

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA STROJNÍ**



TECHNOLOGIE TVÁŘENÍ A SLÉVÁNÍ – V PŘÍKLADECH

OBJEMOVÉ TVÁŘENÍ MATERIÁLU ZASTUDENA

prof. Ing. Radek ČADA, CSc.

Ostrava 2013

© prof. Ing. Radek ČADA, CSc.

© Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-3016-2



Tento studijní materiál vznikl za finanční podpory Evropského sociálního fondu (ESF) a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu: CZ.1.07/2.2.00/15.0463, MODERNIZACE VÝUKOVÝCH MATERIÁLŮ A DIDAKTICKÝCH METOD

OBSAH

1	OBJEMOVÉ TVÁŘENÍ MATERIÁLU ZASTUDENA.....	3
1.1	Objemové tváření materiálu zastudena	5
1.2	Oceli pro objemové tváření zastudena	5
1.3	Polotovary pro objemové tváření zastudena	6
1.4	Výpočet deformací při protlačování.....	7
1.5	Zpevňování materiálu při objemovém tváření zastudena.....	8
1.6	Křivky zpevnění	9
1.7	Návrh technologického postupu výroby	10
1.7.1	Volba polotovaru a tvářecích operací s ohledem na průběh zpevnění.....	11
1.7.2	Návrh technologického postupu výroby pouzdra kalíškového tvaru	13
1.8	Jakost povrchu protlačků.....	16
1.9	Rozměrová přesnost protlačků	16
1.10	Nástroje pro objemové tváření zastudena	17
1.11	Výpočet tvářecí síly a práce.....	18
2	K JAKÝM ZKUŠEBNÍM OTÁZKÁM SE TATO PŘEDNÁŠKA VZTAHUJE:	21
3	DOPLŇUJÍCÍ ZDROJE – KNIHY, INTERNET, ...	22
4	POUŽITÁ LITERATURA.....	23



1 OBJEMOVÉ TVÁŘENÍ MATERIÁLU ZASTUDENA



STRUČNÝ OBSAH PŘEDNÁŠKY:

Oceli pro objemové tváření zastudena
Polotovary pro objemové tváření zastudena
Výpočet deformací při protlačování
Zpevňování materiálu při objemovém tváření zastudena
Křivky zpevnění
Návrh technologického postupu výroby
Volba polotovaru a tvářecích operací s ohledem na průběh zpevnění
Návrh technologického postupu výroby pouzdra kalíškového tvaru
Jakost povrchu protlačků
Rozměrová přesnost protlačků
Nástroje pro objemové tváření zastudena
Výpočet tvářecí síly a práce



MOTIVACE:

Tato kapitola je důležitým teoretickým základem pro zpracování druhého písemného úkolu, který spočívá v návrhu technologie výroby zadaného šroubu. Základním atributem technologie objemového tváření zastudena je vznik zpevnění v procesu plastické deformace materiálu.



CÍL:

Budete umět:

- vysvětlit výhody technologie objemového tváření zastudena,
- vypočítat poměrné a logaritmické deformace polotovaru,
- zvolit vhodný materiál pro výrobu protlačku,
- stanovit tvar a rozměry polotovaru pro výrobu protlačku,
- objasnit účel a způsoby mazání polotovarů,
- vypočítat tvářecí sílu a práci při objemovém tváření zastudena,
- vysvětlit příčiny vzniku nerovných okrajů výlisků.



Získáte:

- znalosti o základních způsobech objemového tváření zastudena,
- přehled o součástech tvarově vhodných pro objemové tváření zastudena,
- informace o druzích tepelného zpracování polotovarů,
- přehled o způsobech odstranění okují,
- znalosti o způsobu stanovení počtu tvářecích operací.

Budete schopni:

- rozebrat etapy návrhu technologického postupu výroby protlačku,
- zvolit vhodné přípravné operace před objemovým tvářením zastudena,
- objasnit důvody a postup fosfátování polotovarů,
- popsat technologické zásady pro návrh protlačků a nástrojů,
- rozebrat druhy dokončování výlisků.



1.1 OBJEMOVÉ TVÁŘENÍ MATERIÁLU ZASTUDENA

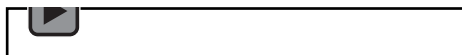
Technologie objemového tváření zastudena se používá *především pro výrobu rotačně symetrických součástí*. Tato technologie má oproti obrábění i jiným výrobním metodám, řadu výhod. Výhodami jsou velmi nízká spotřeba materiálu (minimální odpad), nízké výrobní časy, vysoká produktivita práce, nízké výrobní náklady a vysoká kvalita výrobků.

Objemové tváření zastudena je technologií, při které se podstatně mění tvar polotovaru. Pro výrobu součástí se zpravidla využívají kombinace různých základních způsobů objemového tváření zastudena (viz 2.1). V porovnání s jinými metodami tváření zastudena probíhá objemové tváření *za působení prostorové napjatosti*, které vytváří podmínky pro velké plastické deformace, aniž se porušuje soudržnost tvářeného materiálu.

Deformace je vyvolána tlakem průtlačníku a průtlačnice, přičemž v oblasti deformace dosahuje napětí přetvárného odporu. Vlastní tváření probíhá pod rekrytalizační teplotou (max. 0,3 teploty tavení materiálu), takže dochází k postupnému zpevňování výchozího materiálu. Velikost zpevnění závisí na průřezové deformaci v daném místě výlisku. Vzhledem k tomu, že deformovaný materiál má vyšší mez kluzu i mez pevnosti, lze pro daný výrobek (s požadovanými mechanickými hodnotami) použít méně hodnotný výchozí materiál, tj. materiál o nižších výchozích mechanických vlastnostech. Neméně významné jsou i metalurgické vlastnosti výrobků, např. nepřerušený průběh vláken, zvýšení meze únavy výlisků v důsledku zpevnění.

Při využití víceoperačního objemového tváření zastudena *v nástrojích na mechanických lisech nebo na speciálních víceoperačních tvářecích automatech* dochází k podstatnému zkrácení výrobní doby a ke zkvalitnění výroby.

Audio 1.1 Tváření za studena.



1.2 OCELI PRO OBJEMOVÉ TVÁŘENÍ ZASTUDENA

Požadované vlastnosti ocelí pro objemové tváření zastudena:

- stav oceli** – k protlačování je zpravidla nejvhodnější ocel *ve stavu žíhaném na měkko*.
- struktura** – ocel k protlačování má být co nejměkčí. *Struktura má být feriticko-perlitická, přičemž perlit je zcela globulární*. Vhodné struktury lze také dosáhnout kombinovaným žíháním, tj. normalizačním žíháním ke zrovnomnění zrna a následujícím žíháním na měkko k dosažení nejnižší tvrdosti a nejvyšší tvárnosti. Doporučuje se průměrná velikost zrna 5 až 8 podle ČSN 42 0463.
- mechanické vlastnosti** – co nejnižší mez kluzu, co nejvyšší tažnost, co nejvyšší kontrakce (minimálně 55 %), poměr meze kluzu k pevnosti má být v mezích 0,5 až 0,6.

Oceli pro objemové tváření zastudena mají mít pokud možno *malý sklon ke zpevnění a dostatečnou tvárnost*. Proto se většinou používají oceli nízkouhlíkové a nízkolegované. Jen ve zvláštních případech se používají pro součásti jednoduchých tvarů oceli se středním obsahem uhlíku a oceli legované. Základní druhy ocelí, používané pro součásti vyráběné objemovým tvářením, jsou uvedeny v tab. 2.2.

- chemické složení oceli** – nízký obsah uhlíku, minimální obsah fosforu a síry, minimální výskyt staženin a vycezenin, nízký obsah nekovových vměstků.



K protlačování se používá přednostně **oceli s velkou odolností proti stárnutí**. Pro nejnáročnější protlačky se používají oceli uklidněné hliníkem. Tyto oceli mají homogenní chemické složení, zaručený stupeň čistoty a vysokou tvárnost. Tepelným zpracováním před tvářením se dosáhne stálosti mechanických vlastností protlačků.

