



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ,

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE, ODBOR TVÁŘENÍ KOVŮ A PLASTŮ



doc. Ing. Milan Dvořák, CSc.

Ing. Michaela Císařová, Ph.D.

TECHNOLOGIE TVÁŘENÍ

Studijní opory pro kombinované studium I. stupeň, 2. ročník

CTT-K

Brno, červen 2021



Obsah:

1. ZÁKLADNÍ DRUHY TVÁŘENÍ	5
2. VYBRANÉ TECHNOLOGIE OBJEMOVÉHO TVÁŘENÍ ZA TEPLA	7
2. 1. DĚLENÍ POLOTOVARŮ	7
2. 2. OHŘEV POLOTOVARŮ	7
2. 2. 1. OHŘÍVACÍ ZAŘÍZENÍ	9
2. 3. VOLNÉ KOVÁNÍ	10
2. 4. ZÁPUSTKOVÉ KOVÁNÍ	12
2. 4. 1. ZÁSADY KONSTRUKCE VÝKOVKU	14
2. 4. 2. KOVÁNÍ NA BUCHARECH	15
2. 4. 3. ZÁPUSTKOVÉ KOVÁNÍ NA SVISLÝCH KLIKOVÝCH LISECH	18
2. 4. 4. ZÁPUSTKOVÉ KOVÁNÍ NA VŘETENOVÝCH LISECH	19
2. 4. 5. ZÁPUSTKOVÉ KOVÁNÍ NA HYDRAULICKÝCH LISECH	20
2. 4. 6. ZÁPUSTKOVÉ MATERIÁLY	22
2. 4. 7 ŽIVOTNOST TVÁŘECÍCH NÁSTROJŮ	23
2. 4. 8. ZÁVĚREČNÉ OPERACE KOVÁNÍ	25
2. 5. DALŠÍ ZPŮSOBY KOVÁNÍ	28
2. 5. 1. PŘÍČNÉ KLÍNOVÉ VÁLCOVÁNÍ	28
2. 5. 2. KOVÁNÍ NA KOVACÍCH VÁLCÍCH	30
2. 5. 3. ROTAČNÍ KOVÁNÍ	31
2. 6. KOVÁNÍ SPECIÁLNÍCH SLITIN	31
3. VYBRANÉ TECHNOLOGIE TVÁŘENÍ ZA STUDENA	33
3. 1. POŽADAVKY NA MATERIÁLY	34
3. 2. PĚCHOVÁNÍ	34
3. 3. PROTlačOVÁNÍ KOVŮ ZA STUDENA	36

3. 3. 1. ROZDĚLENÍ A ČINITELÉ OVLIVŇUJÍCÍ PROCES PROTlačOVÁNÍ	36
3. 3. 2. ZDĚROVÁNÍ PRŮTLAČNIC	40
3. 4. ŽIVOTNOST PROTlačOVACÍCH NÁSTROJŮ	41
4. VYBRANÉ TECHNOLOGIE PLOŠNÉHO TVÁŘENÍ	42
4. 1. PROCES STŘÍHÁNÍ PLECHU A JEHO PARAMETRY	43
4. 1. 1. DRUHY STŘÍHÁNÍ PLECHU	45
4. 2. PROCES OHÝBÁNÍ PLECHU A JEHO PARAMETRY	48
4. 2. 1. ZPŮSOBY OHÝBÁNÍ PLECHU	52
4. 3. TAŽENÍ PLECHU A JEHO PARAMETRY	58
4. 3. 1. TAŽENÍ ROTAČNĚ SYMETRICKÝCH VÝTAŽKŮ	61
4. 3. 1. 1 Stanovení velikosti přístřihu	62
4. 3. 1. 2 Součinitel a stupeň tažení, počet tažných operací	63
4. 3. 1. 3 Použití přidržovače	64
4. 3. 1. 4 Poloměr hran nástroje	64
4. 3. 1. 5 Tažná mezera	66
4. 3. 1. 6 Tažná síla a práce	67
4. 3. 2. TAŽENÍ NEROTAČNÍCH VÝTAŽKŮ	68
4. 3. 2. 1 Stanovení velikosti a tvaru přístřihu	69
4. 3. 2. 2 Tažná síla a práce	72
4. 3. 2. 3 Volba přidržovače pro přístřihy "Tailored blanks"	73
4. 4. ROTAČNÍ TlačENÍ PLECHU - KOVOTlačENÍ	77
5. PRÁŠKOVÁ METALURGIE	79

5. 1. PODSTATA PRÁŠKOVÉ METALURGIE	80
5. 2. UŽITÍ TECHNOLOGIE PRÁŠKOVÉ METALURGIE	81
5. 3. VÝROBNÍ POSTUP TECHNOLOGIE PRÁŠKOVÉ METALURGIE	81
5. 3. 1 Výroba prášků	81
5. 3. 2 Úprava prášků	85
5. 3. 3 Metody zhutňování prášků	86
5. 3. 4 Spékání (slinování) prášků	92
5. 3. 5 Konečná úprava slinutých výlisků	92
5. 4. VÝROBKY PRÁŠKOVÉ METALURGIE	93

1. ZÁKLADNÍ DRUHY TVÁŘENÍ

Polotovary ze železných i neželezných kovů jsou plasticky deformovány nástroji s cílem dosáhnout požadovaného tvaru dílce (výkovku, výlisku, protlačku, atd.), u kterých se zpravidla dosáhne lepších konečných mechanicko-fyzikálních vlastností. Tento proces se nazývá tvářením. Je doprovázen třením, které ovlivňuje tok materiálu.

Tvářecí procesy se dělí na dvě zásadní skupiny:

- **Objemové tváření** – dojde k výrazné změně tvaru a zvětšení plochy původního polotovaru za studena nebo poloohřevu,
 - proces tváření probíhá převážně za tepla.
- **Plošné tváření** – plech je při neznatelné změně tloušťky a plochy přetvořen do prostorového tvaru
 - určité úseky přístřihu plechu mohou být deformovány jen pružně, po odlehčení dochází k odpružení, tj. částečné, nežádoucí změně tvaru
 - proces tváření probíhá převážně za studena.

Srovnání technologie tváření v závislosti na teplotě, při které probíhá, je uvedeno v tabulce 1.

Tabulka 1 Srovnání technologie tváření za studena a za tepla

	tváření za studena	tváření za tepla
rozměry	nejmenší tloušťka je téměř neomezená	nejmenší tloušťka je omezená
rozměrová přesnost	vysoká	nižší následkem rozdílného smršťování z dotvářecí teploty
povrchová jakost	lepší následkem použití maziva	horší následkem zokujení a omezené použitelnosti maziva
průřezový tvar	jednoduché tvary	velmi složité tvary
struktura - zrna	výrazně protažené	globulární následkem dynamických uzdravovacích procesů
textura	výrazně orientována	sotva patrná
zpevnění	značné	vesměs eliminováno zotavovacími procesy
vnitřní napětí	značné	žádné

Objemové tváření zahrnuje tyto technologie a jejich operace:

- kování – volné nebo zápusťkové kování, pýchování, rotační, radiální, izotermické, přesné, kalibrování,
- válcování – podélné (na plocho), podélné tvarové, příčné tvarové tzv. klínové, příčné profilové, rozválcování,
- protlačování – dopředné, zpětné, kombinované, radiální (stranové), hydrostatické, profilové,
- tažení – redukování, kalibrování, rozšiřování.

K plošnému tváření náleží následující technologie a jejich operace:

- stříhání – prosté, vystřihování, prostřihování, ostřihování, přistřihování, nastřihování, děrování, protrhávání, nasekávání,

- ohýbání – prosté, lemování, zakružování, ohraňování, obrubování, rovnání, prosazování, drápkování,
- tažení – prosté resp. klasické (bez ztenčení stěny), tažení se ztenčením stěny, zpětné, protahování, žlábkování, rozšiřování, vypínání, přetahování, zužování,
- tlačení – prosté, smykové (se ztenčením stěny), rotační (lemování), obrubování, žlábkování, zužování, rozšiřování.

Podrobný přehled základních prací a jednotlivých operací včetně vysvětlujících pracovních schémat je uveden např. v normě ČSN 22 001 a v literatuře [1].

Tvařitelnost materiálů, jako jejich schopnost ke zpracování tvářením, lze sledovat a hodnotit pomocí různých zkoušek. Jedná se o zkoušky:

- **mechanické** (přímé, základní), např. tahové zkoušky, kterými se zjišťují základní materiálové charakteristiky jako mez kluzu R_e [MPa], smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa], mez pevnosti v tahu R_m [MPa], tažnost A_{80} [%], prodloužení (kontrakce) Z [%], exponent deformačního zpevnění n [-] atd.,

- **technologické** (nepřímé), kterými se napodobují vybrané stavy napjatosti reálných dějů v ohnisku plastické deformace. Jedná se o zkoušky např. kalíškovací, hydraulické (membránové), pěchovací s vrubem, atd. Výsledky těchto zkoušek poskytují podklady pro tvorbu obecnějších grafů informujících o zásobě plastičnosti pro daný materiál a konkrétní podmínky tváření.

Kritériem technologické tvařitelnosti je zpravidla mezní stupeň deformace analyzovaného způsobu tváření. Ve výsledných grafech jsou zobrazeny mezní křivky, které určují hranice, kdy může dojít ke vzniku defektů na tvářeném dílci.

