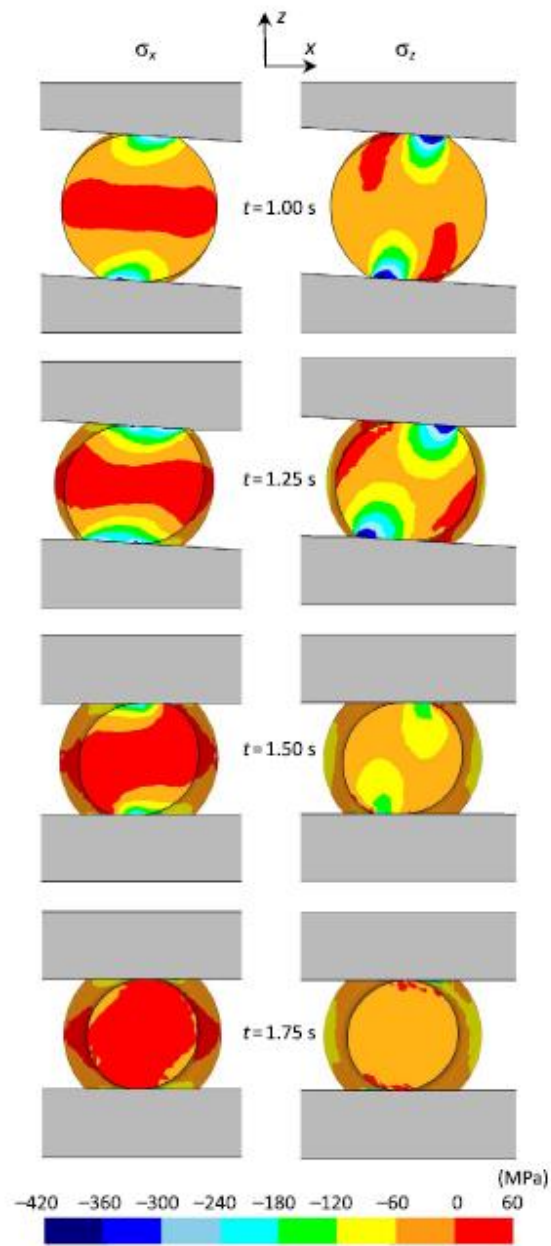
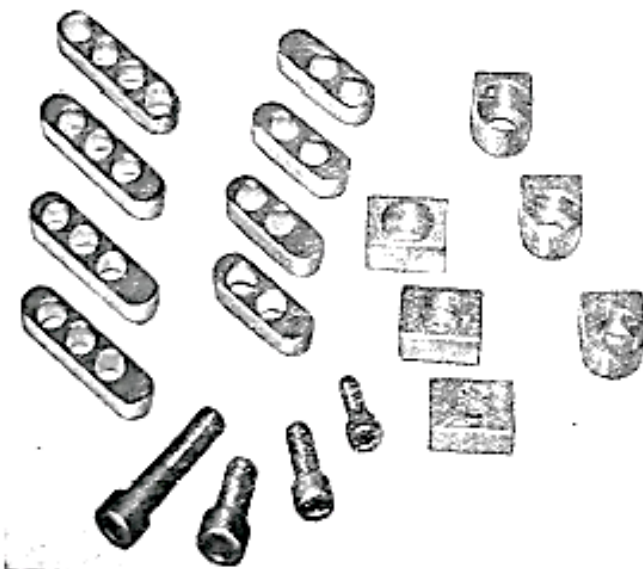


Figure 18 Normal stress distributions in the central plane, perpendicular to the workpiece axis, calculated in CWR at $\alpha = 27.5^\circ$, $\beta = 7^\circ$, $\delta = 1.4$, $d_0 = 20$ mm, $T = 1150^\circ\text{C}$, and material: C45 steel.

Univerzální nožový segment [7]



Obr. 122. Univerzální podložný segment pro skládané nástroje

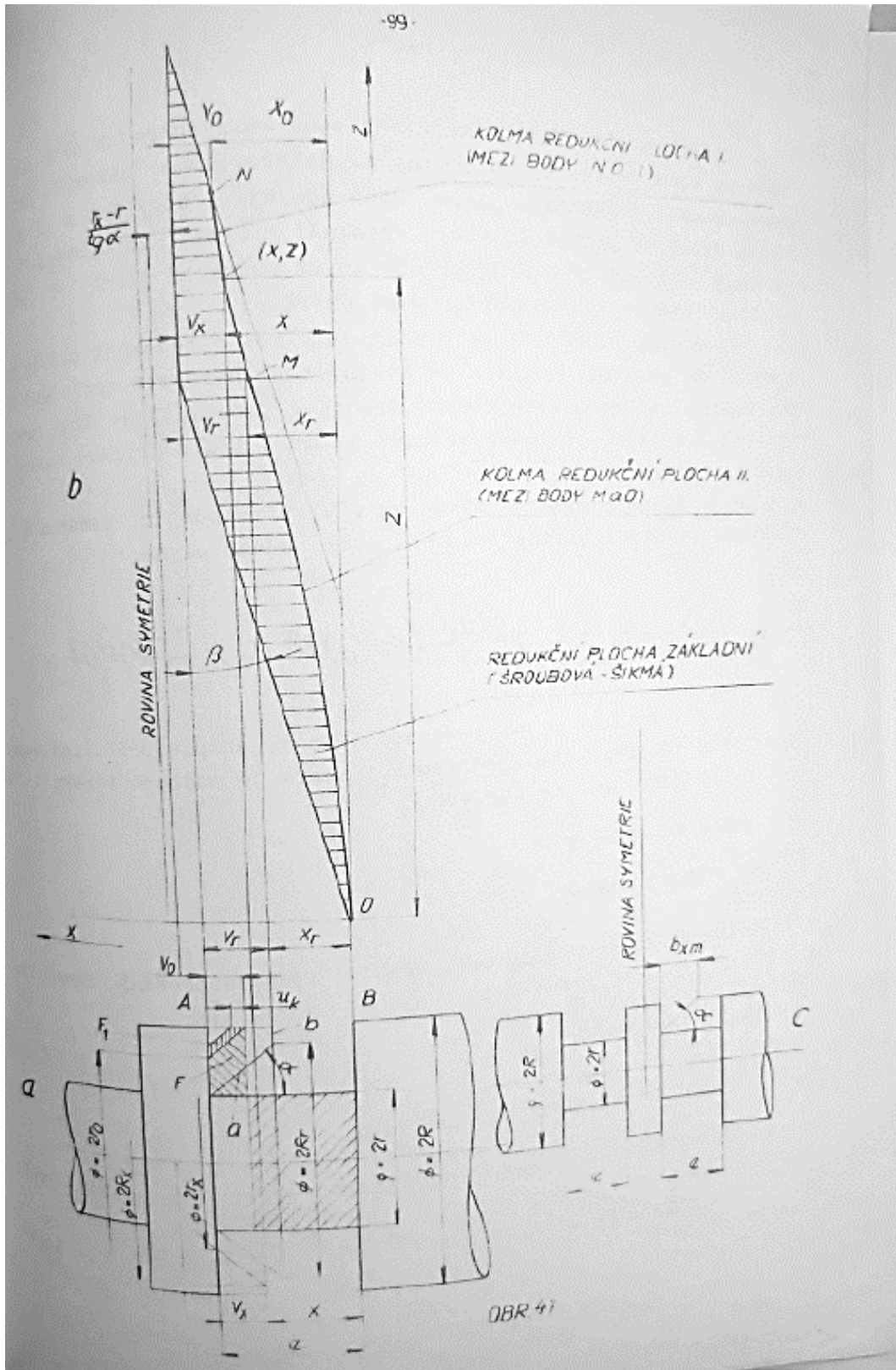


Obr. 123. Sada upevňovacích podložek a šroubů



Obr. 124. Nástroj na univerzálním podložném segmentu

Konstrukce ploch podle omezující podmínky [36]



Konstrukce ploch podle omezující podmínky [36]

Postup určení parametrů kolmých redukčních ploch.