Oceli neuklidněné, např. 11 300, 11 320, 11 343, 11 373, 11 423 jsou prakticky bez Si, mají čistou povrchovou vrstvu s nízkým obsahem C, P, S ale větší množství vycezenin. Tyto oceli **nemají odolnost proti stárnutí**. Použití ocelí neuklidněných k tvářením zastudena je omezeno jen na součásti s menšími nároky na tvářitelnost a bez záruky na jejich zušlechtitelnost.

Oceli lze rozdělit podle vhodnosti k objemovému tvářením zastudena do tří skupin:

- Oceli zvlášť vhodné k tvářením** – 11 300, 11 320, 11 330, 11 343, 11 373, 12 010, 12 011, 12 013 a oceli podle zvláštních přejímacích podmínek (A6P, A9, D9, I10).
- Oceli dobře tvářitelné při běžném tepelném zpracování a povrchové úpravě** – 11 350, 11 375, 11 423, 11 425, 11 523, 12 020, 12 030, 14 120, 14 220.
- Oceli, které lze tvářet zastudena jen při pečlivém tepelném zpracování, vhodné povrchové úpravě a vhodném mazání** – 11 500, 11 600, 12 040, 12 050, 15 260, 16 220, 16 221, 17 021, 17 027, 17 115, 17 255. Tvárnost těchto ocelí je nízká, proto je třeba výrobní proces rozložit na více tvářecích operací. Měrné tlaky při tvářením zde hraničí s přípustnými tlaky na činné části protlačovacích nástrojů (max. 2500 MPa, výjimečně 2700 MPa) a ohrožují jejich hospodárnou životnost.

1.3 POLOTOVARY PRO OBJEMOVÉ TVÁŘENÍ ZASTUDENA

Při určování objemu polotovaru pro protlačování se vychází z předpokladu, že **objem tělesa zůstává konstantní**, tj. objem výchozího polotovaru se rovná objemu konečného protlačku. Výchozí objem polotovaru se určí z konečného tvaru protlačku, ve kterém jsou zahrnuty přídatky pro případné dokončení obráběním. *Tvar a rozměry výchozího polotovaru mají být co nejvíce podobné konečnému tvaru a rozměrům hotového protlačku*, avšak se zřetelem na jeho běžné normalizované rozměry (průřez tyčí, tloušťka plechu, průměr drátu).

Pro objemové tvářením zastudena se používají následující polotovary:

- plné špalíky kruhového i jiného průřezu** (jejich výška je větší než polovina průměru nebo vnějšího rozměru). Tyto polotovary se získávají z drátu, tažených tyčí, válcovaných tyčí apod. Výchozí polotovary, tj. dráty nebo tyče, je nutno ve většině případů upravit rovnáním (na speciálních rovnačkách nebo rovnacích lisech), odstranit povrchové vady (broušením, loupáním, leštěním) a dělit na žádané rozměry (stříháním, upichováním, řezáním).
- kaloty kruhového, čtvercového i jiného průřezu** (jejich výška je menší než polovina vnějšího průměru nebo rozměru). Tyto polotovary jsou získávány z plechů nebo pásů vystřihováním.
- špalíky s průchozím otvorem** (jejich výška je větší než polovina vnějšího průměru). Tyto polotovary se získávají ze silnostěnných bezešvých trubek upichováním, řezáním nebo stříháním.
- prstence kruhového, obdélníkového, oválného i jiného průřezu**. Tyto polotovary jsou získávány z tažených drátů různých průřezů stříháním, svinutím, případně svařením.

Špalíky, získané stříháním, je nutno obvykle dále upravit pýchováním (odstranění nerovnoběžnosti čel, zaoblení spodní hrany špalíku, popřípadě přizpůsobení čela špalíku čelu průtláčnicku pro zpětné protlačování).



Špalíky, získané řezáním na pilách, je obvykle nutno upravit obroušením nedoříznutého otřepu a odjehlením ostrých hran (v omílacím bubnu).



Audio 1.2 Druhý polotovár.



1.4 VÝPOČET DEFORMACÍ PŘI PROTLAČOVÁNÍ

Při protlačování se rozměry protlačovaného tělesa (polotovaru nebo protlačku) mění. K matematickému vyjádření této změny se užívá dvou veličin – ***poměrné deformace a logaritmické deformace***. Při zvětšování rozměrů (průřezu) je poměrná deformace i logaritmická deformace kladná, při zmenšování průřezu jsou obě veličiny záporné. *Pro zjednodušení se používá absolutních hodnot.*

Je výhodnější používat logaritmické deformace, protože je možno sčítat několik po sobě následujících deformací při postupných změnách rozměrů tvářených výlisků (výroba protlačku několika protlačovacími operacemi bez mezioperačního žíhání), což nelze při použití veličiny poměrné deformace.

Výpočty poměrných a logaritmických deformací těles kruhových průřezů:

a) ***pěchování plného tělesa*** (obr. 2.1 a)

Poměrná průřezová deformace:

$$\varepsilon_S = \frac{S_1 - S_0}{S_1} \cdot 100 = \frac{D_1^2 - D_0^2}{D_1^2} \cdot 100 \quad (\%). \quad (2.1)$$

Logaritmická průřezová deformace:

$$\varphi_S = \ln \frac{S_1}{S_0} = \ln \frac{D_1^2}{D_0^2} \quad (-). \quad (2.2)$$

Poměrná délková deformace:

$$\varepsilon_l = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad (\%). \quad (2.3)$$

Logaritmická délková deformace:

$$\varphi_l = \ln \frac{l_0}{l_1} \quad (-). \quad (2.4)$$

b) ***dopředné protlačování plného tělesa*** (obr. 2.1 b)

Poměrná průřezová deformace:

$$\varepsilon_S = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \cdot 100 = \frac{D_0^2 - D_1^2}{D_0^2} \cdot 100 \quad (\%). \quad (2.5)$$

Logaritmická průřezová deformace:

$$\varphi_S = \ln \frac{S_0}{S_1} = \ln \frac{D_0^2}{D_1^2} \quad (-). \quad (2.6)$$

c) ***dopředné protlačování dutého tělesa*** (obr. 2.1 c)

Poměrná průřezová deformace:



$$\varepsilon_S = \frac{S_0 - S_1}{S_0 - S_2} \cdot 100 = \frac{D_0^2 - D_1^2}{D_0^2 - D_2^2} \cdot 100 \quad (\%). \quad (2.7)$$

Logaritmická průřezová deformace:

$$\varphi_S = \ln \frac{S_0 - S_2}{S_1 - S_2} = \ln \frac{D_0^2 - D_2^2}{D_1^2 - D_2^2} \quad (-). \quad (2.8)$$

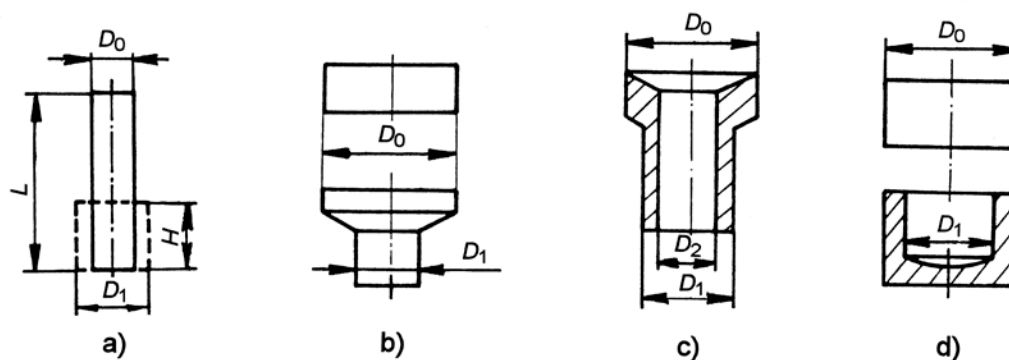
d) **zpětné protlačování** (obr. 2.1 d)