Výchozí polotovary pro kovárny a lisovny jsou polotovary dodávané hutěmi.

Ve válcovnách se vyrábí hutní polotovary:

→ z litých ingotů: - předvalky (bloky, sochory, bramy, ploštiny),
- vývalky (tyče jednoduchého a tvarového průřezu, kolejnice, dráty, plechy tenké, tlusté, pásy ve svitcích),

→ z čepů - tyče složitých průřezových tvarů,

→ z litých a následně kovaných kovárenských ingotů: polotovary velkých průřezových tvarů, které nelze vyrobit válcováním.

LITERATURA:

1. KRÍŽ, Rudolf a Pavel VÁVRA: Strojírenská příručka. Scientia, spol. s r. o., Praha, 1998, 8.csv., část V. Tváření, ISBN: 80-7183-054-2.

2. KOČMAN, Karel a kol.: Aktuální příručka pro technický úsek. 15. ed. Praha: Verlag Dashöfer, SAMEK, Radko: Část 8 - Tváření. 122 s. 1998. ISBN 80-902247-2-5.

3. DVOŘÁK Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ: Technologie tváření. Plošné a objemové tváření. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s. r. o., 3. vydání 2013. 169 s. ISBN 978-80-214-4747-9.

2. VYBRANÉ TECHNOLOGIE OBJEMOVÉHO TVÁŘENÍ ZA TEPLA

Mezi vybrané technologie objemového tváření za tepla především patří: volné kování, zápustkové kování, kování na kovacíh válcích a rotační kování. Pro uvedené technologie je třeba připravit polotovary dělením a následně provést ohřev.

2.1. DĚLENÍ POLOTOVARŮ

V kovárnách se využívají většinou polotovary zhotovené válcováním za tepla a to zejména sochory čtvercové a kruhové, čtvercové či kruhové tyče, dále tlustostěnné trubky, polotovary protlačované a tažené. Výchozí rozměrnější polotovary je nutno dělit na přířezy konkrétní délky a to níže uvedenými technologiemi:

- **řezáním** – uplatňuje se zejména u neželezných kovů a slitin na rámových nebo pásových pilách. V současné době se stále více uplatňují nekonvenční způsoby řezání jako např. elektrojiskrové, laserem.
- **stříháním** – je nejlevnější a nejvýkonnější způsob dělení, nevýhodou je snížení jakosti střížné plochy. Nízkouhlíkové a nízkolegované oceli se stříhají za studena, vysokouhlíkové a vysokolegované oceli za tepla (ohřev $300 \div 450 \text{ }^{\circ}\text{C}$), kdy dochází ke snížení střížné síly a vzniku trhlin.
- **lámáním** – provádí se beranem lisu ohýbající silou, např. kruhovou tyč opatřenou vrubem.

Co do kvality dělené plochy a přesnosti rozměrů je řezání nejpresnější, pak následuje stříhání a nejnepresnější je lámání, které je energeticky nejméně náročné.

2.2. OHŘEV POLOTOVARŮ

Za účelem zvýšení tvařitelnosti materiálů a snížení deformačního odporu se polotovary ohřívají, čímž se zlepšuje jakost materiálů (např. rozpustí se precipitáty, dojde k homogenizaci lité struktury).

Doba ohřevu na kovací teplotu musí být co nejkratší, jinak může dojít k narušení povrchové i vnitřní jakosti materiálu. Kratší doba minimalizuje negativní projevy ohřevu, oduhličení, opalu a zhrubnutí zrna.

Na požadovaný ohřev materiálu má vliv:

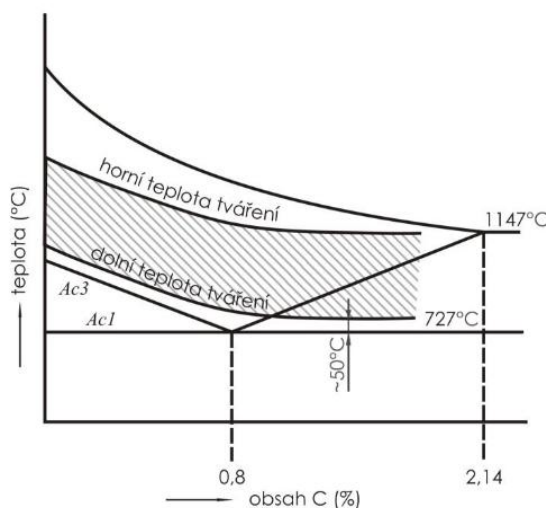
- **tepelná vodivost** – schopnost přestupu tepla z povrchu do jádra ohřívaného materiálu. Čím je vyšší, tím je přestup tepla rychlejší, tepelné napětí menší a doba ohřevu kratší. Hodnotí se **součinitelem tepelné vodivosti** λ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$].

- **měrná tepelná kapacita c** [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] vyjadřuje množství tepla, které je zapotřebí ke zvýšení teploty na jednotku objemu ohřívajícího kovu. Vysoké hodnoty prodlužují dobu ohřevu a tím spotřebu energie.
- **hustota kovů slitin ρ** [$\text{kg} \cdot \text{dm}^{-3}$] je další rozhodující vlastnost, vysoké hodnoty prodlužují dobu ohřevu a tím také spotřebu materiálu.
- **teplotní roztažnost α** [K^{-1}], jejíž vysoké hodnoty zvětšují tepelné napětí v materiálu, lze ji omezit snížením rychlosti ohřevu.
- **plasticita kovů** vzrůstá se vzrůstající teplotou kovu, protože klesá hodnota modulu pružnosti E . Většina ocelí přechází nad teplotou $500 \div 550^\circ\text{C}$ do plastického stavu, který je závislý na další změně teploty. Vyšší plasticita snižuje tepelné napětí v materiálu a umožňuje zrychlit ohřev, čímž opět klesá spotřeba energie.

Kromě uvedených vlastností kovů je nutné přihlídnout k dalším faktorům, jako jsou:

- **tvářecí teplota T** [$^\circ\text{C}$] se pohybuje v intervalu, který je ohraničen:
 - horní kovací teplotou, která má být nižší, než kritická teplota růstu zrna, při které dochází k nežádoucímu zhrubnutí struktury.
 - dolní kovací teplotou, jejímž překročením dochází k řádkovitosti struktury a zvýraznění anizotropních vlastností.

Na obr. 1 je uvedena kovací teplota ocelí, kdy horní kovací teplota je asi $150 \div 200^\circ\text{C}$ pod teplotou solidu. Lící struktura vyžaduje horní kovací teplotu vyšší, než materiálu s výchozí tvářenou strukturou. Dolní kovací teplota je maximálně 50°C na křivku A_{c3} , při vyšších hodnotách vzniká u větších výkovků hrubozrnná struktura.



Obr. 1. Pásmo kovacích teplot ocelí

Pro porovnání kovacích teplot vybraných kovů a slitin je uvedeno několik příkladů v následující tabulce 2.

- **Rychlost ohřevu** [$^{\circ}\text{C} \cdot \text{hod}^{-1}$] závisí na tepelné vodivosti materiálu a rozměrech ohřívaného tělesa. Se vzrůstající rychlostí ohřevu se zkracuje jeho doba, ale zvyšuje se tepelné napětí, které vzniká v důsledku nerovnoměrného rozdělení teplot (teplotní rozdíl ΔT vnějších a vnitřních vrstev).

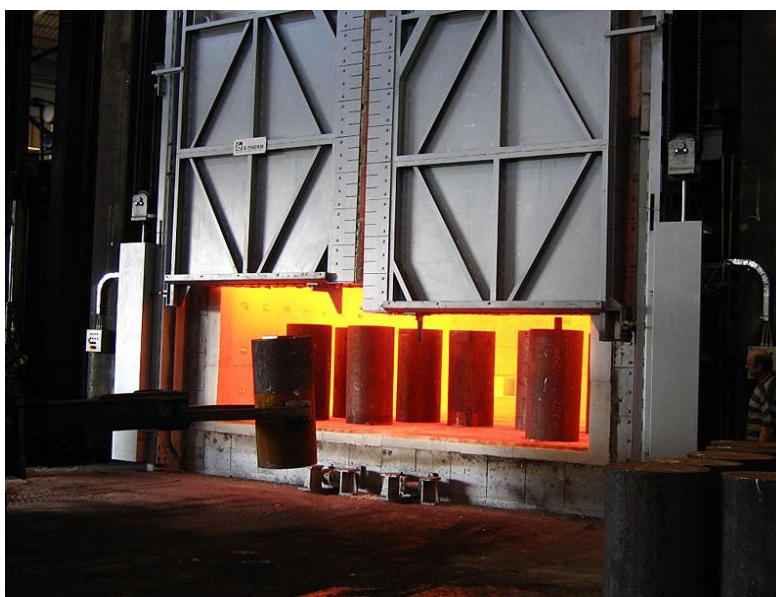
Tabulka 2 Kovací teploty ocelí a slitin [6]

Ocel (ČSN)	Kovací teplota [$^{\circ}\text{C}$]		Slitina (ČSN)	Kovací teplota [$^{\circ}\text{C}$]	
	horní	dolní		horní	dolní
11 500	1250	750	42 3016 (bronz)	900	780
14 240	1200	800	42 4204 (Al slitina)	475	380
16 240	1150	800	Ti-5Al (Ti slitina)	1100	970
19 830	1100	900	Ms 90 (mosaz)	900	700

- **Doba ohřevu** [h] souvisí s rychlostí ohřevu. Stanovuje se s ohledem na malou spotřebu energie, malou oxidaci, oduhličení a požadované strukturální změny.
- **Průvodním jevem ohřevu** je vznik okují. Vznik okují je především ovlivněn dobou ohřevu, teplotou a atmosférou pecí, kterou lze na druhou stranu tento vznik značně ovlivnit. Ztráta kovu na jeden ohřev představuje $(1 \div 3) \%$. Před dalším zpracováním výkovku je nutné okuje odstranit (očistit), aby nedošlo k jejich zatlačení do povrchu výkovku.