Plošná redukce na vývalku je (obr.42)

$$\Delta F = \frac{R^2 - r^2}{R^2} 100 = \frac{15^2 - 7,5^2}{15^2} 100 = 75 \%.$$

Pro základní (šikmou) redukční plochu byly zvoleny parametry

$$\alpha = 20^\circ, \quad \operatorname{tg} \alpha = 0,364,$$

$$\beta = 5^\circ/710 - \text{na jmenovité šroubovici o průměru 710 mm,}$$

$$\operatorname{tg} \beta = 0,0875.$$

Nejdříve je nutné zjistit, zdali platí vztah 48.5 nebo 49.5

$$e \geq b_{xm} + x_m, \quad (48.5)$$

$$e < b_{xm} + x_m, \quad (49.5)$$

Konstrukce ploch podle omezující podmínky [36]

když

$$b_{xm} = \frac{R - r}{\operatorname{tg} \alpha}, \quad (36.5)$$

$$x_m = \frac{1}{3 \operatorname{tg} \alpha} \left(\frac{R^3}{r^2} - 3R + 2r \right) + \frac{\tilde{\kappa}}{2} \left(R - \frac{r^2}{R} \right) \operatorname{tg} \beta. \quad (42.5)$$

Po vyčíslení rovnic 36.5 a 42.5 je $b_{xm} = 20,6$ mm, $x_m = 29,4$ mm a jelikož $e = 31,6$ (obr.42a), platí vztah 49,5 z čehož plyne, že obecná kolmá redukční plocha se bude skládat z částí I a II. Rozhraní mezi plochami I a II je v bodě M, jehož souřadnice v soustavě x, z označme x_r a z_r a jeho vzdálenost od roviny A značkou v_r .

Veličina v_r je dána rovnicí

$$v_r^3 + 3r \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{\tilde{\kappa}}{2} \operatorname{tg} \beta \right) v_r^2 + 3r^2 \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{\tilde{\kappa} \operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha} \right) v_r - \frac{3r^2 e}{\operatorname{tg}^2 \alpha} = 0. \quad (59.5)$$

Rovnice 59.5 je pro v_r třetího stupně a na její řešení aplikujeme zásady uvedené v předcházející kapitole. Analogicky s rovnicí 66.5 napíšeme charakteristickou rovnici ve tvaru

$$v_r^3 + a_r v_r^2 + b_r v_r + c_r = 0, \quad 77.5$$

kde

$$a_r = 3r \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{\tilde{\kappa}}{2} \operatorname{tg} \beta \right),$$

$$b_r = 3r^2 \left(\frac{1}{\operatorname{tg}^2 \alpha} + \frac{\tilde{\kappa} \operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha} \right),$$

$$c_r = - \frac{3r^2 e}{\operatorname{tg}^2 \alpha}.$$

Konstrukce ploch podle omezující podmínky [36]

Po vyčíslení předcházejících výrazů je

$$\begin{aligned} a_r &\doteq 65, \\ b_r &\doteq 1390, \\ c_r &\doteq -40500. \end{aligned}$$

Pro řešení rovnice 77.5 určíme veličiny p a q podle rovnic 69.5 a 70.5

$$\begin{aligned} p &= b_r - \frac{a_r^2}{3} \doteq -10, \\ q &= \frac{2a_r^3}{27} - \frac{a_r b_r}{3} + c_r \doteq -50400 \end{aligned}$$

a dále podle rovnic 72.5 a 73.5

$$\begin{aligned} A &= \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} \doteq 36,8, \\ B &= \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} \doteq 0. \end{aligned}$$

Reálný kořen redukované rovnice je, podle rov. 71,5 ,

$$y_1 = A + B \doteq 36,8 \text{ mm}$$

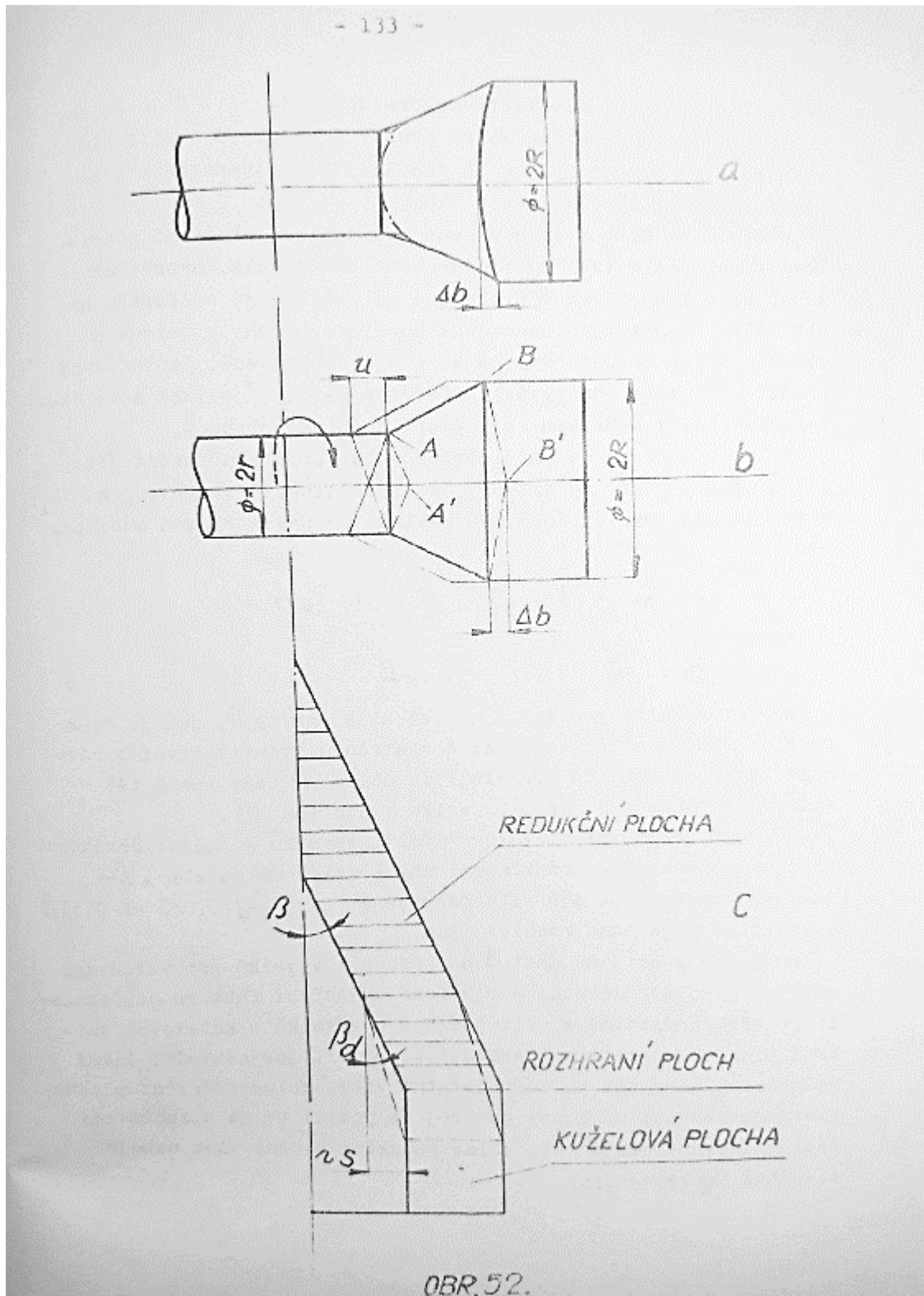
a reálný kořen původní rovnice 79.5 plyne z rovnice 67.5

$$v_r = y_1 - \frac{a_r}{3} \doteq 15,1 \text{ mm.}$$

Souřadnice x_r a z_r bodu M určíme z rovnic 60.5 a 61.5, když $v_x = v_r$ a $r_x = r$:

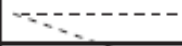





$$\begin{aligned} x_r &\doteq 31,6 - 15,1 \doteq 16,5 \\ z_r &\doteq 361,5. \end{aligned}$$

Konstrukce ploch pro zamezení nekvalitního vývalku [36]



Přídavky na obrábění – válcové [38]

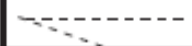
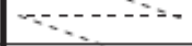
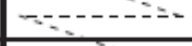
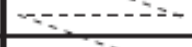


Table 9 Machining allowances Z_1 – for cylindrical surfaces

Maximal diameter, mm	Material difficulty M_1 M_2	Length of rolled part, mm				
		< 100	100–160	160–250	240–400	400–1000
0–25		1.5	1.5	1.5	1.5	---
25–40		1.5	1.5	1.5	1.5	2.0
40–63		1.5	1.5	1.5	2.0	2.5
63–100		1.5	1.5	2.0	2.5	3.0
100–150		1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
		2.0	2.5	3.0	3.5	4.0

Note: For cylindrical surfaces formed at deformation ratios of $\delta > 2.0$, allowance Z_1 increases by 0.5 mm.
Pater, Z. *Cross-Wedge Rolling*. Lublin University of Technology: Lublin, 2009.

Přídavky na obrábění – čelní [38]

Table 10 Machining allowances Z_2 – for frontal surfaces

Maximal diameter, mm	Material difficulty		Length of rolled part, mm				
	M_1	M_2	< 100	100–160	160–250	240–400	400–1000
0–25			1.5	1.5	1.5	1.5	---
25–40			1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
40–63			1.5	1.5	1.5	1.5	2.0
63–100			1.5	1.5	1.5	2.0	2.5
100–150			1.5	1.5	2.0	2.5	3.0
			1.5	2.0	2.5	3.0	3.5

Note: Allowances Z_3 for frontal surfaces of ends should be estimated as $Z_3 = Z_2 + 0.5$.
Pater, Z. *Cross-Wedge Rolling*. Lublin University of Technology: Lublin, 2009.

Tolerance a úchytky – průměrové [38]

Table 11 Tolerances and deviations acceptable for diametral dimensions

Mass, kg		Material difficulty		Massive index				Nominal diameter, mm									
								0–25		25–40		40–63		63–100		100–150	
from	to	M ₁	M ₂	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	Tolerance and deviations, mm									
0	0.4							0.9	+0.6 -0.3	1.0	+0.7 -0.3	1.1	+0.7 -0.4	1.2	+0.8 -0.4	1.4	+0.9 -0.5
0.4	1.0							1.0	+0.7 -0.3	1.1	+0.7 -0.4	1.2	+0.8 -0.4	1.4	+0.9 -0.5	1.6	+1.1 -0.5
1.0	1.8							1.1	+0.7 -0.4	1.2	+0.8 -0.4	1.4	+0.9 -0.5	1.6	+1.1 -0.5	1.8	+1.2 -0.6
1.8	3.2							1.2	+0.8 -0.4	1.4	+0.9 -0.5	1.6	+1.1 -0.5	1.8	+1.2 -0.6	2.0	+1.3 -0.7
3.2	5.5							1.4	+0.9 -0.5	1.6	+1.1 -0.5	1.8	+1.2 -0.6	2.0	+1.3 -0.7	2.2	+1.5 -0.7
5.5	10							1.6	+1.1 -0.5	1.8	+1.2 -0.6	2.0	+1.3 -0.7	2.2	+1.5 -0.7	2.5	+1.7 -0.8
10	20							1.8	+1.2 -0.6	2.0	+1.3 -0.7	2.2	+1.5 -0.7	2.5	+1.7 -0.8	2.8	+1.9 -0.9
20	30							2.0	+1.3 -0.7	2.2	+1.5 -0.7	2.5	+1.7 -0.8	2.8	+1.9 -0.9	3.2	+2.1 -1.1
								2.2	+1.5 -0.7	2.5	+1.7 -0.8	2.8	+1.9 -0.9	3.2	+2.1 -1.1	3.6	+2.4 -1.2
								2.5	+1.7 -0.8	2.8	+1.9 -0.9	3.2	+2.1 -1.1	3.6	+2.4 -1.2	4.0	+2.7 -1.3
								2.8	+1.9 -0.9	3.2	+2.1 -1.1	3.6	+2.4 -1.2	4.0	+2.7 -1.3	4.5	+3.0 -1.5
								3.0	+2.0 -1.0	3.6	+2.4 -1.2	4.0	+2.7 -1.3	4.5	+3.0 -1.5	5.0	+3.3 -1.7

Note: For diameters formed at $e < 0.5$, lower deviation should be increased by 0.5 mm.
 Pater, Z. *Cross-Wedge Rolling*: Lublin University of Technology: Lublin, 2009.

Tolerance a úchytky – délkové [38]

Table 12 Tolerances and deviations acceptable for length dimensions

Mass, kg		Material difficulty		Massive index				Rolled length, mm																			
								0-32		32-100		100-160		160-250		250-400		400-630		630-1000							
from	to	M ₁	M ₂	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	Tolerance and deviations, mm																			
0	0.4							0.8	+0.5 -0.3	0.9	+0.6 -0.3	1.0	+0.7 -0.3	1.1	+0.7 -0.4	1.2	+0.8 -0.4	1.4	+0.9 -0.5	1.6	+1.1 -0.6	1.8	+1.2 -0.7	2.0	+1.3 -0.7		
0.4	1.0							0.9	+0.6 -0.3	1.0	+0.7 -0.3	1.1	+0.7 -0.4	1.2	+0.8 -0.4	1.4	+0.9 -0.5	1.6	+1.1 -0.5	1.8	+1.2 -0.6	2.0	+1.3 -0.7	2.2	+1.5 -0.7	2.5	+1.7 -0.8
1.0	1.8							1.0	+0.7 -0.3	1.1	+0.7 -0.4	1.2	+0.8 -0.4	1.4	+0.9 -0.5	1.6	+1.1 -0.5	1.8	+1.2 -0.6	2.0	+1.3 -0.7	2.2	+1.5 -0.7	2.5	+1.7 -0.8	2.8	+1.9 -0.9
1.8	3.2							1.1	+0.7 -0.4	1.2	+0.8 -0.4	1.4	+0.9 -0.5	1.6	+1.1 -0.5	1.8	+1.2 -0.6	2.0	+1.3 -0.7	2.2	+1.5 -0.7	2.5	+1.7 -0.8	2.8	+1.9 -0.9	3.2	+2.1 -1.1
3.2	5.5							1.2	+0.8 -0.4	1.4	+0.9 -0.5	1.6	+1.1 -0.5	1.8	+1.2 -0.6	2.0	+1.3 -0.7	2.2	+1.5 -0.7	2.5	+1.7 -0.8	2.8	+1.9 -0.9	3.2	+2.1 -1.1	3.6	+2.4 -1.2
5.5	10							1.4	+0.9 -0.5	1.6	+1.1 -0.5	1.8	+1.2 -0.6	2.0	+1.3 -0.7	2.2	+1.5 -0.7	2.5	+1.7 -0.8	2.8	+1.9 -0.9	3.2	+2.1 -1.1	3.6	+2.4 -1.2	4.0	+2.7 -1.3
10	20							1.6	+1.1 -0.5	1.8	+1.2 -0.6	2.0	+1.3 -0.7	2.2	+1.5 -0.7	2.5	+1.7 -0.8	2.8	+1.9 -0.9	3.2	+2.1 -1.1	3.6	+2.4 -1.2	4.0	+2.7 -1.3	4.5	+3.0 -1.5
20	30							1.8	+1.2 -0.6	2.0	+1.3 -0.7	2.2	+1.5 -0.7	2.5	+1.7 -0.8	2.8	+1.9 -0.9	3.2	+2.1 -1.1	3.6	+2.4 -1.2	4.0	+2.7 -1.3	4.5	+3.0 -1.5	5.0	+3.3 -1.7
								2.0	+1.3 -0.7	2.2	+1.5 -0.7	2.5	+1.7 -0.8	2.8	+1.9 -0.9	3.2	+2.1 -1.1	3.6	+2.4 -1.2	4.0	+2.7 -1.3	4.5	+3.0 -1.5	5.0	+3.3 -1.7	5.5	+3.7 -1.8
								2.2	+1.5 -0.7	2.5	+1.7 -0.8	2.8	+1.9 -0.9	3.2	+2.1 -1.1	3.6	+2.4 -1.2	4.0	+2.7 -1.3	4.5	+3.0 -1.5	5.0	+3.3 -1.7	5.5	+3.7 -1.8	6.0	+4.0 -1.8
								2.5	+1.7 -0.8	2.8	+1.9 -0.9	3.2	+2.1 -1.1	3.6	+2.4 -1.2	4.0	+2.7 -1.3	4.5	+3.0 -1.5	5.0	+3.3 -1.7	5.5	+3.7 -1.8	6.0	+4.0 -1.8	6.5	+4.3 -1.9
								2.8	+1.9 -0.9	3.2	+2.1 -1.1	3.6	+2.4 -1.2	4.0	+2.7 -1.3	4.5	+3.0 -1.5	5.0	+3.3 -1.7	5.5	+3.7 -1.8	6.0	+4.0 -1.8	6.5	+4.3 -1.9	7.0	+4.6 -2.0