Poměrná průřezová deformace:

$$\varepsilon_S = \frac{S_1}{S_0} \cdot 100 = \frac{D_1^2}{D_0^2} \cdot 100 \quad (\%). \quad (2.9)$$

Logaritmická průřezová deformace:

$$\varphi_S = \ln \frac{S_0}{S_1} = \ln \frac{D_0^2}{D_1^2} \quad (-). \quad (2.10)$$



Obr. 2.1 Schémata pro výpočet poměrné a logaritmické průřezové deformace (a – přechování plného tělesa, b – dopředné protlačování plného tělesa, c – dopředné protlačování dutého tělesa, d – zpětné protlačování)

Vzájemný poměr logaritmické a poměrné průřezové deformace je dán vztahem:

$$\varphi_S = \ln \frac{100}{100 - \varepsilon_S} \quad (-). \quad (2.11)$$

1.5 ZPEVNŮVÁNÍ MATERIÁLU PŘI OBJEMOVÉM TVÁŘENÍ ZASTUDENA

Tvářením zastudena se mění mechanické vlastnosti ocelí, vlivem zpevnění vzrůstá mez kluzu. *Velikost zpevnění je závislá na velikosti deformace.*

Zpevnění je provázáno i zvýšením tvrdosti. Tažnost materiálu při jeho zpevňování klesá a současně se snižuje i jeho houževnatost. Naproti tomu však i přes zmenšování tažnosti se u většiny ocelí zvyšuje mez únavy.

Zpevňování se projevuje u všech tvárných kovů, ale v rozdílné míře, která závisí na chemickém složení materiálu, odlišné stavbě krystalových mřížek a na způsobu tváření. Při tváření zastudena se zrna kovu prodlužují ve směru tváření a tím **dochází v protlačku ke vzniku textury.**

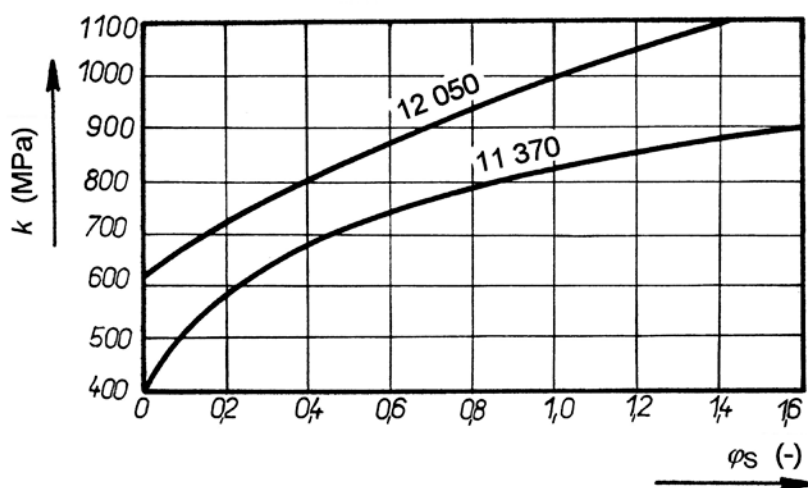


Povrchové vrstvy materiálu se zpevňují více než vrstvy vnitřní, protože deformace není vlivem nerovnoměrné napjatosti v celém průřezu rovnoměrná. Rozdíly ve zpevnění rostou s velikostí průřezu a stupněm deformace, takže tváření větších průřezů zastudena je obtížné jak z hlediska potřebných tvářecích sil, tak z hlediska dosažení rovnoměrného zpevnění v celém průřezu. Proto se tvářením zastudena zpracovávají převážně jen menší průřezy (do průměru cca 50 mm).

1.6 KŘIVKY ZPEVNĚNÍ

Pro praktické využití zpevňování kovů při návrzích technologických postupů objemového tváření se sestavují pro jednotlivé materiály, teploty tváření a deformační rychlosti diagramy zpevnění, nazývané **křivky zpevnění**. Vyjadřují graficky závislost zpevňování materiálu na deformaci.

Na obr. 2.11 jsou uvedeny křivky zpevnění ocelí 11 370 a 12 050 při jejich protlačování. Uvedené křivky byly zjištěny při klasických tvářecích rychlostech na mechanických lisech.



Obr. 2.2 Křivky zpevnění ocelí 11 341 a 12 040 při jejich protlačování

Při výrobě protlačku několika tvářecími operacemi (bez mezioperačního žíhání) se zpevnění získaná jednotlivými tvářecími operacemi sčítají, na což je nutno brát zřetel při výpočtu velikosti deformační síly pro jednotlivé operace. Zpevnění je možno odstranit tepelným zpracováním (žíháním).

Důležitým předpokladem určení konečného zpevnění protlačku, které se stanoví jako součet dílčích zpevnění, je znalost křivek zpevnění pro různé způsoby tváření a jejich kombinace. Podmínkou pro přípustnost prostého součtu dílčích zpevnění je, aby deformace probíhala stále buď tahem, nebo tlakem. Kombinují-li se totiž způsoby tváření, např. tažení a pýchování, dochází v průběhu druhého způsobu tváření zpravidla nejprve k poklesu předchozího zpevnění a teprve potom nastává další zpevňování.

Pro úsporu vyhodnocování zdlouhavých zkoušek pýchováním se mohou křivky zpevnění přibližně sestavit z diagramů zkoušky tahem (jejich aproximací). Tento způsob je vhodný pro předběžné posouzení technologických postupů objemového tváření zastudena.

Pokud pro materiál protlačku existuje **křivka zpevnění**, lze z ní pro každou logaritmickou průřezovou deformaci odečíst hodnotu zpevnění. Z průběhu logaritmické průřezové



deformace po délce součásti lze tímto způsobem sestrojit *průběh zpevnění po délce součásti*, který má význam pro výsledné vlastnosti součásti (ovlivňuje např. mez únavy součásti).

1.7 NÁVRH TECHNOLOGICKÉHO POSTUPU VÝROBY

Správný návrh technologického postupu výroby by měl zajistit: maximální využití materiálu, snížení pracnosti, dodržení předepsaných rozměrů, požadovaných mechanických vlastností, jakosti povrchu, dosažení maximální životnosti tvářecích nástrojů a ekonomické výroby součásti.

Počet tvářecích operací je závislý na konečném tvaru protlačku a přípustné deformaci pro stanovenou protlačovací operaci vzhledem k druhu tvářené oceli. Použije-li se polotovar dělený stříháním, předchází zpravidla protlačovací operaci pěchování k zarovnání čel, popřípadě přizpůsobení tvaru i rozměrů polotovaru další protlačovací operaci. Sled protlačovacích operací bývá kombinován nebo ukončen jinými tvářecími operacemi, jako např. tažení, redukování, ostřihování, pěchování a jiné, přičemž tyto operace mohou být buď samostatné nebo sdružené.

Z rozměrů polotovaru a konečného protlačku se vypočte **celková poměrná nebo logaritmická deformace**. Překročí-li vypočtené hodnoty přípustné meze s ohledem na způsob protlačování a druh oceli, zvýší se počet tvářecích operací. Je-li vyčerpána tvárnost materiálu, je nutno zařadit před další tvářecí operaci tepelné zpracování a tím odstranit zpevnění.

Pro obnovení plastických vlastností materiálu je třeba použít **rekrytalizační žíhání**, při kterém narostou nová polygonální nedeformovaná zrna kovu.

Hodnoty přípustných poměrných a logaritmických deformací, které lze dosáhnout jednou tvářecí operací při různých způsobech protlačování jsou uvedeny v tab. 2.1, přičemž dolní meze platí pro oceli tvrdší (s vyšším obsahem uhlíku nebo legur), horní meze pro oceli měkčí (s nižším obsahem uhlíku).