2. 2. 1. OHŘÍVACÍ ZAŘÍZENÍ

K ohřevu průmyslových pecí se používá plynové palivo – komorové pece (malosériová a kusová výroba, obr. 2) nebo elektrická energie – odporový ohřev (barevné kovy) a indukční ohřev (sériová výroba).



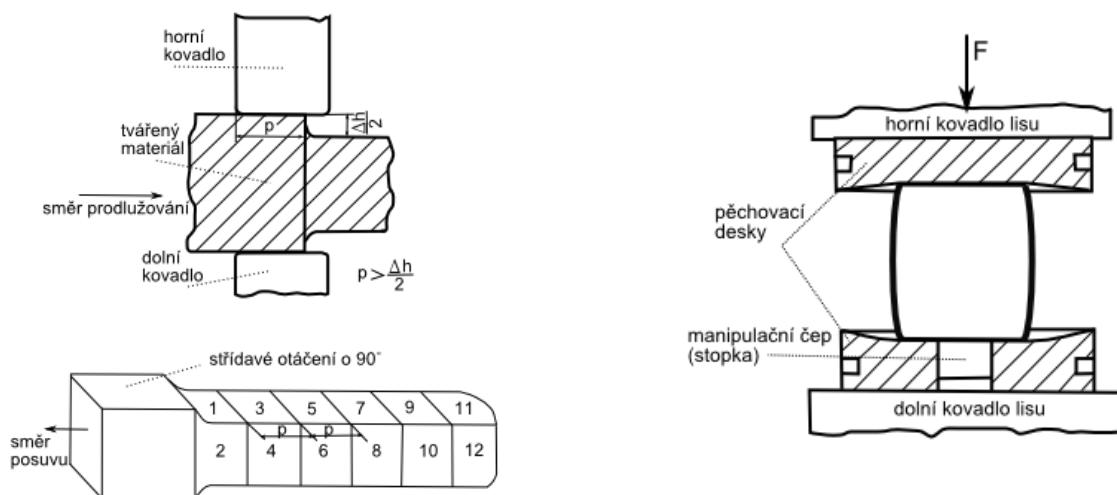
Obr. 2 Komorová pec

2.3. VOLNÉ KOVÁNÍ

Volné kování za tepla je pracovní postup výroby výkovků, při kterém se dosáhne kombinací základních kovářských operací přibližného tvaru hotové součásti. Volné kování lze rozdělit na **ruční** a **strojní**. V současné době se ruční kování používá v kusové výrobě malých a středně velkých výkovků v rámci oprav, údržby, v zámečnictví a uměleckého kovářství. Strojním kovářstvím se vyrábějí velké výkovky, těžko vyrobitelné jinou technologií, avšak tvarově jednoduché a musí mít velké materiálové přídavky.

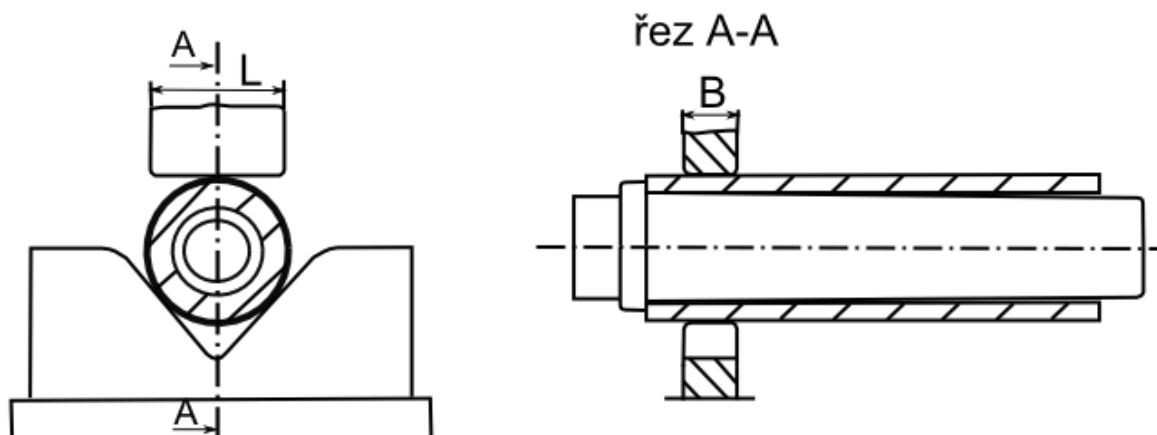
Mezi základní operace volného kování patří:

- **prodlužování** – účelem je prodloužení polotovaru za současného zmenšování příčného průřezu (obr. 3),
- **pěchování** – materiál je stlačován ve směru osy, rozšiřuje se průřez na úkor délky. Používá se pro kování rotačních výkovků (obr. 3),

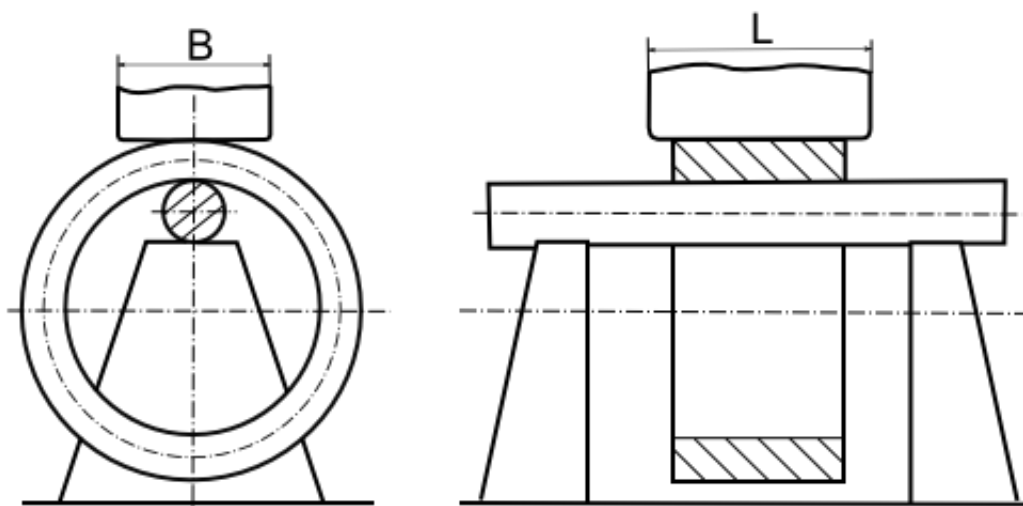


Obr. 3 Prodlužování na čtyřhran, pěchování ingotu s předkovaným manipulačním čepem

- **kování na trnu** – používá se k rozšiřování a prodlužování průměru kroužku na úkor jeho tloušťky (obr. 4, 5),

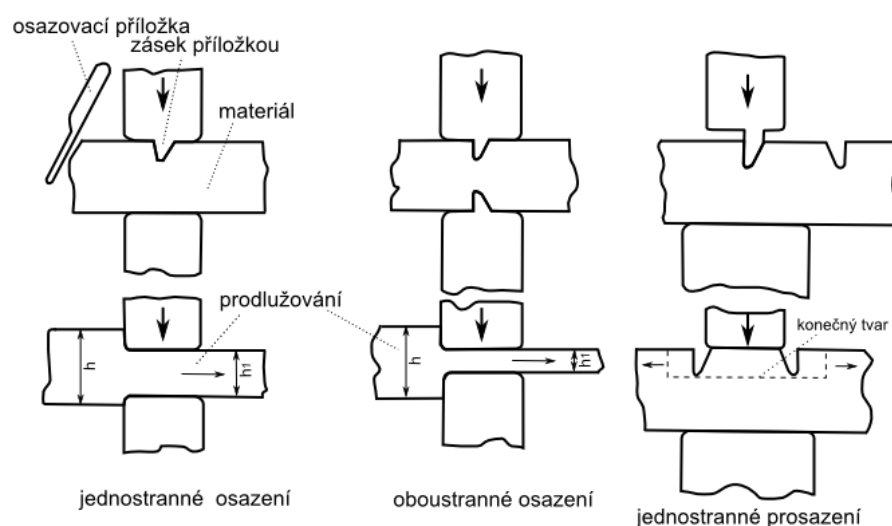


Obr. 4 Prodlužování na trnu

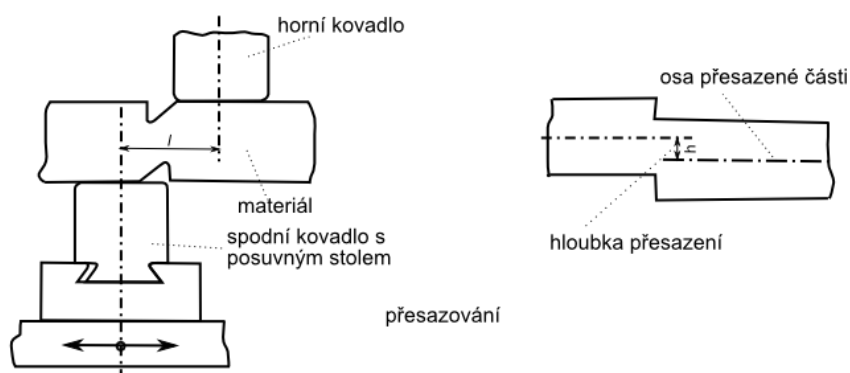


Obr. 5 Rozkování kroužku na trnu

- **osazování a přesazování** – je v podstatě zmenšování resp. zvětšování průřezu u osazovaných hřídelů při zachování souososti všech jeho částí (obr. 6, 7),