Pater, Z. *Cross-Wedge Rolling*. Lublin University of Technology: Lublin, 2009.

Délkové rozměry vývalku

		Délky na vývalku									
D [mm]		80	66	54	45	39	38	37	30	29	27
Délka [mm]	originál	20,5	62,1	81,5	45,4	42,3	147,3	41,5	194,6	110,5	128,1
	roztažnost	0,3	0,9	1,1	0,6	0,6	2	0,6	2,7	1,5	1,8
	dílčí	20,5	19,8	19,4		42,3	36,8	21	47,3	29	86,6
Délka v [%]		6,35	6,14	6,01	0	13,11	11,4	6,51	14,66	8,99	26,84

Rozměry ploch

Kubická rovnice:

$$v_{r3}^3 + a_{r3} \cdot v_{r3}^2 + b_{r3} \cdot v_{r3} + c_{r3} = 0$$

- koeficient kvadratického členu:

$$\begin{aligned} a_{r3} &= 3 \cdot r_3 \cdot \left(\frac{1}{\tan \alpha_3} + \frac{\pi}{2} \cdot \tan \beta_3 \right) \\ &= 3 \cdot 19,5 \cdot \left(\frac{1}{\tan 23^\circ 5'} + \frac{\pi}{2} \cdot \tan 9^\circ \right) = 149,095 \end{aligned}$$

- koeficient lineárního členu

$$\begin{aligned} b_{r3} &= 3 \cdot r_3^2 \cdot \left(\frac{1}{(\tan \alpha_3)^2} + \frac{\pi \cdot \tan \beta_3}{\tan \alpha_3} \right) \\ &= 3 \cdot 19,5^2 \cdot \left(\frac{1}{(\tan 23^\circ 5')^2} + \frac{\pi \cdot \tan 9^\circ}{\tan 23^\circ 5'} \right) = 7\,339,163 \end{aligned}$$

- absolutní člen

$$\begin{aligned} c_{r3} &= -\frac{3 \cdot r_3^2 \cdot e_3}{(\tan \alpha_3)^2} \\ &= -\frac{3 \cdot 19,5^2 \cdot 42,3}{(\tan 23^\circ 5')^2} = -260\,224 \end{aligned}$$

Redukovaný tvar:

$$y_3^3 + p \cdot y + q = 0 \rightarrow v_{r3} = y_3 + \frac{a_{r3}}{3}$$

- koeficient v lineárním členu redukované rovnice:

$$p = b_{r3} - \frac{a_{r3}^2}{3} = 7\,339,163 - \frac{149,095^2}{3} = -70,608$$

- absolutní člen redukované rovnice:

$$\begin{aligned} q &= \frac{2 \cdot a_{r3}^2}{27} - \frac{a \cdot b}{3} + c \\ &= \frac{2 \cdot 149,095^2}{27} - \frac{149,095 \cdot 7\,339,163}{3} + (-260\,224) = -623\,322 \end{aligned}$$

Reálný kořen:

$$y_3 = A + B$$

- A:

$$A = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{D}} = \sqrt[3]{-\frac{-623\,322}{2} - \sqrt{97\,132\,557\,623}} = 85,422$$

- B:

$$B = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{D}} = \sqrt[3]{-\frac{-623\,322}{2} + \sqrt{97\,132\,557\,623}} = 0,276$$

Materiálový list oceli W300 ISOBLOCK [85]



NÍSTROJOVÉ OCELI PRO PRÁCI ZA
TEPLA



Technické údaje

Označení materiálu		Normy	
1.2343	SEL	4957	EN ISO
X37CrMoV5-1	EN	G4404	JIS
T20611	UNS	#207	NADCA
H11	ASl		
SKD6	JIS		
D1830	NADCA		

Chemické složení

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0,36	0,90	0,40	5,20	1,30	0,45

Materiálové vlastnosti

	Síla za tepla	Horláková upevnost	Odalnost proti potřebebení za tepla
BÖHLER W100 ISO BLOC	★★	★★★★	★★
BÖHLER W100 ISO DISC	★★	★★★	★★
BÖHLER W100 ISO DISC	★★★	★★★	★★★
BÖHLER W100 ISO BLOC	★★★	★★★★	★★★
BÖHLER W100 ISO DISC	★★★★	★★★	★★★★
BÖHLER W150 ISO BLOC	★★★	★★★★★	★★★
BÖHLER W300 ISO BLOC	★★★★★	★★★★	★★★★★
BÖHLER W100 VNR	★★	★★★★★	★★
BÖHLER W100 VNR	★★★	★★★★	★★★★

Stav dodání

Žháno	
Tvrdost(HB)	max. 229
Hardened and Tempered	
Tvrdost(HRC)	40 na 55 j bias hardened and tempered (BHT)
Hardened and Tempered	
Tvrdost(HRC)	30 na 44

Materiálový list oceli W300 ISOBLOCK [85]



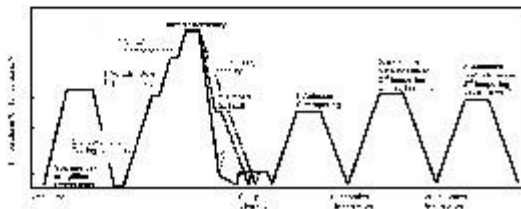
NÍSTROJOVÉ OCELI PRO PRÁCI ZA
TEPLA



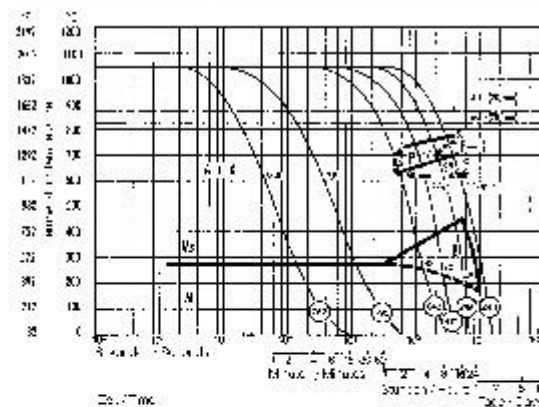
Tepelné zpracování

Annealing		
Teplota	750 na 800 °C	Holding time 6 to 8 hours. Slow, controlled furnace cooling at 10 to 20°C/h (50 to 68°F/hr) to approx. 600°C (1112°F), further cooling in air.
Žláhání na odstranění vnitřního prnutí		
Teplota	600 na 670 °C	For stress relief after extensive machining or for complicated tools. Holding time depending on tool size after complete heating 2 - 6 hours in neutral atmosphere. Slow furnace cooling.
Kalení a popouštění		
Teplota	1 000 na 1 030 °C	(Die casting equipment: 1000 - 1010 °C (1832 - 1850°F)) Holding time after temperature equalization: 15 to 30 minutes; Quenching: Oil, salt bath (500 - 550°C (932-1022°F)), air, vacuum; After hardening, tempering to the desired working hardness (see tempering chart).