Tab. 2.1 Hodnoty přípustných poměrných a logaritmických průřezových deformací oceli, které lze dosáhnout jednou tvářecí operací

Způsob objemového tváření zastudena	Skupina ocelí (viz 2.4)	Přípustné deformace	
		ε_S (%)	φ_S (–)
Zpětné protlačování klasické, tj. dutého kalíšku (obr. 2.1 a)	A	30 ÷ 70	0,36 ÷ 1,20
	B	30 ÷ 60	0,36 ÷ 0,92
	C	30 ÷ 50	0,36 ÷ 0,59
Zpětné protlačování výčnělku (obr. 2.1 b)	A	30 ÷ 75	0,36 ÷ 1,39
	B	30 ÷ 65	0,36 ÷ 1,05
	C	30 ÷ 50	0,36 ÷ 0,59
Dopředné protlačování klasické, uzavřené (obr. 2.2 a)	A	70 ÷ 75	1,20 ÷ 1,39
	B	60 ÷ 65	0,92 ÷ 1,05
	C	30 ÷ 40	0,36 ÷ 0,51
Dopředné protlačování prstence s průchozím otvorem, uzavřené	A	65 ÷ 80	1,05 ÷ 1,61
	B	50 ÷ 60	0,69 ÷ 0,92
	C	30 ÷ 40	0,36 ÷ 0,51
Dopředné protlačování volné	A, B, C	5 ÷ 30	0,05 ÷ 0,36
Pěchování mezi deskami	A	75 ÷ 80	1,39 ÷ 1,61
	B, C	50 ÷ 70	0,69 ÷ 1,20



Pěchování	A	80 ÷ 90	1,61 ÷ 2,30
ostatní	B, C	60 ÷ 80	0,92 ÷ 1,61

U víceoperačního tváření je možno sčítáním logaritmických průřezových deformací, dosahovaných v jednotlivých operacích, určit celkovou logaritmickou průřezovou deformaci a z ní následně pro daný výlisek a daný materiál stanovit podle křivek zpevnění celkové zpevnění výlisku.

Při návrhu technologického postupu je nutno počítat se snadným zasouváním jednotlivých polotovarů do následujících průtlačnic. Vůle se volí dle zkušeností a počítá se zpětně od konečného výlisku k výchozímu polotovaru. Rozměry polotovarů v každé jednotlivé tvářecí operaci je nutno stanovit na základě zákona stálosti objemu výlisku.



Audio 1.3 Počet tvářecích operací.



1.7.1 Volba polotovaru a tvářecích operací s ohledem na průběh zpevnění

Na uvedeném příkladu se nejlépe objasní možnosti volby polotovaru a tvářecích operací s ohledem na průběh zpevnění po délce hotového výlisku.

Na obr. 2.3 je znázorněn typický tvar součásti – **jednoduchý čep**, který je možno zhotovit dopředným protlačováním nebo pěchováním, případně kombinací obou těchto způsobů.

Výpočet objemu výlisku čepu:

$$V = \frac{\rho \cdot D_1^2}{4} \cdot l_1 + \frac{\rho \cdot D_2^2}{4} \cdot l_2 = \frac{\rho \cdot 13^2}{4} \cdot 10 + \frac{\rho \cdot 10^2}{4} \cdot 30 = 3683,52 \text{ mm}^3.$$

Varianty polotovaru a tvářecích operací pro zhotovení výlisku čepu dle obr. 2.3:

a) **zhotovení součásti dopředným protlačováním** (obr. 2.3 a)

Výchozí polotovar bude mít průměr, odpovídající průměru hlavy, tj. $D_1 = 13 \text{ mm}$. Délka ústřížku $L_1 = 27,75 \text{ mm}$. Logaritmická průřezová deformace dříku φ_{sd} :

$$\varphi_{sd} = \ln \frac{D_2^2}{D_1^2} = \ln \frac{10^2}{13^2} = -0,52.$$

b) **zhotovení součásti pěchováním** (obr. 2.3 b)

Výchozí polotovar bude mít průměr, odpovídající průměru dříku, tj. $D_2 = 10 \text{ mm}$. Délka ústřížku $L_2 = 46,9 \text{ mm}$. Logaritmická průřezová deformace hlavy φ_{sh} :

$$\varphi_{sh} = \ln \frac{D_1^2}{D_2^2} = \ln \frac{13^2}{10^2} = 0,52.$$

c) **zhotovení součásti kombinací obou předchozích způsobů** (obr. 2.3 c)

Průměr výchozího polotovaru se volí $D_3 = 12 \text{ mm}$. Technologický postup je zvolen tak, že ústřížek je nejdříve napěchován na požadovaný průměr hlavy a průměr dříku je následně získán dopředným protlačením. Délka ústřížku $L_3 = 32,57 \text{ mm}$. Logaritmická průřezová deformace hlavy φ_{sh} :

$$\varphi_{sh} = \ln \frac{D_1^2}{D_3^2} = \ln \frac{13^2}{12^2} = 0,16.$$

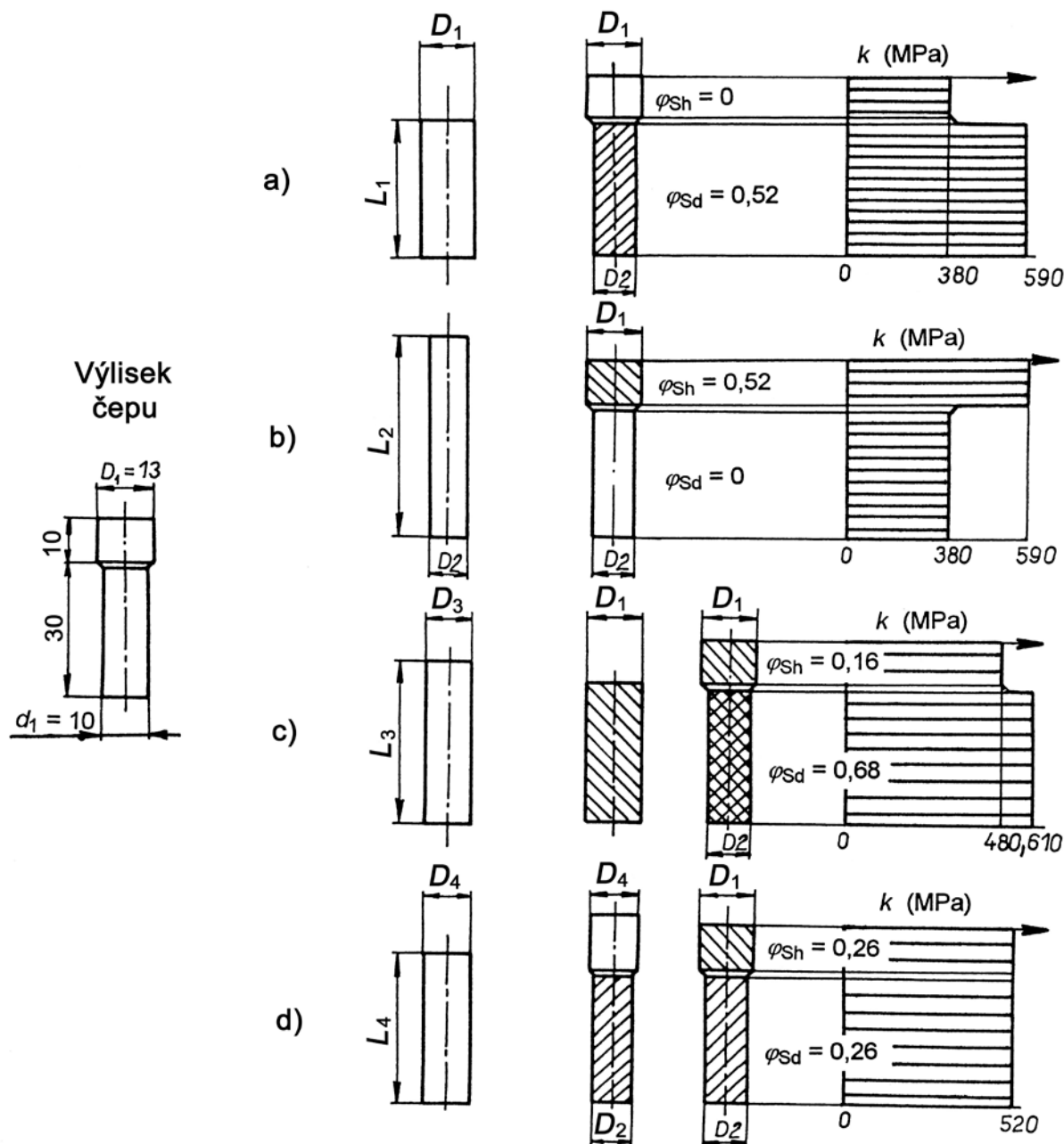
Logaritmická průřezová deformace dříku φ_{sd} :