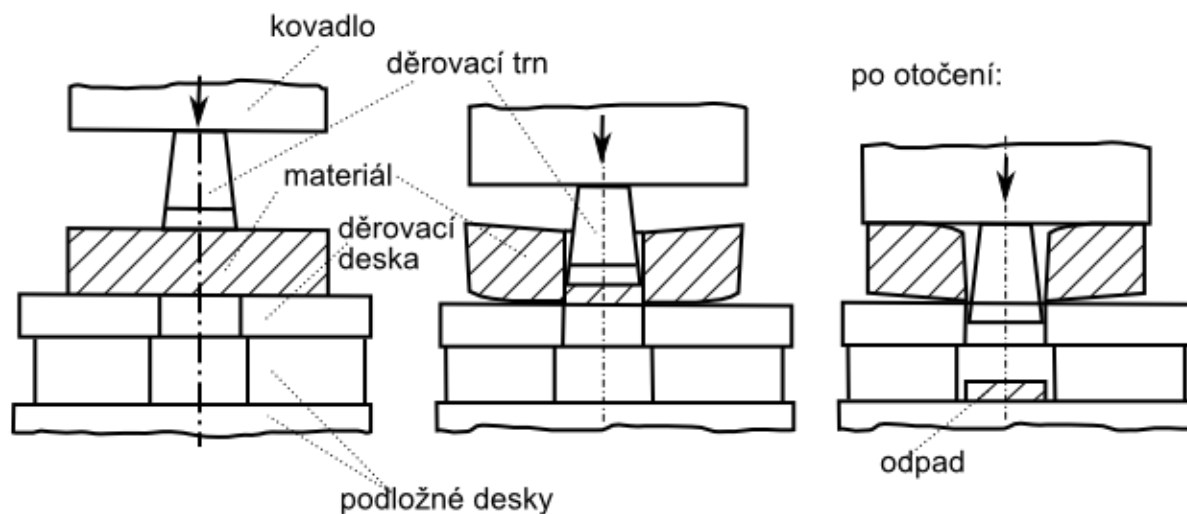


Obr. 6 Osazování a přesazování



Obr. 7 Přesazování

- **děrování** – operace, při kterých vznikají průchozí nebo neprůchozí díry v tvářeném kusu (obr. 8),



Obr. 8 Děrování plným trnem

- **ohýbání** – umožňuje zakřivit podélnou osu výkovku, čímž se mění i jeho průřezný tvar.

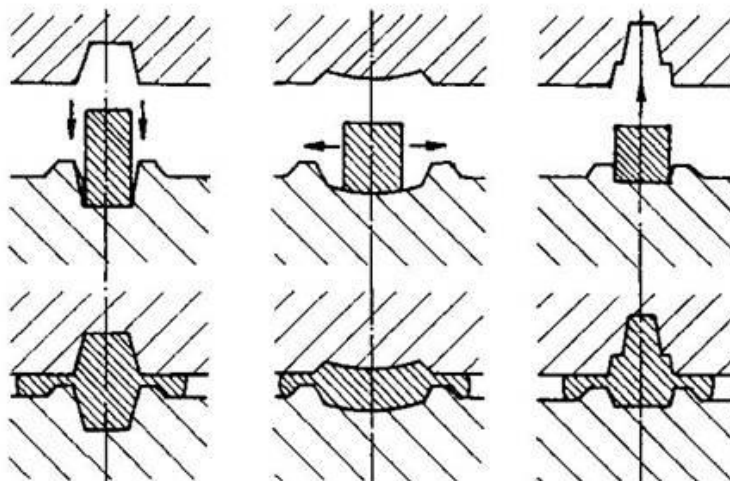
2. 4. ZÁPUSTKOVÉ KOVÁNÍ

U zápusťkového kování dochází k vyplnění dutiny zápusťky, čímž získá kovaný materiál požadovaný tvar. Horní část zápusťky je upnuta k pohyblivému se beranu bucharu nebo lisu, dolní část zápusťky je upnuta na stole bucharu nebo lisu. Kování se realizuje v otevřené nebo uzavřené zápusťce.

Do **otevřené zápusťky** se vloží materiál, kterým se dutina vyplní a přebytečný materiál je vytlačován do tvarované mezery mezi horní a dolní zápusťkou (obr. 9). Tento přebytek se nazývá výronek, který se v následující operaci ostříhne. Na výronek připadá běžně (8 ÷ 15) % ztrát kovu a umísťuje se do zápusťek z těchto důvodů:

- vyrovnává objemové rozdíly výchozího polotovaru a také vyrovnává zvětšování objemu dutiny v důsledku jejího opotřebení,
- klade odpor proti vytékání kovu ze zápusťkové dutiny, což podporuje její dokonalé zaplňování,
- tlumí rázy při vzájemném dosednutí dílů zápusťky.

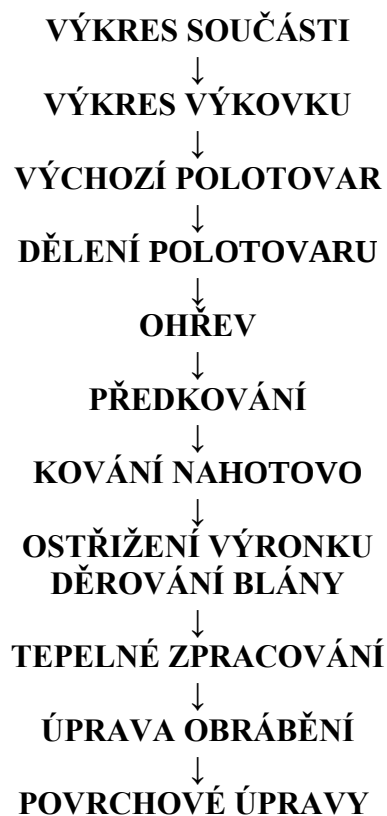
Rozměry zápusťkových výkovků se zvětšují o přídatky na opracování a technologické (úkosy bočních ploch do dělicí roviny, zvětšení tloušťek stěn žeber, apod.).



Obr. 9 Principy zaplňování dutiny

Uzavřená zápustka na rozdíl od otevřené nemá výronkovou drážku, kov dokonale vyplňuje dutinu, výkovek je bez výronku. Výhodou této zápustky je, že výkovek je kován na hotovo. Kování je technologicky náročnější, protože polotovar musí mít přesný objem jako dutina zápustky, zápustky jsou více namáhány, proto mají kratší životnost.

Celý proces obsahuje řadu operací, jednotlivá stadia technologického postupu uvádí postup na obr. 10.



Obr. 10 Schéma výrobního postupu zápustkového kování

2. 4. 1. ZÁSADY KONSTRUKCE VÝKOVKU

Výkovky se třídí dle normy ČSN 42 9002 podle složitosti tvaru na:

Skupina A – výkovky s protáhlou nebo prohnutou osou, s výčnělky nebo rozvidlením.

Skupina B – výkovky půdorysně souměrné vyplňující zpravidla dutinu pēchováním.

Skupina C – kombinované, složité tvary.

Označení $\rightarrow X^1) X^2) X^3)X^4) . X^5)$

¹⁾ tvarový druh

²⁾ tvarová třída

³⁾ tvarová skupina

⁴⁾ tvarová podskupina (přesah poměrů)

⁵⁾ technologické hledisko

Při zpracování výkresu výkovku se obvykle vychází z výkresu součásti. Ve výkresu součásti mohou být uvedeny následující požadavky na:

- **přesnost** – výkovky se vyrábí dle přesnosti kování v provedení: **obvyklém, přesném a velmi přesném**. Z těchto tříd vyplývají velikosti přídavek na obrábění, stupeň přesnosti a velikosti mezních úchylek a tolerancí rozměrů kolmých a rovnoběžných se směrem rázu.
- **mechanické vlastnosti** – tepelné zpracování, předepsaný průběh vláken, předkování otvorů.
- **tvářecí zařízení** – ovlivňuje jak přesnost, tak konstrukci výkovku.
- **mechanizaci procesu kování** – např. požadavek na přídavné úchyty, středící plochy, apod.