Heat treatment sequence



Continuous cooling CCT curves



Austenitising temperature: 1030°C (1886°F)
Holding time: 15 minutes

- Vickers hardness
- 2...4:6 phase percentages
- 0.35...3.5 cooling parameter, i.e. duration of cooling from 800 - 500°C (1472-932°F) in s x 10⁻²
- 5...0.5 K/min cooling rate in K/min in the 800 - 500°C (1472-932°F) range

Numbers in circles = Vickers hardness

Materiálový list oceli V403 WMR [86]



NÍSTROJOVÉ OCELI PRO PRÁCI ZA TEPLA

Rozměrový sortiment k dispozici

Tyčová ocel

Popis produktu

BÖHLER W403 VMR - vakuově přetavená ocel pro práci za tepla s výjimečně vysokou pevností za tepla, což jí dodává maximální odolnost proti vzniku trhlin v důsledku cyklického teplotního namáhání.

Trasa tavení

Air melted + VAR

Vlastnosti

- > Houževnatost a tažnost : vysoká
- > Odolnost proti opotřebení : vysoká
- > Obrábělnost : dobrá
- > Tvrdost za tepla (červená tvrdost) : vysoká
- > Lehčitelnost : velmi vysoká
- > Tepelná vodivost : velmi vysoká
- > Mikročistota : velmi vysoká

Použití

- > Tlakové lití
- > Všeobecné díly strojírenství
- > Poloteplé lisování
- > Glasfibre reinforced plastics
- > Protlačování
- > Nízkatlaké lití
- > Rychlokovačí kování
- > Kování
- > Vstříkované (plastů)
- > Strojrenství

Technické údaje

Označení materiálu	Normy
-1.23.67 SEL	#207 NADCA
-X38C#MoV5-3 EN	
C1885 NADCA	

Chemické složení

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0,38	0,20	0,25	5,00	2,80	0,65

Materiálový list oceli V403 WMR [86]



NÍSTROJOVÉ OCELI PRO PRÁCI ZA
TEPLA



Materiálové vlastnosti

	Síla za tepla	Horlá houevnatost	Odolnost proti opotřebování za tepla
BÖHLER W403 VMR	★★★★	★★★★	★★★★
BÖHLER W100 ISO BLOC	**	★★★★	**
BÖHLER W100 ISO DISC	**	***	**
BÖHLER W100 ISO BLOC	***	★★★★	***
BÖHLER W100 ISO DISC	***	***	***
BÖHLER W101 ISO DISC	★★★★	***	★★★★
BÖHLER W350 ISO BLOC	***	★★★★	***
BÖHLER W180 ISO BLOC	★★★★★	★★★★	★★★★★
BÖHLER W400 VMR	**	★★★★	**

Stav dodání

Žháno

Tvrdost (HRC) max. 205

Teplné zpracování

Annealing

Teplota	800 na 850 °C	Holding time 6 to 8 hours. Slow, controlled furnace cooling at 10 to 20°C/h (50 to 68°F/hr) to approx. 600°C (1112°F). Further cooling in air.
---------	---------------	--

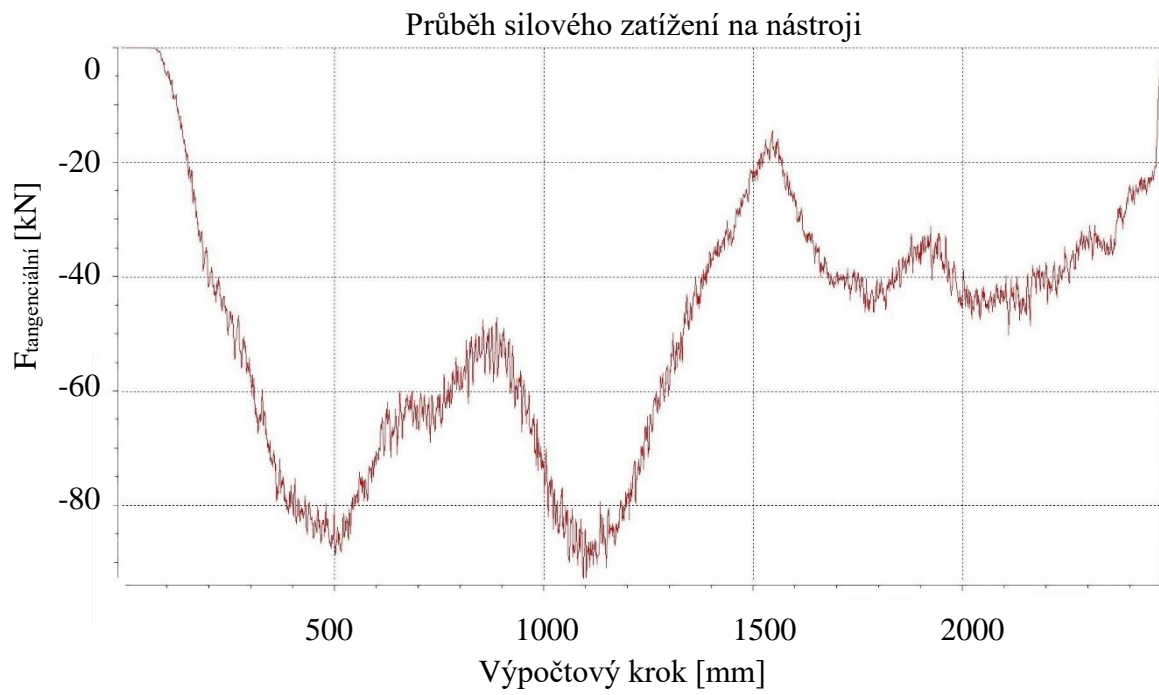
Žhání na odstranění vnitřního prnutí

Teplota	600 na 670 °C	For stress relief after extensive machining or for complicated tools. Holding time depending on tool size after complete heating 2 - 6 hours in neutral atmosphere. Slow furnace cooling.
---------	---------------	---