$$\varphi_{Sd} = \ln \frac{D_2^2}{D_3^2} = \ln \frac{10^2}{13^2} = -0,52.$$

Celková deformace dříku je rovna součtu absolutních hodnot dílčích logaritmických průřezových deformací:

$$\varphi_{Sc} = |\varphi_{Sh}| + |\varphi_{Sd}| = 0,16 + 0,52 = 0,68.$$



Obr. 2.3 Průběhy zpevnění po délce výlisku, zhotoveného různými technologickými postupy
 (a – zhotovení součásti dopředným protlačováním, b – zhotovení součásti pýchováním,
 c – zhotovení součásti kombinací dopředného protlačování a pýchování,
 d – zhotovení součásti tak, aby zpevnění hlavy i dříku bylo stejné)

d) *zhotovení součásti tak, aby zpevnění hlavy i dříku bylo stejné* (obr. 2.3 d)

V tomto případě je třeba stanovit průměr výchozího polotovaru D_4 výpočtem.

Logaritmická průřezová deformace hlavy:



$$\varphi_{Sh} = \ln \frac{D_1^2}{D_4^2} \quad (-). \quad (2.12)$$

Logaritmická průřezová deformace dříku:

$$\varphi_{Sd} = -\ln \frac{D_2^2}{D_4^2} \quad (-). \quad (2.13)$$

Podmínka rovnosti logaritmických průřezových deformací a tím i velikosti zpevnění:

$$\varphi_{Sh} = \varphi_{Sd}; \quad \ln \frac{D_1^2}{D_4^2} = -\ln \frac{D_2^2}{D_4^2} = \ln \frac{D_4^2}{D_2^2} \quad (-). \quad (2.14)$$

Z rovnosti logaritmů plyne vztah pro výpočet průměru polotovaru:

$$D_4 = \sqrt{D_1 \cdot D_2} = \sqrt{10 \cdot 13} = 114 \text{ mm} . \quad (2.15)$$

Velikosti logaritmických průřezových deformací při použití polotovaru o průměru D_4 :

$$\varphi_{Sh} = \ln \frac{D_1^2}{D_4^2} = 0,26 ; \quad \varphi_{Sd} = -\ln \frac{D_2^2}{D_4^2} = -0,26 ; \quad |\varphi_{Sh}| = |\varphi_{Sd}| = 0,26 .$$

Velikosti zpevnění dříku a hlavy součásti, vyrobené výše uvedenými způsoby, lze odečíst podle vypočtených logaritmických průřezových deformací z křivky zpevnění tvářeného materiálu (obr. 2.11).

1.7.2 Návrh technologického postupu výroby pouzdra kalíškového tvaru

Na obr. 2.18 je pouzdro, vyráběné původně z oceli 11 500 soustružením. Nyní je určeno k výrobě objemovým tvářením zastudena. Je třeba navrhnout takový technologický postup, který by umožnil výrobu pouzder s dodržení minimální pevnosti v tahu $R_m = 550 \div 600 \text{ MPa}$ bez mezioperačního žíhání a povrchové úpravy mezi jednotlivými tvářecími operacemi.

Podle křivky zpevnění (obr. 2.11) lze požadované pevnosti dosáhnout tvářením zastudena materiálu 11 341, a to dodržení logaritmické průřezové deformace $\varphi_s = 0,4$ až $0,6$. Součást svým tvarem a rozměry vyhovuje technologii objemového tváření zastudena, přičemž není třeba žádných dodatečných konstrukčních úprav. Pouze otvor $\varnothing 6 \text{ mm}$ bude vrtán a průměr 21 e7 dokončen broušením.

Výpočet průměru výchozího polotovaru je proveden na základě požadavku, aby logaritmické průřezové deformace stopky φ_{Ss} i kalíšku φ_{Sk} byly stejné (příruba o rozměrech $D_4 = 24 \text{ mm}$, $h = 3 \text{ mm}$ je při tomto výpočtu zanedbána).

Logaritmická průřezová deformace stopky:

$$\varphi_{Ss} = \varphi_{S1} + |\varphi_{S2}| + |\varphi_{S3}| = \ln \frac{D_5^2}{D_1^2} + \left| \ln \frac{D_6^2}{D_5^2} \right| + \left| \ln \frac{D_3^2}{D_6^2} \right| = \left| \ln \frac{D_3^2}{D_1^2} \right| = \ln \frac{D_1^2}{D_3^2} , \quad (2.16)$$

kde je:

D_5 – průměr ústřížku po kalibraci (mm),

D_1 – průměr výchozího polotovaru (mm),

D_6 – průměr dříku po dopředném protlačení (mm),



- D_3 – průměr stopky dokončeného výlisku (mm),
 D_2 – vnější průměr kalíšku dokončeného výlisku (mm),
 d_1 – vnitřní průměr kalíšku dokončeného výlisku (mm).

Logaritmická průřezová deformace kalíšku:

$$\varphi_{Sk} = \varphi_{S1} + \varphi_{S4} + \varphi_{S5} = \ln \frac{D_5^2}{D_1^2} + \ln \frac{D_2^2}{D_5^2} + \ln \frac{D_2^2}{D_2^2 - d_1^2} = \ln \frac{D_2^4}{D_1^2 \cdot (D_2^2 - d_1^2)}. \quad (2.17)$$

Podmínka rovnosti logaritmických průřezových deformací a tím i velikosti zpevnění:

$$\varphi_{Ss} = \varphi_{Sk}; \quad \ln \frac{D_1^2}{D_3^2} = \ln \frac{D_2^4}{D_1^2 \cdot (D_2^2 - d_1^2)} \quad (-). \quad (2.18)$$

Z rovnosti logaritmů plyne vztah pro výpočet průměru výchozího polotovaru:

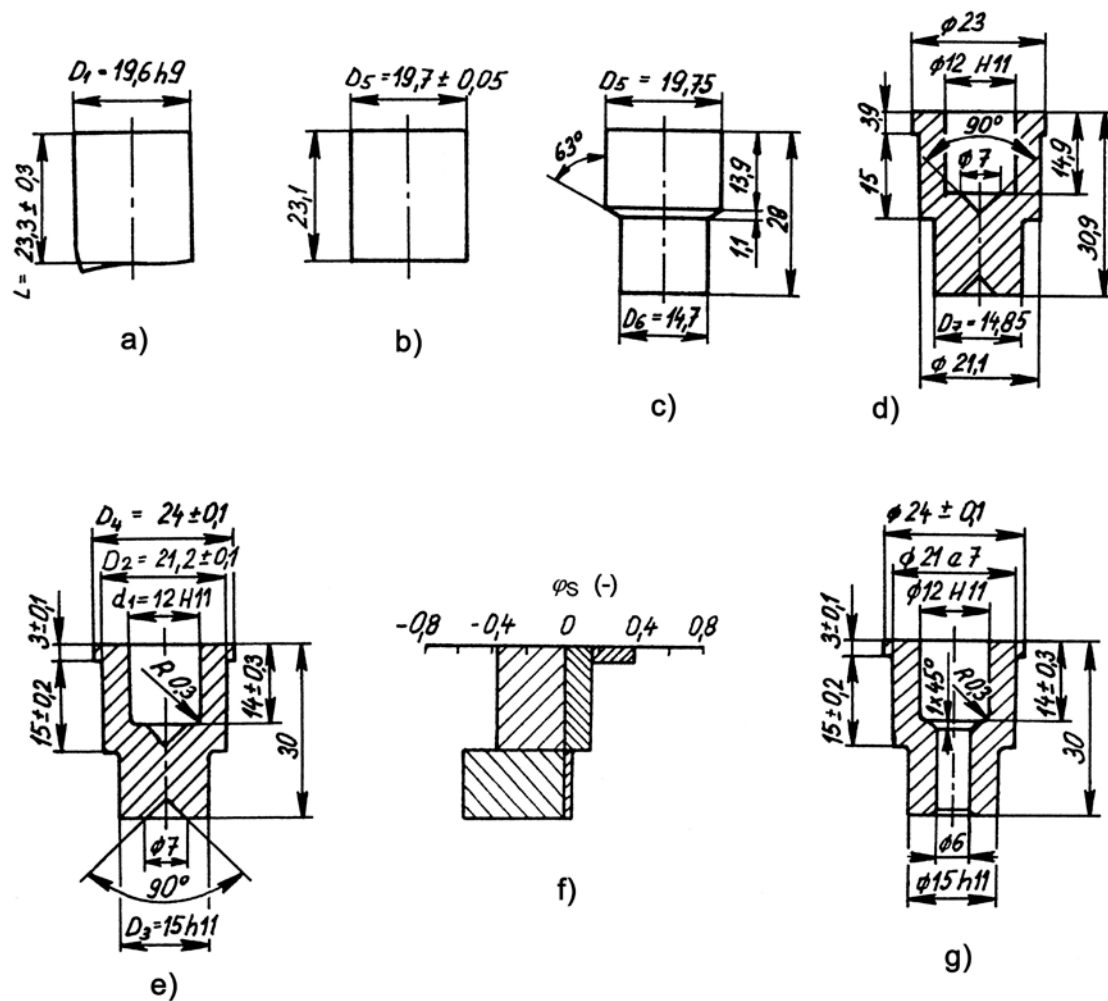
$$D_1 = D_2 \cdot \frac{\sqrt{D_3}}{\sqrt[4]{D_2^2 - d_1^2}} \quad (\text{mm}). \quad (2.19)$$

Délka polotovaru L se vypočte ze zákona stálosti objemu V tvářené součásti:

$$L = \frac{4 V}{p \cdot D_1^2} \quad (\text{mm}). \quad (2.20)$$

Technologický postup výroby výlisku je znázorněn na obr. 2.4. Délka polotovaru $L > d$, proto se může použít pro přípravu špalíků stříhání. Po ustřižení se doporučuje ústřížky kalibrovat. Po vyžihání na měkko a fosfátování povrchu je polotovar připraven pro tvářecí operace.





Obr. 2.4 Technologický postup výroby pouzdra (a – ústřížek, b – kalibrace ústřížku, c – dopředné protlačování dříku, d – zpětné protlačování kalíškového tvaru, e – přechování příruby a celková kalibrace na konečný tvar, f – průběh logaritmické průřezové deformace, g – hotový výrobek po obrobení)

Logaritmická průřezová deformace přírubové části:

$$\varphi_{Sp} = \varphi_{Sk} + \varphi_{S6} = \ln \frac{D_2^4}{D_1^2 \cdot (D_2^2 - d_1^2)} + \ln \frac{D_4^2}{D_2^2} \quad (-), \quad (2.21)$$

Kde je

D_2 – vnější průměr kalíšku dokončeného výlisku (mm),

D_1 – průměr výchozího polotovaru (mm),

d_1 – vnitřní průměr kalíšku dokončeného výlisku (mm),

D_4 – průměr příruby dokončeného výlisku (mm).

Zpevnění v jednotlivých částech výlisku lze odečíst podle příslušných logaritmických průřezových deformací z křivky zpevnění pro použitý materiál 11 341.

1.8 JAKOST POVRCHU PROTLAČKŮ

Objemovým tvářením zastudena se dosahuje jakostního povrchu součástí, který se vyrovná broušenému. Velmi záleží na pečlivé povrchové úpravě polotovarů před tvářením (moření, fosfátování, mazání). Na jakost povrchu protlačků má vliv i kvalita střižné plochy kalot, zejména z velmi měkkých kovů.

Rozhodujícím činitelem jsou však činné části nástrojů, které přicházejí do styku s tvářeným materiálem. Pracovní plochy nástrojů pro tváření ocelí se brousí na drsnost povrchu $R_a = 0,2 \mu\text{m}$, následně se vysoce leští, výjimečně i lapují. Proto protlačky vynikají jakostním hladkým povrchem, odolným proti otěru.

1.9 ROZMĚROVÁ PŘESNOST PROTLAČKŮ

Součásti, vyrobené objemovým tvářením zastudena se vyznačují vysokou přesností. Rozsah dosažené tolerance rozměru závisí na opotřebením činných částí nástroje. **U protlačků z ocelí se dosahuje tolerancí rozměrů, odpovídajícím stupňům přesnosti IT 7 až IT 8.**

Zařadí-li se do technologického postupu výroby ještě *další kalibrovací operace*, zlepší se přesnost výrobků o jeden stupeň základní tolerance. Tímto způsobem lze dodržet i velmi úzké tolerance při hospodárné životnosti nástrojů ve velkosériové výrobě.

Aby se dosáhlo maximálního počtu protlačků s rozměry v hranicích dovolené tolerance, je třeba při určování rozměru pracovní části nástroje počítat i **s nepatrným zvětšením rozměrů tvářené součásti vlivem pružné deformace**, jakmile opustí redukční oblast v nástroji. Při protlačování naroste vnější rozměr výlisku o několik setin až desetin milimetru, rozměry protlačené dutiny ve výlisku se naopak zmenší. Velikost odpružení závisí na mechanických vlastnostech tvářeného materiálu, rovnoměrnosti struktury a stupni deformace. Zjišťuje se praktickou zkouškou.

Nová průtlačnice by měla mít jmenovitý rozměr, odpovídající spodní hranici tolerance, zmenšený o hodnotu odpružení, aby vzniklý protlaček měl minimální rozměr a celý rozsah tolerance se tak využil na opotřebením průtlačnice.

Při protlačování dutiny by měl mít nový průtlačník jmenovitý rozměr, odpovídající maximální hodnotě přípustné tolerance, zvětšený ještě o hodnotu napružení.



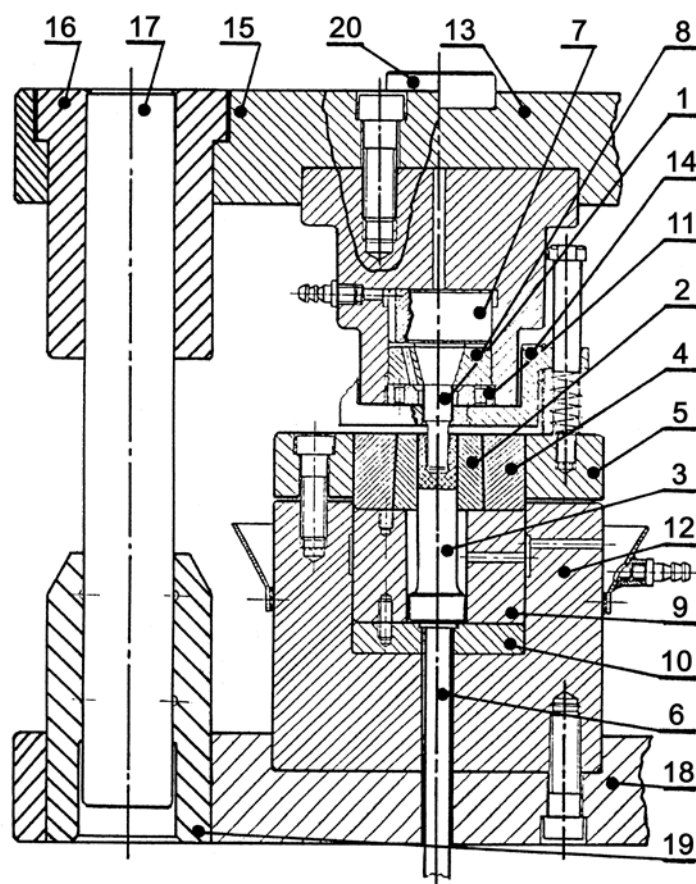
1.10 NÁSTROJE PRO OBJEMOVÉ TVÁŘENÍ ZASTUDENA

Nástroje jsou většinou konstruovány do typizovaných upínacích částí – horní (průtlačníkové) a dolní (průtlačnicové). Nástroje pro zpětné protlačování se vždy skládají z průtlačníku, průtlačnice a stírače. Pro dopředné protlačování je stírač většinou nahrazen vyhazovačem.