Konstrukci a přesnost výkovku ovlivňuje mnoho technologických parametrů, které je nutno stanovit již při jeho návrhu. Je nutno určit:

- **přídavky na opracování** (obrábění), které se řídí dle tříd provedení (viz přesnost)
- **technologické přídavky**, které upravují tvar výkovku na tvar vhodný pro kování. Jedná se především o:

→ **vnější a vnitřní úkosy** na stěnách do dělicí roviny dle použitého stroje pro jeho výrobu; jsou nutné z důvodu snadnějšího zatékání kovu do dutiny, vyjímání výkovku z dutiny,

→ **poloměry zaoblení hran, rohů a přechodů** výkovku a jejich mezní úchylky; ostré hrany by mohly z pevnostního hlediska způsobit prasknutí zápustky,

→ **nejmenší tloušťku blány** v předkovaných otvorech, která se po vykování vystřihne (úspora materiálu), tloušťku disku a stěny výkovku,

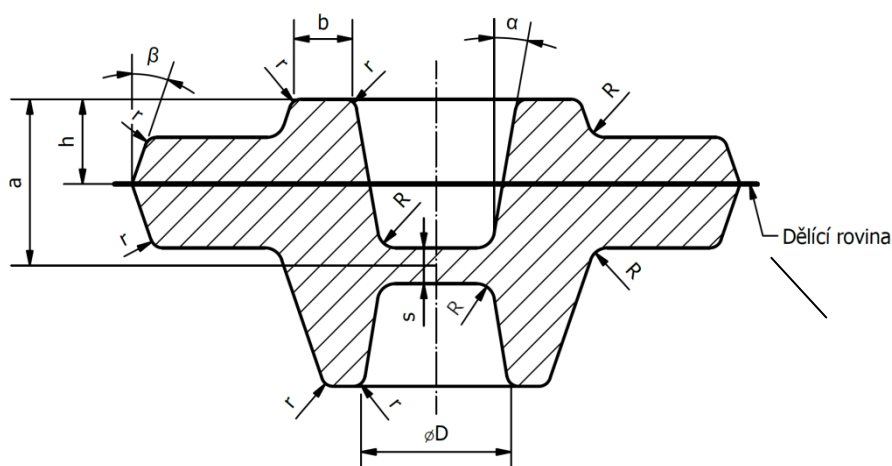
→ **přídavky pro manipulaci.**

Ukázka technologických parametrů u výkovku - obr. 11.

Vztahy mezi r a R za podmínky $\frac{h}{b} = 2 \div 4$

$$r = 0,06 \cdot h + 0,5 \quad [\text{mm}]$$

$$R = 3 \cdot r + 0,5 \cdot 5 \quad [\text{mm}]$$



Obr. 11 Technologické přídavky na výkovku

Dále je třeba vzít v úvahu:

- **polohu dělicí roviny** rozdělující výkovek na část kovanou v horním a spodním dílu zápustky. Volí se většinou v místě největšího obvodu, má být pokud možno rovinná a nachází se v ní výronková drážka (viz obr. 11).

- lze kovat i **párově** – 2 kusy jako 1 celek, který se následně rozdělí na 2 části. A naopak, členitý výkovek lze rozdělit na 2 jednodušší části, které se v následující operaci spojí vybranou technologií svařováním.

2.4.2. KOVÁNÍ NA BUCHARECH

Tato technologie je vhodná především pro kování drobných výkovků nebo výkovků o velké hmotnosti a výškově složitých výkovků. Rychlost beranu bucharu je až $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Postup kování spočívá v těchto krocích (operacích):

→ **předkování** – na bucharech se kove převážně postupově. Povrch výkovku je kvalitnější, protože okuje opadají z výkovku během kování. Účelem předkování je rozdělení materiálu ve směru podélném i příčném tak, aby v dokončovací dutině nedocházelo k přemísťování materiálu v podélné ose. Šetří se tím materiál i dutina zápustky.

→ **kování**

→ **ostřížení výronku, případně blány**

→ **zpracování výkovku.**

Při návrhu pracovního postupu výroby výkovku je nutné zohlednit počet přípravných dutin, ve kterých se objem předkovku rozdělí. Volba či kombinace dutin se provádí pomocí diagramů, tabulek, pomocí nichž se sestrojí tzv. **ideální předkovek**.

Ideální předkovek je osově souměrné těleso, jehož objem V_{ip} se rovná objemu výkovku V_v , zvětšenému o objem výronku V_{vr} a jehož délka l_{ip} se rovná délce výkovku l_v . Postup konstrukce uvádí obr. 12.

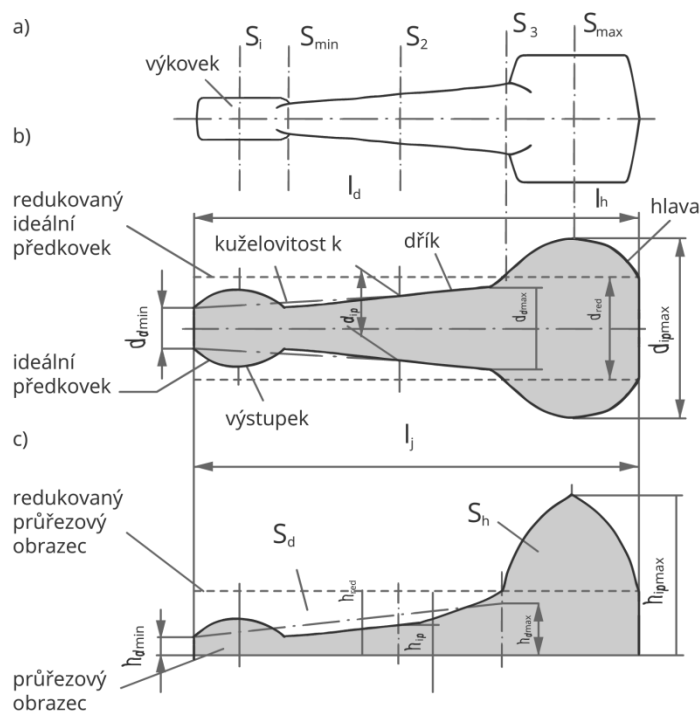
Vychází se z výpočtu obsahu ploch S_{ip} v charakteristických řezech výkovku ($S_1, S_2, \dots$) a ty se převedou na průměry ideálního předkovku.

$$d_{ip} = 1,13 \cdot \sqrt{S_{ip}} \quad [\text{mm}] \quad (1)$$

Ideální předkovek se převede na redukovaný ideální předkovek, což je válcové těleso stejného objemu, o průměru d_{re} a délce l_{re} .

$$V_{ip} = V_{re} = S_{re} \cdot l_{re} \quad [\text{mm}^3] \quad (2)$$

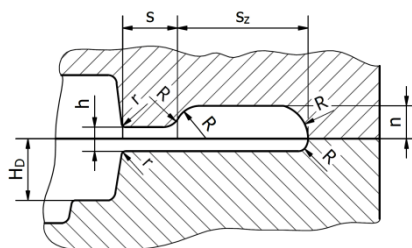
Nanesením hodnot obsahů S_{ip} ve vhodně zvoleném měřítku **m** v pořadí výšek $h_{ip} = \frac{S_{ip}}{m}$ se dospěje k základnímu průřezovému obrazci ideálního předkovku. Redukovaný průřezový obrazec má tvar obdélníku o výšce h_{re} a stejnou plochu, a je tedy vymezen přímkou. Část základního průřezového obrazce ideálního předkovku, která ji převyšuje je nazývána hlavou a její plocha S_h je v relaci k ploše S_d v oblasti dříku. S_d odpovídá přebytečnému objemu materiálu, který je nutno dodat do oblasti hlavy, a to vhodným výběrem přidavných dutin. Děje se tak pomocí parametrů např. $\frac{d_{max}}{d_{re}}, \frac{l_i}{d_{re}}$, kuželovitosti dříku a různých grafů.



Obr. 12 Postup sestrojení ideálního předkovku

Redukovaný ideální předkovek v principu odpovídá rozměrům výchozího polotovaru, avšak je třeba připočítat přídavek na opal a objem blány otvoru.

Dokončovací dutina se nachází v ose beranu a je opatřena výronkovou drážkou. Klasický průřezový tvar výronkové drážky dokončovací dutiny je na obr. 13.



Obr. 13 Tvar výronkové drážky pro buchar

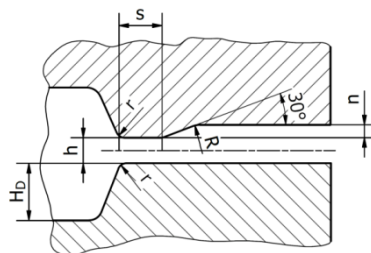
Zúžené místo – můstek (s) brzdí vytékání kovu, zbylý úsek – zásobník (s_z) se zaplňuje asi na 70 % přebytečným materiálem. Rozměry a geometrie drážky jsou dány normou ČSN 22 8308 (Zápustky pro buchary. Směrnice pro konstrukci. [9]), kde jsou také uvedeny vzdálenosti mezi dutinami, jejich vzdálenosti od okrajů apod.

2. 4. 3. ZÁPUSTKOVÉ KOVÁNÍ NA SVISLÝCH KLIKOVÝCH LISECH

Jedná se o zdvihový stroj, kde pohyb beranu je přenášén pomocí klikového mechanismu, pracuje tlakem a jeho zdvih je stále stejný, pracovní rychlost stroje je $(0,5 \div 0,8) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Spodní poloha beranu je neměnná. Horní část zápustky má přesně určenou dolní polohu, čela zápustek na sebe nedosedají.