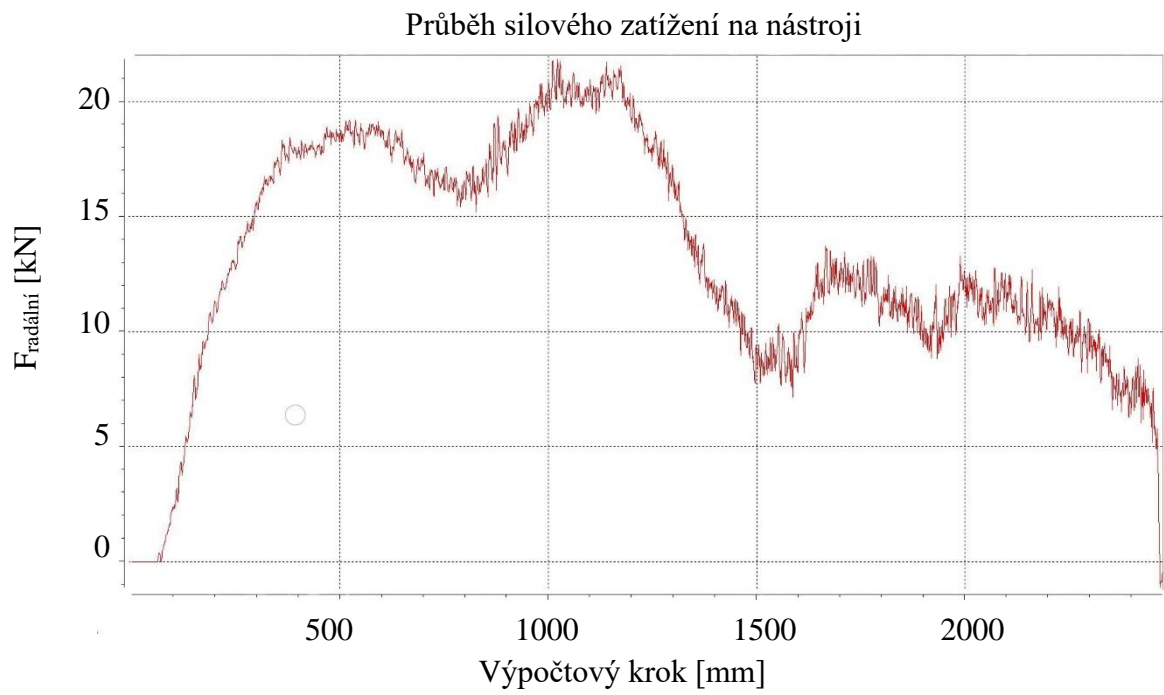
Kalení a popouštění

Teplota	1020 na 1030 °C	Holding time after temperature equalization: 15 to 30 minutes; In order to prevent coarsening of the grain, hardening must be carried out at the recommended temperature; Quenching: oil, salt bath (500 - 550°C [930 to 1020 °F]), air, inert gas in vacuum; After hardening, required tempering treatment to achieve desired working hardness (see tempering chart).
---------	-----------------	--

Průběhy zatěžujících sil



Průběhy zatěžujících sil



Materiálový model oceli 32CrMoV12-10

Hot Forming - Spittel's equation - 32CrMoV12-10 / 1.7765

Material model | 2D-View | 3D-View

Rheological law

$$\sigma_f = A e^{m_1 T} T^{m_2} \dot{\epsilon}^{m_3} e^{m_4 / \dot{\epsilon}} (1 + \dot{\epsilon})^{m_5 T} e^{m_7 \dot{\epsilon}} \dot{\epsilon}^{m_3} \dot{\epsilon}^{m_8 T}$$