Činné části nástrojů vyžadují přesné a **tuhé provedení** a **dokonalé vedení**, čímž se zabrání nízké kvalitě protlačků a nadměrnému zatížení průtlačníku vlivem ohybových sil, vznikajícím rozdílným přetvárným odporem po obvodu protlačované součásti. Nástroje jsou proto opatřeny samostatným vedením, zpravidla se dvěma vodicími sloupky.

Funkční části nástroje, tj. průtlačník a složená průtlačnice, včetně jejich opěrných a upínacích částí, **jsou vyměnitelné**. Průtlačník je zakončen kuželovou hlavou, sloužící pro zvětšení dosedací plochy a pro středění průtlačníku v horní části nástroje. Průtlačnice je sevřena jednou nebo několika nalisovanými zděři.

Na obr. 2.5 je nakreslen nástroj pro zpětné protlačování součástí tvaru kalíšků, u kterého je středění zajištěno čtyřmi vodicími sloupky.



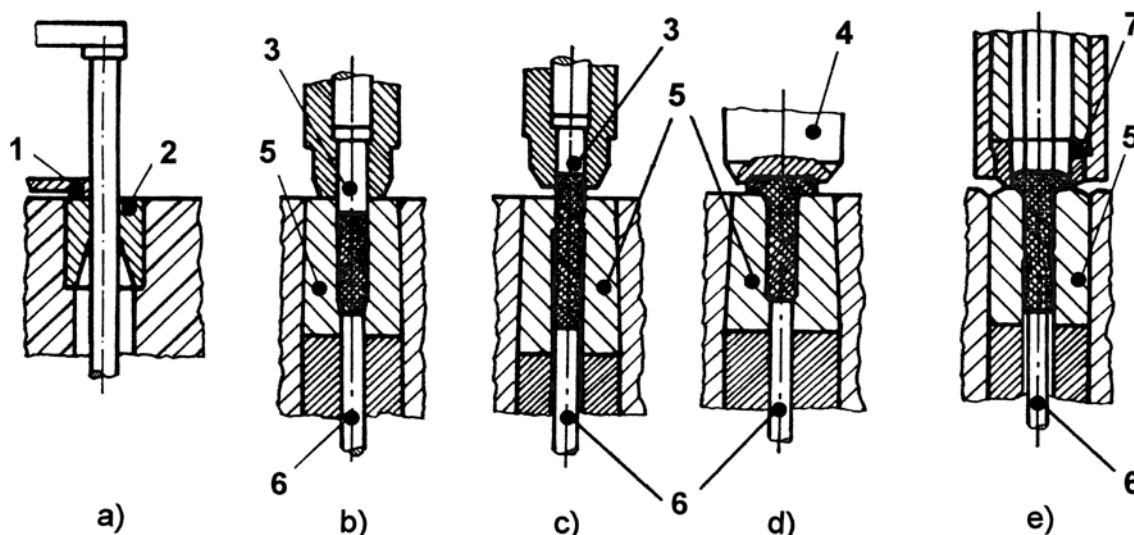
Obr. 2.5 Nástroj pro zpětné protlačování se čtyřmi vodicími sloupky (1 – průtlačník, 2 – průtlačnice, 3 – vyhazovač, 4 – zděř vnitřní, 5 – zděř vnější, 6 – vyhazovací kolík, 7 – podložka, 8 – sedlo, 9 – podložka, 10 – vložka, 11 – matice, 12 – těleso, 13 – těleso, 14 – stírač, 15 – deska horní, 16 – pouzdro, 17 – vodicí sloupek, 18 – deska dolní, 19 – vodicí pouzdro, 20 – středící vložka)

Při hromadné a velkosériové výrobě šroubů a podobných čepovitých součástí se používají **víceoperační tvářecí automaty**. Kromě ustřížení materiálu provádí ještě dvě až šest tvářecích operací. Tvářecí nástroje pro postupové (víceoperační) tvářecí automaty se sestavují do **bloků**.



Před blokem průtlačnic se pohybuje *přenášeční zařízení*, které dopravuje mechanicky ovládanými kleštinami polotovary z jedné průtlačnice do druhé.

Schéma čtyřoperačního tvářecího automatu pro výrobu výlisku šroubu je znázorněno na obr. 2.6. Polotovary výlisku je po každém zdvihu beranu vytlačeny z průtlačnice a přeneseny do další tvářecí operace.



Obr. 2.6 Schéma čtyřoperačního tvářecího automatu pro výrobu výlisku šroubu (1 – plochý nůž, 2 – střižnice, tj. kruhový nůž, 3 – průtlačník, 4 – lisovnick, 5 – průtlačnice, 6 – vyhazovací jehly, 7 – ostříhovací lisovnick)

1.11 VÝPOČET TVÁŘECÍ SÍLY A PRÁCE

Výpočty tvářecích sil při různých způsobech objemového tváření zastudena jsou uvedeny v ČSN 22 7005.

Tvářecí síla, potřebná k dimenzování nástrojů a kontrole jmenovité síly zvoleného lisu, se vypočítá ze vztahu:

$$F = k_{ps} \cdot S \quad (\text{N}), \quad (2.22)$$

kde je

S – průřez činné části průtlačníku (mm^2),

k_{ps} – střední přetvárný odpor materiálu (MPa).

Aby nenastalo porušení činných částí nástroje (průtlačníku, průtlačnice apod.) nesmí hodnota středního přetvárného odporu k_{ps} překročit dovolené namáhání v tlaku materiálu činných částí ($k_{ps} = \text{max. } 1800 \text{ až } 2200 \text{ MPa}$, výjimečně 2700 MPa).

V oblasti výpočtu tvářecích sil při objemovém tváření zastudena byly pro inženýrskou praxi odvozeny **vzorce pro stanovení středního přetvárného odporu**, které respektují tření, rozměry výlisku a jeho geometrický tvar:

a) **střední přetvárný odpor při pěchování hranolu:**

$$k_{ps} = k_s \cdot \left(1 + \mu \frac{b}{H} \right) \quad (\text{MPa}), \quad (2.23)$$



kde je:

- k_S – střední přirozený přetvárný odpor materiálu (MPa),
- b – šířka pěchovaného hranolu (mm),
- H – výška pěchovaného hranolu (mm),
- μ – součinitel smykového tření (–); $\mu = 0,3$ pro hrubší povrch a horší mazání, $\mu = 0,15$ pro broušený povrch a dobré mazání, $\mu = 0,1$ pro fosfátovaný povrch dobře mazaný.

b) **střední přetvárný odpor při pěchování válce:**

$$k_{ps} = k_S \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \mu \frac{D}{H} \right) \quad (\text{MPa}), \quad (2.24)$$

kde je:

- k_S – střední přirozený přetvárný odpor materiálu (MPa),
- D – průměr pěchovaného válce (mm),
- H – výška pěchovaného válce (mm),
- μ – součinitel tření (–). Při dobrém mazání 0,1, při nedostatečném až 0,3.

c) **střední přetvárný odpor při pěchování složitějších tvarů:**

$$k_{ps} = k_S \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \mu \frac{D}{H} \right) \cdot s_1 \cdot s_2 \quad (\text{MPa}), \quad (2.25)$$

kde je:

- k_S – střední přirozený přetvárný odpor materiálu (MPa),
- D – průměr pěchovaného válce (mm),
- H – výška pěchovaného válce (mm),
- μ – součinitel smykového tření (–). Při dobrém mazání 0,1, při nedostatečném až 0,3.
- s_1 – součinitel druhu deformace, $s_1 = 1$ pro volné pěchování plochým lisovníkem, $s_1 = 1,25$ až $1,75$ pro pěchování v uzavřeném nástroji,
- s_2 – součinitel nerovnoměrnosti napětí, $s_2 = 1,1$ pro válcové a půlkulové hlavyprotlačků, $s_2 = 1,2$ pro složitější symetrické výlisky (čtyřhran, šestihran), $s_2 = 1,3$ pro nesymetrické složité výlisky.

d) **střední přetvárný odpor při zpětném protlačování** (obráz. 2.1 a)

$$k_{ps} = 1152 \cdot k_S \cdot \frac{S_0}{S_1} \cdot \left(\log \frac{S_0}{S_0 - S_1} + \frac{S_0}{S_0 - S_1} \cdot \log \frac{S_0}{S_1} + \log \frac{S_1}{S_0 - S_1} \right) \quad (\text{MPa}), \quad (2.26)$$

kde je:

- k_S – střední přirozený přetvárný odpor materiálu (MPa),
- S_0 – průřez polotovaru a protlačku (mm^2),
- S_1 – průřez dutiny protlačku (mm^2).

e) **střední přetvárný odpor při dopředném protlačování plného tělesa** (obráz. 2.1 b)

$$k_{ps} = k_S \cdot (\varphi_S + 0,6) \cdot \left(1,25 + 2 \mu \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot I_0^2}{S_0}} \right) \quad (\text{MPa}), \quad (2.27)$$

kde je:

- k_S – střední přirozený přetvárný odpor materiálu (MPa),
- φ_S – logaritmická průřezová deformace (–),



- μ – součinitel smykového tření (–). Při dobrém mazání 0,1, při nedostatečném až 0,3.
 l_0 – délka polotovaru před protlačováním (mm),
 S_0 – průřez polotovaru a hlavy protlačku (mm^2).

f) **střední přetvárný odpor při dopředném protlačování dutého tělesa** (obr. 2.1 c)

$$k_{ps} = k_s \cdot (\varphi_s + 0,6) \cdot \left(1,25 + \frac{\frac{\pi \cdot (D_0 + D_1)}{4} \cdot \mu \cdot l_0}{S_0} \right) \quad (\text{MPa}), \quad (2.28)$$

kde je:

- D_0 – průměr polotovaru a hlavy protlačku (mm^2),
 D_1 – průměr tvářené části protlačku, tj. dříku (mm^2),
 l_0 – délka polotovaru před protlačováním (mm),
 S_0 – průřez polotovaru před protlačováním (mm^2),
 φ_s – logaritmická průřezová deformace (–),
 k_s – střední přirozený přetvárný odpor materiálu (MPa),
 μ – součinitel smykového tření (–). Při dobrém mazání 0,1, při nedostatečném až 0,3.

Střední přirozený přetvárný odpor materiálu lze vypočítat z hodnot přirozeného přetvárného odporu materiálu výlisku na počátku k_1 a na konci k_2 tvářecí operace:

$$k_s = \frac{k_1 + k_2}{2} \quad (\text{MPa}). \quad (2.29)$$

Hodnoty k_1 a k_2 pro daný materiál lze stanovit podle křivky zpevnění (viz 2.10) na základě logaritmické průřezové deformace na počátku φ_{s1} a na konci φ_{s2} tvářecí operace (viz 2.8).

Velikost tvářecí práce lze vypočítat ze vztahu:

$$A = F \cdot h \quad (\text{J}), \quad (2.30)$$

kde je

- F – tvářecí síla (N),
 h – dráha průtlačníku, během které probíhá vlastní tváření.



2 K JAKÝM ZKUŠEBNÍM OTÁZKÁM SE TATO PŘEDNÁŠKA VZTAHUJE:

1. Jaké jsou výhody technologie objemového tváření materiálu zastudena? Jaké druhy součástí je vhodné vyrábět objemovým tvářením zastudena?
2. Jakou výhodu má použití logaritmických deformací oproti poměrným? Jaké jsou etapy návrhu technologického postupu výroby protlačku?
3. Nakreslete schémata a popište základní způsoby objemového tváření zastudena. Ke každému schématu uveďte rovnice pro výpočet poměrné a logaritmické deformace.
4. Popište způsob stanovení velikosti zpevnění po objemovém tváření zastudena.
5. Jaké vlastnosti má mít materiál pro zpracování objemovým tvářením zastudena? Vyjmenujte přípravné operace před tvářením.
6. Popište postup stanovení tvaru a rozměrů polotovaru pro objemové tváření zastudena.
7. Jaké jsou druhy polotovarů pro objemové tváření zastudena? Jakým způsobem se vyrábějí kaloty?
8. Jaký je účel a vhodné varianty tepelného zpracování polotovarů pro objemové tváření zastudena? Jaké jsou způsoby odstranění okují z polotovarů pro objemové tváření zastudena?
9. Co je to fosfátování? Jaký je účel fosfátování při úpravě polotovarů před tvářením? Proč se provádí mazání polotovarů při objemovém tváření zastudena?
10. Jak se stanoví počet tvářecích operací při objemovém tváření zastudena? Jaké jsou technologické zásady pro návrh protlačků a nástrojů?
11. Jak se vypočte tvářecí síla při objemovém tváření zastudena? Jak se vypočte při stejném procesu tvářecí práce? Proč se vyrábí průtlachnice bandážované?
12. Jak se změní vlastnosti výchozího materiálu po objemovém tváření zastudena? Z jakých příčin vznikají nerovné okraje výlisků při objemovém tváření zastudena?
13. Jaké jsou druhy dokončování výlisků po objemovém tváření zastudena? Jak se usnadňuje dokončování dutin protlačků vrtáním?



3 DOPLŇUJÍCÍ ZDROJE – KNIHY, INTERNET, ...

- [1] BŘEZINA, R. Technologie I – část 1: skriptum. 1. vyd. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 1998. 80 s. ISBN 80-7078-439-3.
- [2] ČADA, R. Technologie I – část tváření a slévání: návody do cvičení: skriptum. 1. vyd. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 1998. 188 s. ISBN 80-7078-540-3.
- [3] PETRŽELA, Z., KUČERA, J. a BŘEZINA, R. Technologie slévání, tváření a svařování: skriptum. 2. vyd. Ostrava: VŠB v Ostravě, 1987. 329 s. (bez ISBN).
- [4] PETRŽELA, Z. Základy teorie a technologie strojírenského tváření: skriptum. 1. vyd. Ostrava: VŠB v Ostravě, 1980. 378 s. (bez ISBN).
- [5] KOLLEROVÁ, M. Tvárnenie kovov: skriptum. 1. vyd. Bratislava: ALFA, 1984. 288 s. (bez ISBN).
- [6] ČABELKA, J. a kol. Mechanická technológia. 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo SAV, 1967. 1036 s. (bez ISBN).



4 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BŘEZINA, R. Technologie I – část 1: skriptum. 1. vyd. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 1998. 80 s. ISBN 80-7078-439-3.
- [2] ČADA, R. Technologie I – část tváření a slévání: návody do cvičení: skriptum. 1. vyd. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 1998. 188 s. ISBN 80-7078-540-3.
- [3] PETRŽELA, Z., KUČERA, J. a BŘEZINA, R. Technologie slévání, tváření a svařování: skriptum. 2. vyd. Ostrava: VŠB v Ostravě, 1987. 329 s. (bez ISBN).
- [4] PETRŽELA, Z. Základy teorie a technologie strojírenského tváření: skriptum. 1. vyd. Ostrava: VŠB v Ostravě, 1980. 378 s. (bez ISBN).
- [5] ČABELKA, J. a kol. Mechanická technológia. 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo SAV, 1967. 1036 s. (bez ISBN).