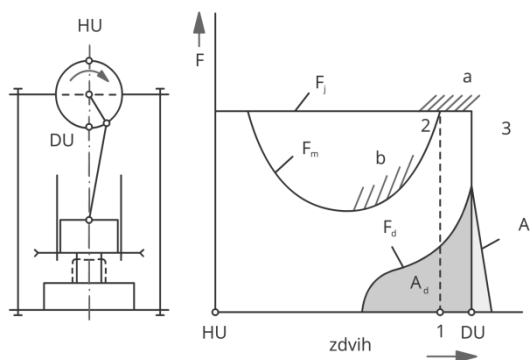
Dutina se zaplňuje při jediném zdvihu lisu, počet dutin musí být roven počtu zdvihů beranu, které jsou nutné k zhotovení výkovku. Výkovky lze automaticky vyhazovat pomocí vyhazovače z dutiny zápustky, proto lze volit i menší úkosy. Kování na klikových lisech je vhodné pro výkovky se symetrickým, kruhovým nebo kvadratickým půdorysem (i s dřikem), výkovky s krátkou podélnou osou (čepy, páky, ojnice, vidlice, kliky). Nevýhodou tohoto způsobu kování je, že okuje se zakovou do výkovku, proto se musí odstraňovat nebo zvolit takový ohřev, při kterém jich vzniká co nejméně.

Výronková drážka v dokončovací dutině pro lis je oproti bucharům otevřená, její tvar je uveden na obr. 14.



Obr. 14 Tvar výronkové drážky pro lis

Ve schématu klikového mechanismu (obr. 15) je znázorněna situace, kdy začíná operace kování – start křivky síly F_d v pracovním diagramu. Úsek 1 - DU odpovídá jmenovitému úhlu α_j natočení kliky před DU, u kovacíh lisů bývá α_j maximálně $5^\circ \div 10^\circ$. Proti přetížení systému beran-ojnice-klika-rám (oblast a znázorňuje překročení síly F_j) jsou např. v beranu pod ojnici umístěny tlakové sřížné pojistky. Plocha 1, 2, 3, DU vyjadřuje jmenovitou práci lisu A_j , která když se porovná s kovací prací A_d , může se stanovit využitelnost lisu za trvalého chodu.



Obr. 15 Schéma klikového mechanismu lisu

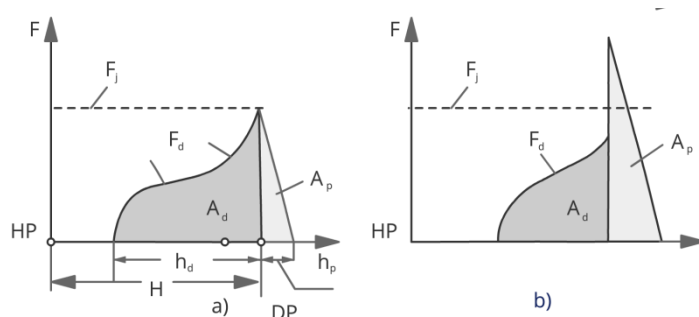
2. 4. 4. ZÁPUSTKOVÉ KOVÁNÍ NA VŘETENOVÝCH LISECH

Jedná se o energetický tvářecí stroj, jehož dosedací rychlost je $0,5 \div 0,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, kovací kapacita lisu je určena jeho jmenovitou silou F_j .

Výkovek se kove v jednodutinové zápustce jedním, max. 2 údery, výjimečně lze kovat v 1. předkovací dutině (funkce dutiny: ohýbání, zužování, tvarování). Dokončovací dutina je polohována vždy do osy vřetene. Lze kovat tvarově jednoduché výkovky (převládá pěchování), nedoporučuje se kovat výkovky s tenkými stěnami a vysokými žebry. Kove se převážně v otevřených zápustkách hranolovitého nebo válcovitého tvaru,

Lisy se využívají v malosériové výrobě, pro rovnání, kalibrování, děrování, stříhání nebo ostříhování výronků. Vyhazovač lisu je zpravidla uložený ve spodní části nástroje, má možnost regulovat energii úderu změnou otáček setrvačníku. Lisy jsou také využívány pro kování v uzavřených dělených zápustkách; vyražec v závěru procesu vysouvá z objímky obě části zápustky, které se rozevrou, a výkovek lze snadno vyjmout. Výkovky jsou menší, členitější, z neželezných kovů a slitin.

Na obr. 16 je znázorněno energetické využití vřetenového lisu. 16 a) uvádí ideální stav, kdy maximální tvářecí síla v závěru zdvihu nepřekročí jmenovitou sílu lisu F_j . Plocha A_d pod křivkou průběhu tvářecí síly představuje potřebnou deformační práci. Propružení systému nástroj-vřetenorám je znázorněno ztrátovou prací A_p , plocha má tvar trojúhelníku. Na obr. 16 b) je znázorněno přetížení lisu – překročení síly F_j .



Obr. 16 Schéma energetického využití vřetenového lisu

2. 4. 5. ZÁPUSTKOVÉ KOVÁNÍ NA HYDRAULICKÝCH LISECH

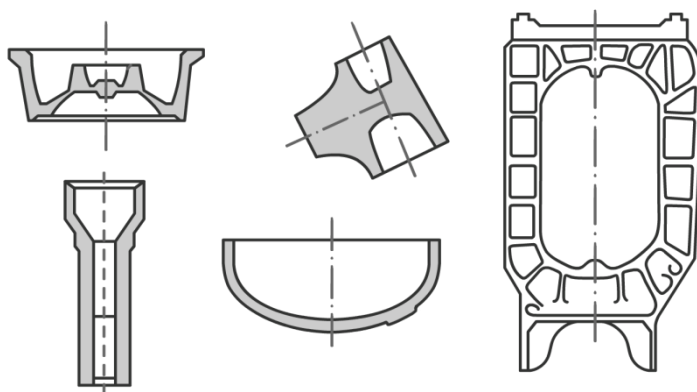
K překonání deformačního odporu se využívá u hydraulických lisů potenciální energie, která je dána tlakovým médiem (např. olej) v hlavním válci. Jmenovité pracovní síly F_j lze dosáhnout v kterékoliv poloze beranu, která je k dispozici po celou dobu jeho zdvihu. Rychlost beranu je oproti bucharům či klikovým lisům značně menší. Pro objemové tváření se užívá pracovní rychlost pro běžné oceli $(0,01 \div 0,05) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $(0,01 \div 0,02) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ pro kovy citlivé na rychlost deformace (Al slitiny, Ti slitiny, legované oceli).

Rychlost deformace a stupeň deformace při změně deformační práce v teplo ovlivňují vzrůst teploty v průběhu kování, což negativně ovlivňuje v zúžených místech zápustky vzrůst lokální teploty → zhrubne zrno.

Hydraulické lisy se využívají pro:

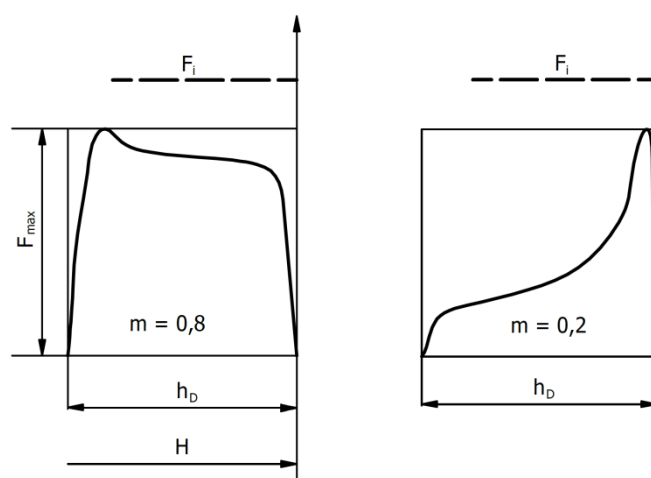
- kování velkorozměrových výkovků (rámy, panely, přepážky),
- kování protlačováním (dlouhé duté výkovky),
- kování obtížně tvařitelných slitin,
- přesné kování tvarově složitých výkovků v uzavřených zápustkách.

U hydraulických lisů se nedoporučuje realizovat operace kování jako je rozdělování a prodlužování. Kove se v jednodutinové zápustce, v přípravných dutinách se provádějí pýchovací, ohýbací a zužovací operace. Některé možnosti výkovků kovaných na hydraulických lisech jsou zobrazeny na obr. 17.



Obr. 17 Výkovky kované na hydraulických lisech

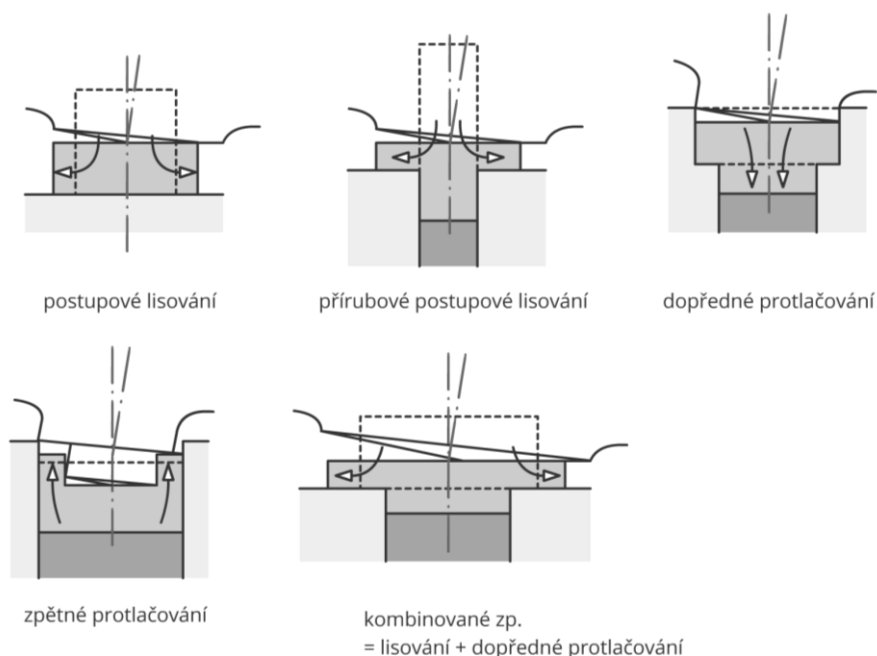
Využitelnost hydraulického lisu je zobrazena na obr. 18 pomocí dvou grafů. Graf a) se týká kování protlačováním či protahováním, graf b) kování rozpěchováním.