Regression coefficients

A = 1911,956

m₁ = -0,00273 m₅ = 0

m₂ = -0,09621 m₇ = 0

m₃ = 0,13964 m₈ = 0

m₄ = -0,04263 m₉ = 0

Validity domain

for temperature

T_{min} = 660,3 T_{max} = 1250

for strain

ε_{min} = 0,04 ε_{max} = 1,5

for strain rate

ε̇_{min} = 0,01 ε̇_{max} = 500

Strain softening limit

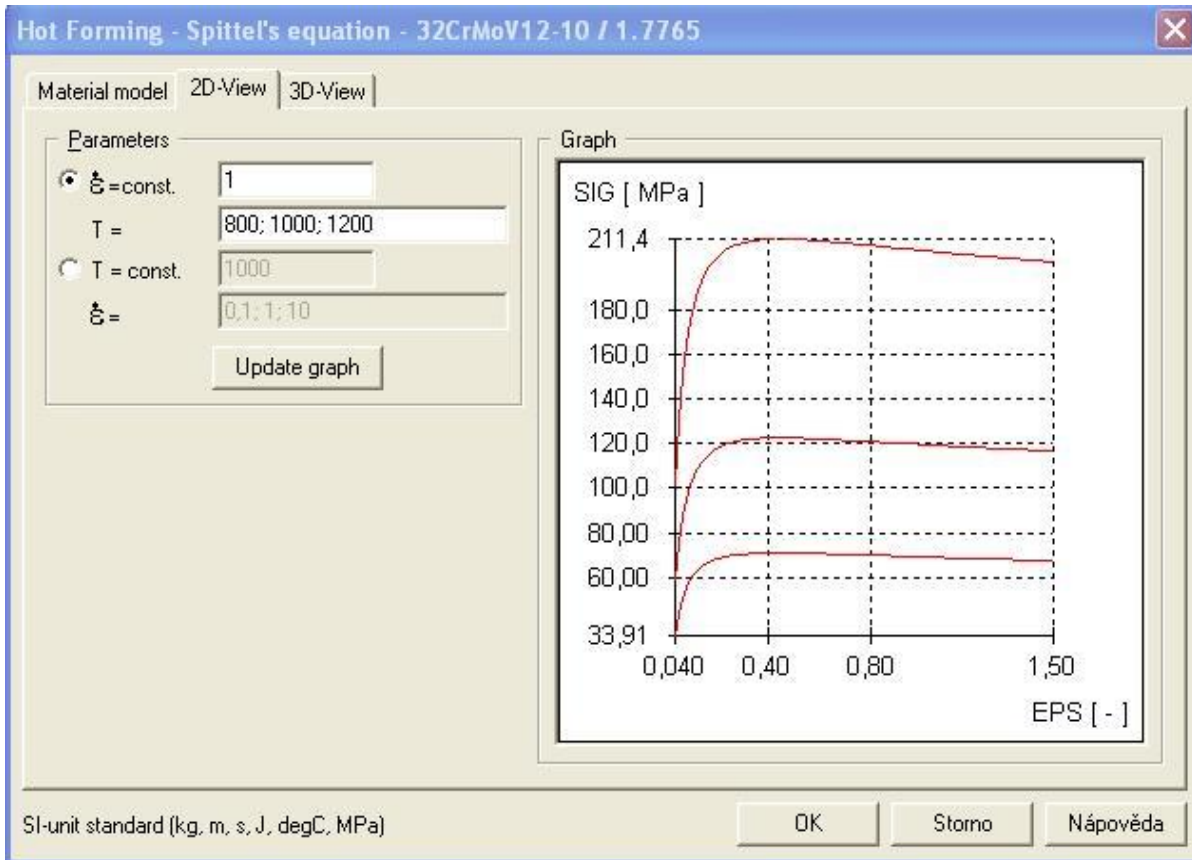
without softening limit

softening stops after ε_{ss} = 0

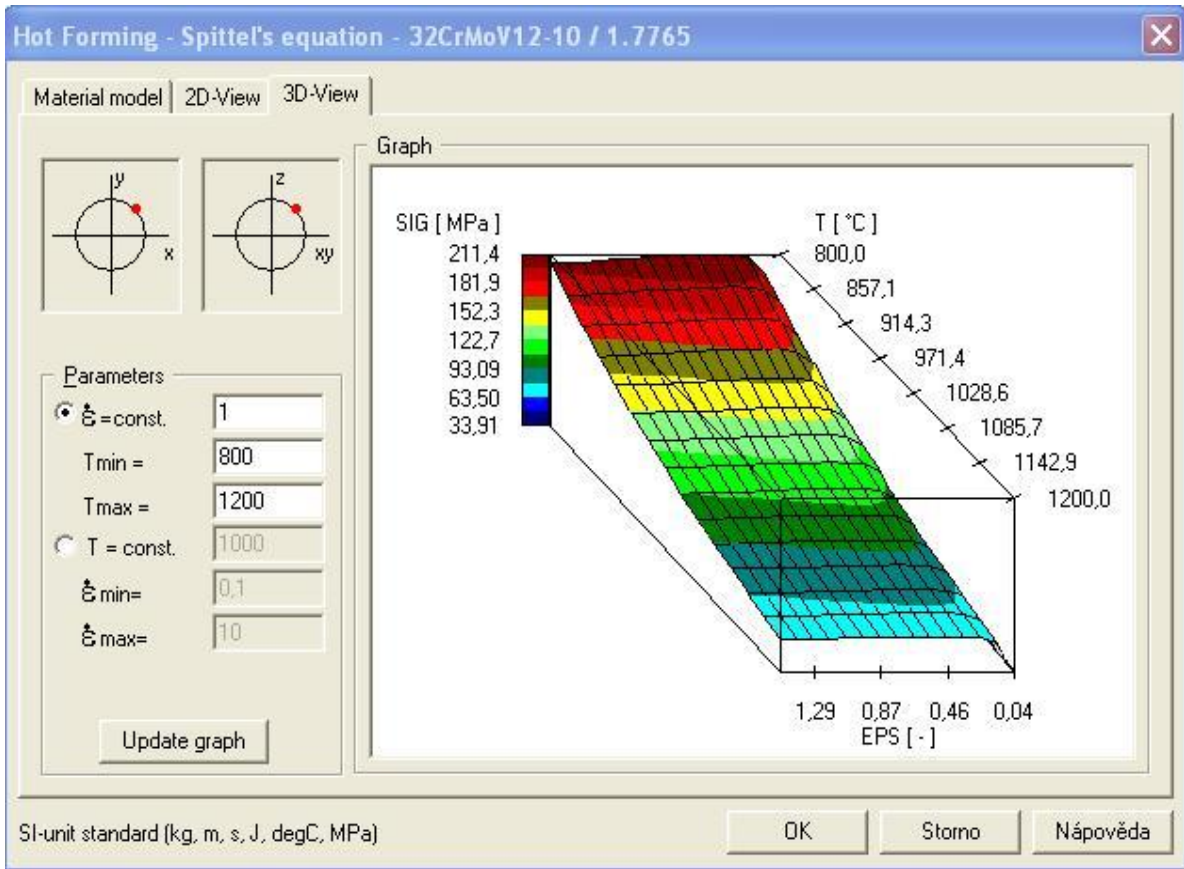
SI-unit standard (kg, m, s, J, degC, MPa)