Obr. 18 Pracovní diagramy operací hydraulického lisu

MOŽNOSTI TVÁŘENÍ KYVNOU ZÁPUSTKOU

Kování kyvnou zápusťkou bylo v minulosti vyvinuto v rámci přesného kování. Na obr. 19 lze vidět možnosti využití kyvné zápusťky při jiných technologiích jako je postupové lisování, dopředné a zpětné protlačování, příp. kombinace lisování a dopředné protlačování.



Obr. 19 Ukázka využití při tváření kyvnou zápusťkou

2. 4. 6. ZÁPUSŤKOVÉ MATERIÁLY

Zápusťky jsou vystaveny značnému namáhání a to:

- **mechanickému namáhání** – jedná se o zápusťky bucharů, které jsou zatěžovány dynamicky při kování,
- **tepelnému namáhání** – střídání teplot → vznik napětí → vznik mikrotrhlinek; povrchová teplota dutiny je až 500 °C, u výstupků dutin až 600 °C.

Hlavní požadavky na oceli pro zápusťky jsou:

- vysoká pevnost a houževnatost v celém rozsahu kovacích teplot,
- vysoká otěruvzdornost,
- dobrá prokalitelnost a co nejvyšší popouštěcí teplota,
- nízká tepelná roztažnost a co nejvyšší tepelná vodivost,
- dobrá obrobiteľnosť a nízká cena oceli.

Těchto vlastností se často dosahuje přidáním legujících prvků (kombinace Cr, Ni, Mn a W, Cr, V).

Tabulka 3 Doporučené zápustkové oceli se žřetelem na velikost a namáhání zápustky

Označení oceli	Použití oceli se žřetelem na:	
	velikost zápustky	namáhání zápustky
19 464	malé a střední zápustky	mírně tepelně namáhané nástroje
19 512	malé zápustky o tl. do 200 mm	středně tepelně namáhané nástroje
19 552	malé zápustky o tl. do 200 mm	vysoce tepelně namáhané, houževnaté nástroje
19 642	malé, střední a velké zápustky	středně tep. namáhané nástroje s velkou houževnatostí
19 650	malé, střední a velké zápustky	středně tep. namáhané nástroje s dobrou houževnatostí
19 662	střední a velké zápustky	středně tep. namáhané nástroje s velkou houževnatostí
19 663	malé, střední a velké zápustky	středně tep. namáhané nástroje s velkou houževnatostí
19 720	malé zápustky o tl. do 200 mm	vysoce tepelně namáhané, dosti houževnaté nástroje
19 721	malé zápustky o tl. do 200 mm	vysoce tepelně namáhané, méně houževnaté nástroje
19 740	malé zápustky o tl. do 200 mm	vysoce tepelně namáhané, dosti houževnaté nástroje

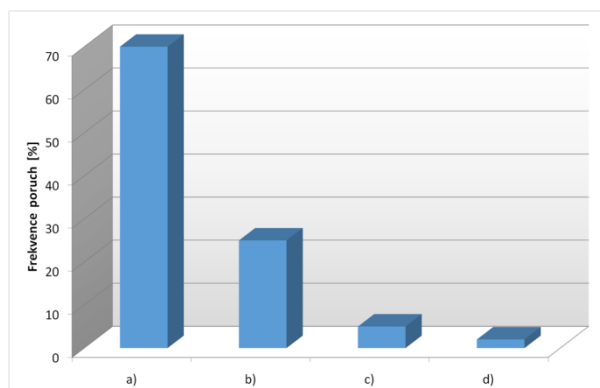
Tabulka 4 Doporučené zápustkové oceli se žřetelem k druhu kovacího stroje a materiálu výkovku

Označení oceli	Použití oceli se žřetelem na	
	druhu kovacího stroje	materiálu výkovku
19 464	buchary, vřetenové lisy, kovací lisy	nelegované a nízkolegované oceli, slitiny lehkých kovů a olova
19 512	buchary, vřetenové lisy, kovací lisy	nelegované a nízkolegované oceli, slitiny lehkých kovů
19 552	buchary, vřetenové lisy, kovací lisy	nelegované a nízkolegované oceli, slitiny lehkých kovů
19 642	především buchary, ale také vřetenové lisy a kovací lisy	nelegované a nízkolegované oceli, slitiny lehkých kovů
19 650	buchary, vřetenové lisy	nelegované a nízkolegované oceli, slitiny lehkých kovů
19 662	především buchary	nelegované a nízkolegované oceli, slitiny lehkých kovů
19 663	buchary, vřetenové lisy, kovací lisy	nelegované a nízkolegované oceli, slitiny lehkých kovů
19 720	všechny druhy lisů a bucharů	všechny druhy ocelí, slitiny mědi a lehkých kovů
19 721	všechny druhy lisů	všechny druhy ocelí, slitiny mědi a lehkých kovů
19 740	všechny druhy lisů	všechny druhy ocelí, slitiny mědi a lehkých kovů

2. 4. 7. ŽIVOTNOST TVÁŘECÍCH NÁSTROJŮ

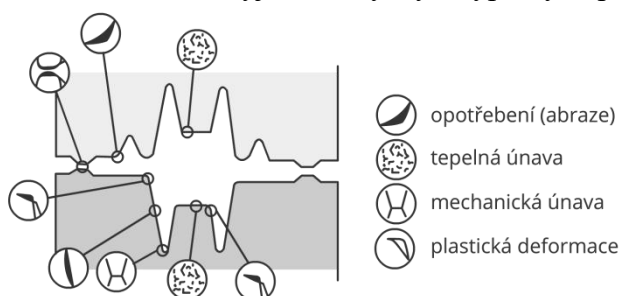
Životnost zápustky výrazně ovlivňuje produktivitu výroby a výrobní náklady. Zejména ve velkosériové výrobě výkovků je nutné používat nástroje s vyšší životností s cílem maximálního prodloužení času jejich funkčnosti a doby použití ve výrobním procesu. Častá výměna nástrojů bývá neekonomická a zbytečně prodražuje i finální výrobky.

Dle dosavadních zkušeností z průmyslové praxe vykazuje největší podíl na poruchách tvářecích nástrojů jejich opotřebení.



- a) opotřebení (adhezivní, abrazivní, oxidační),
 b) tepelná únava,
 c) mechanická únava,
 d) plastická deformace

Obr. 20 Procentuální vyjádření výskytu typických poruch tvářecích nástrojů



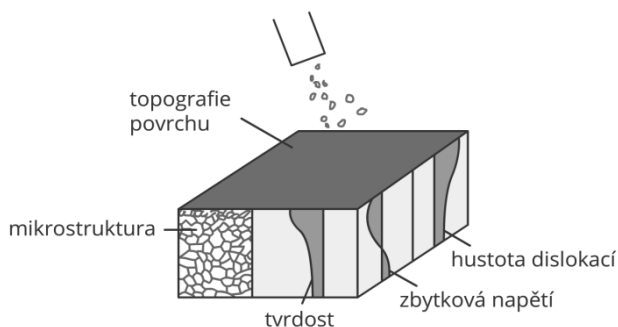
Obr. 21 Zobrazení typických poruch tvářecích nástrojů

Mezi mechanické opotřebení je zahrnuto abrazivní opotřebení, ulpívání tvářeného materiálu v zápustce (adheze) a lokální plastická deformaci aktivních ploch nástroje. Takto namáhané zápustky lze renovovat nebo zvyšovat jejich životnost např. snižováním jejich tvaru po vložkování.

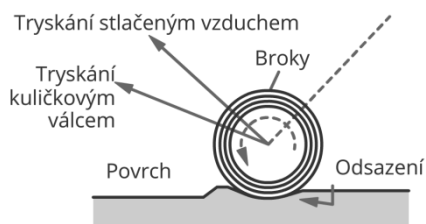
Technologie ABP (Advanced Benefit Process)

Zjednodušený princip technologie ABP spočívá v následujících procesech:

- žíhání - snížení vnitřního napětí
- tryskání povrchu - čištění povrchu dílu
- ABP (obr. 22) - je povrchová úprava prováděná za studena, využívající speciálního média dopadajícího vysokou rychlostí na povrch materiálu. Během procesu ABP dochází ke zvýšení tlakového napětí na povrchu materiálu. Případně ABP Plus (viz obr. 23), kdy je povrch navíc nitridován/oxidován.