OK Storno Nápověda

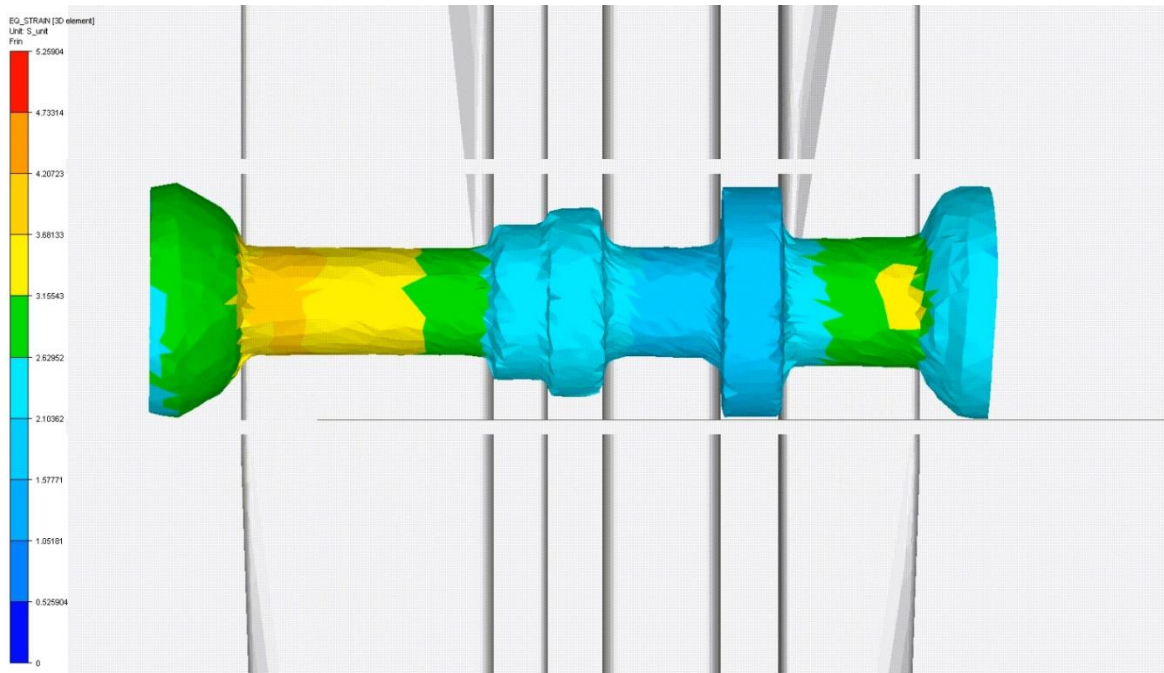
Materiálový model oceli 32CrMoV12-10



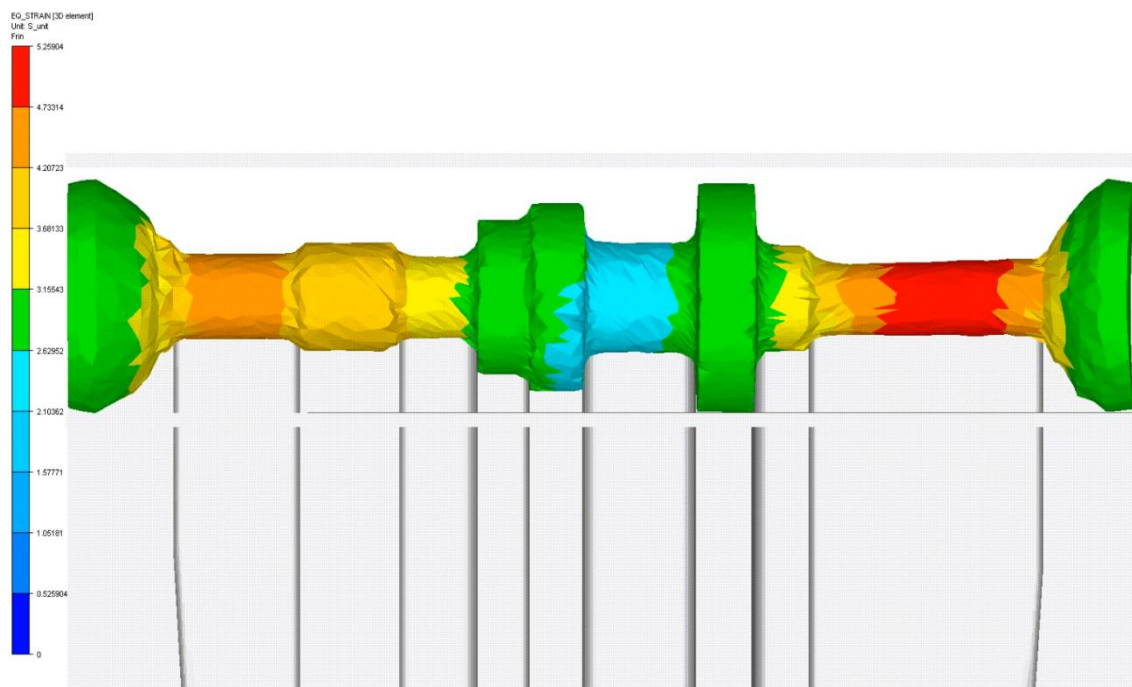
Materiálový model oceli 32CrMoV12-10



Deformace a napětí

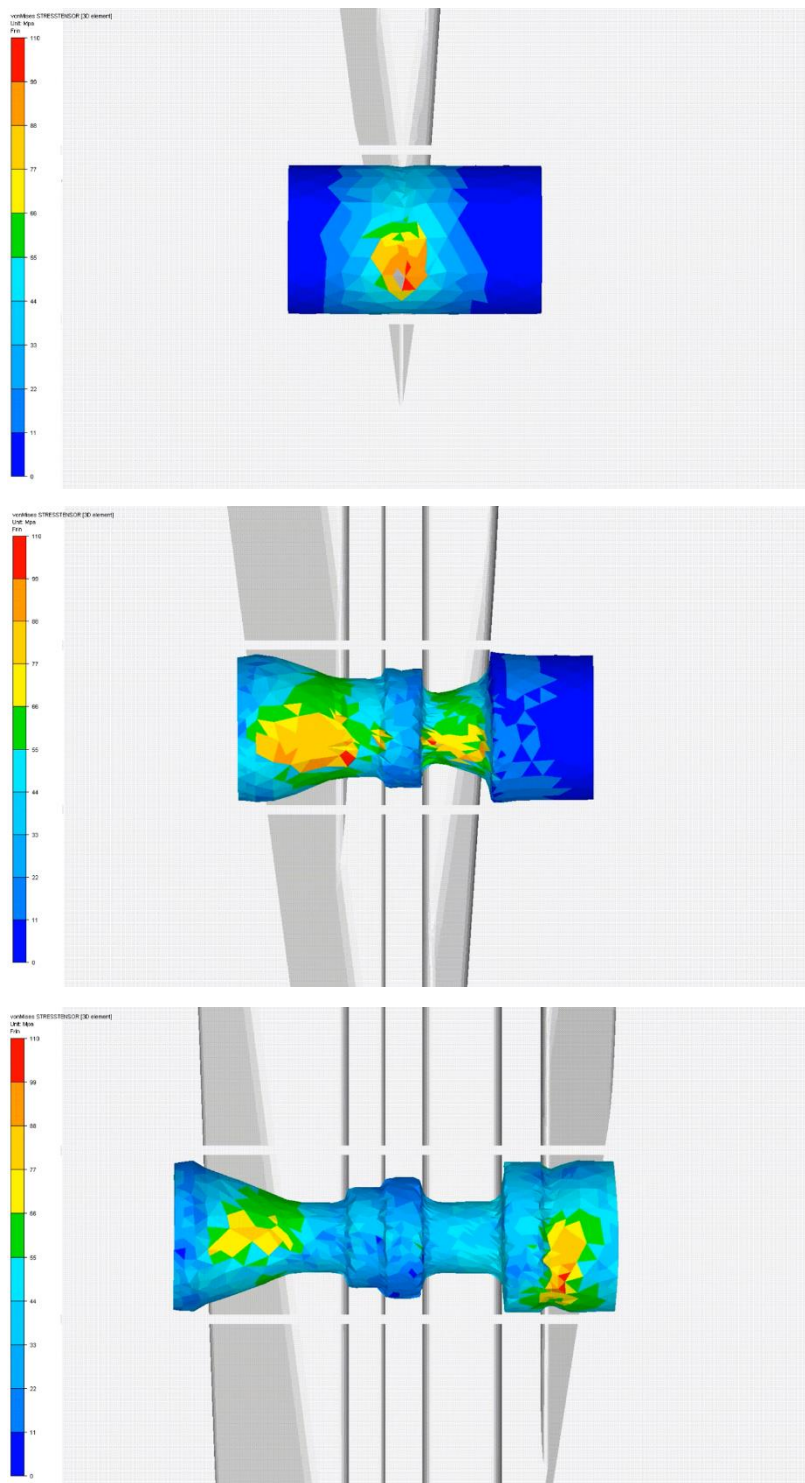


Deformace po první operaci



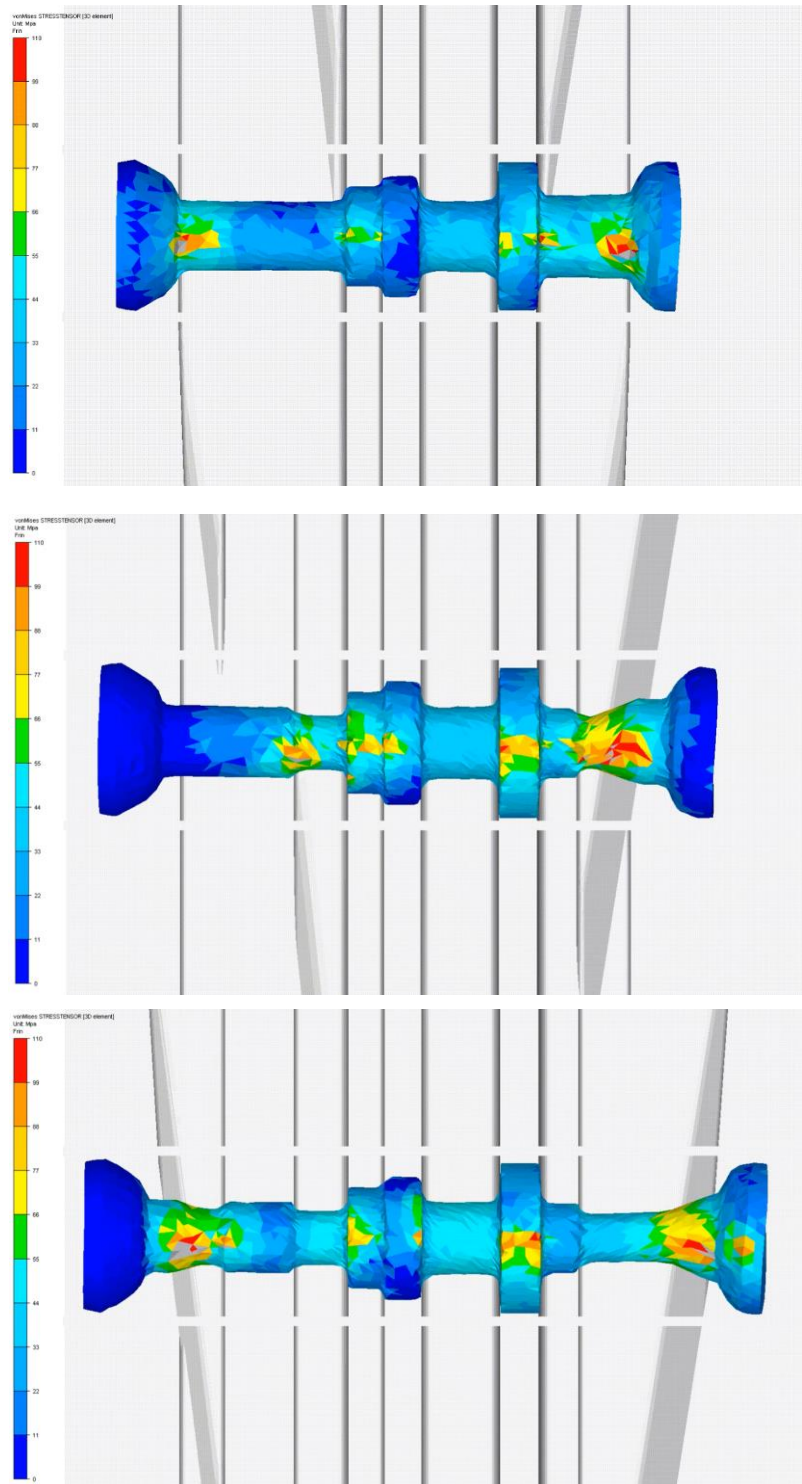
Deformace po druhé operaci

Deformace a napětí



Rozložení napětí během válcování

Deformace a napětí



Rozložení napětí během válcování