Obr. 22 Znázornění obecného principu Plus technologie ABP



Obr. 23 Znázornění principu technologie ABP

Autor Chang ve svých výzkumech realizovaných na oceli AISI H13 došel k závěru, že použití metody ABP dojde ke zvýšení životnosti nástrojů pro tlakové lití a zápuskové kování, jelikož indukované napětí zvýší pevnost materiálu, odolnost vůči únavovému lomu, praskání a odolnost proti opotřebení.

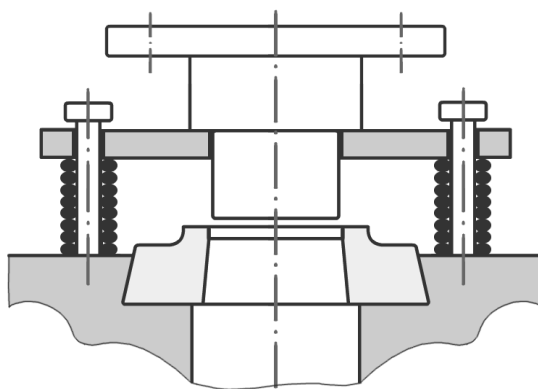
2. 4. 8. ZÁVĚREČNÉ OPERACE KOVÁNÍ

U výkovků je nutno děrovat předkované otvory (vystříhnout blány) a ostříhnout výronky. Mezi základní operace provádějící se u výkovků:

- **za tepla:**
 - ostříhování a děrování: výkovky hmotnější, větších rozměrů, výkovky z uhlíkových ocelí ($C > 0,45 \%$),
 - rovnání: uskutečňuje se v samostatné zápusťce shodných rozměrů dokončovací dutiny, avšak bez výronkové drážky; větší výkovky,
 - ohýbání a kalibrování.
- **za studena:**
 - ostříhování a děrování: výkovky menších rozměrů a zpravidla z nízkouhlíkové oceli a rovněž výkovky, které se při stříhání za tepla deformují,
 - rovnání: menší výkovky, výkovky, které se deformují tepelným zpracováním; provádí se v samostatných zápusťkách, jejichž dutiny se korigují s ohledem na teplotu $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

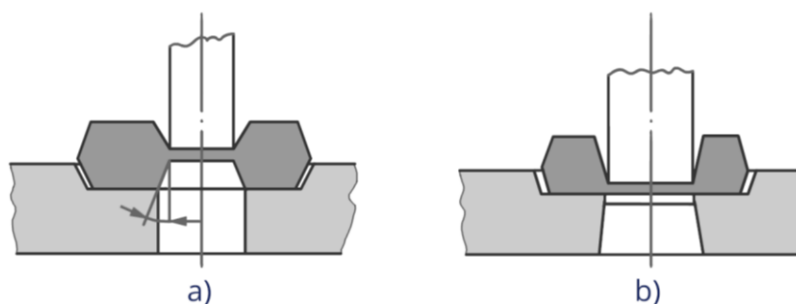
Rovnění za tepla je výhodnější než za studena, s ohledem na konečné mechanické vlastnosti a materiálovou strukturu výkovku.

Operace se provádí na ostříhovacích excentrických nebo klikových lisech a hydraulických (pro střížné síly $F_s > 5\text{ MN}$). Ostřížení a děrování se provádí postupně nebo na jeden zdvih lisu v tzv. sloučeném nástroji. Střížnice pro ostříhování se zhotovují podle obrysu výkovku v dělicí rovině. Nekruhové výkovky se ostříhují dělenými střížnicemi, které jsou složeny z jednotlivých segmentů. Příklad ostříhovacího nástroje, který je opatřen stěračem s odpružením a je na obr. 24.



Obr. 24 Schéma ostříhovacího nástroje [7]

Při děrování předkovaných otvorů se vůle mezi střížníkem a střížnicí volí dle umístění blány a navíc musí střížnice zajistit vystředění výkovku, obě možnosti jsou uvedeny na obr. 25.

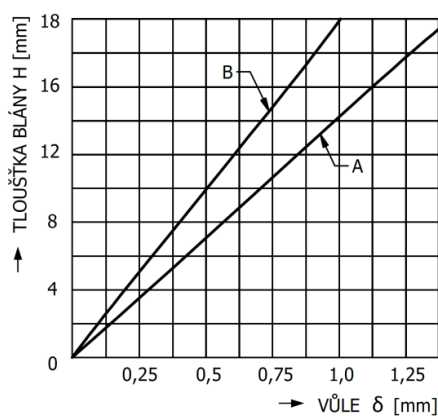


a) pro střížnou vůli $(0,5 \div 3)$ mm

b) pro střížnou vůli $(0,5 \div 1)$ mm, kdy se střížník zasouvá do dutiny střížnice

Obr. 25 Schéma děrování

Další z možností určení hodnot střížné vůle při děrování výkovků je použití grafu na obr. 26.



A – děrování za studena a nízkouhlíkatých ocelí, B – děrování za tepla a konstrukčních ocelí

Obr. 26 Graf pro určení vůle pro děrování [7]

Výkovky z běžných ocelí, slitinových ocelí (nerez) se **tepelně zpracovávají** a to:

- **žiháním** – výkovek se ohřeje na teplotu nad A_{c1} z důvodu odstranění napětí, snížení tvrdosti a tím zlepšení obrobitelnosti,
- **normalizačním žiháním** – při ohřevu výkovku nad teplotu A_{c3} se dosáhne velmi jemnozrnné struktury. Používá se pro výkovky, které mají být zušlechťeny na předepsanou tvrdost.

Po vykování jsou na výkovku okraje, které se musí odstranit a tím se výkovek očistí, aby se zabránilo poškození nástrojů pro kalibrování. Usnadní se tak třískovému obrábění a kontrole povrchu výkovku. Proces obsahuje:

- **moření** (např. v kyselině solné s vodou po dobu $4 \div 8$ h, následuje neutralizace vodou a vápenným mlékem),
- **otryskávání** (broky v lamelových bubnech, které zacelí drobné prasklinky),
- **omílání** (kovové hvězdice v bubnech pro malé výkovky).

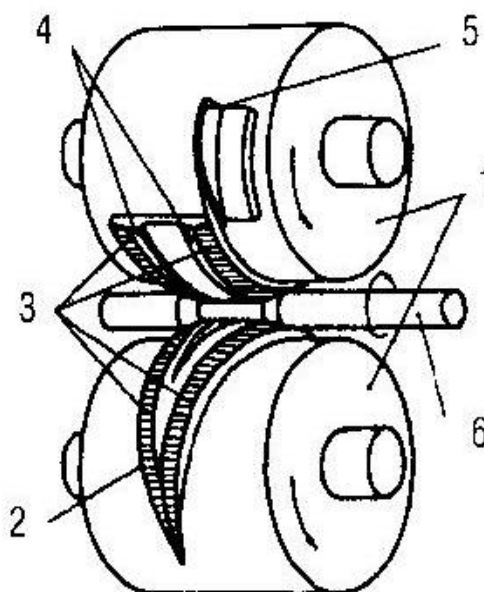
K závěrečným operacím, jejichž cílem je zvýšení objemové i rozměrové přesnosti výkovků, patří:

- **kalibrování** – je prováděno za tepla ihned po ostřížení výronku (při jednom ohřevu) nebo po doplňkovém ohřevu. Upravuje se také stav povrchu. Může do jisté míry nahradit přesné bezvýronkové kování, protože kalibrovací dutina je přesnější než dutina dokončovací,
- **ražení** – je prováděno za studena k dosažení zpřesnění výškových rozměrů výkovků v předepsaných místech. Provádí se po tepelném zpracování, odstranění okrajů a po rovnání za studena.

2. 5. DALŠÍ ZPŮSOBY KOVÁNÍ

2. 5. 1 PŘÍČNÉ KLÍNOVÉ VÁLCOVÁNÍ (PKV)

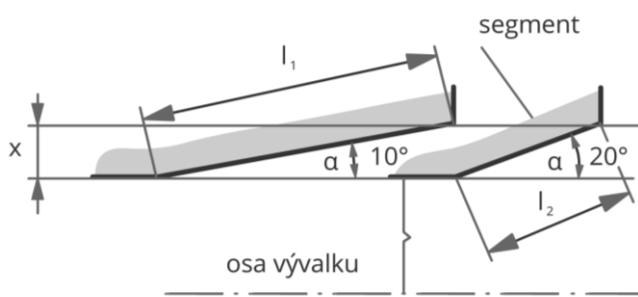
Pro výrobu součástek tyčových, osově symetrických, s členitým nebo s osazovaným tvarem povrchu se používá technologie příčného klínového válcování. Součástky typu např. kulové čepy, hřídele, poloosy se následně třískově obrábějí. Na obr. 27 je zobrazen princip příčného klínového válcování a dále je znázorněn zahřátý přířez tyče (6), otáčející se mezi dvěma souhlasně rotujícími válci (1), na jejichž obvodu jsou upnuty klínové nástroje (segmenty - 2, 3, 4). V průběhu několika otáček polotovaru segmenty ve tvaru klínů jeho průměr tvarují, přebytek materiálu je axiálně přemísťován, vývalek se prodlužuje.



1 - válce, 2 - tvářecí segment, 3, 4 - vyrovnávací plochy, 5 - ostříhovací nůž, 6 - tvářený materiál

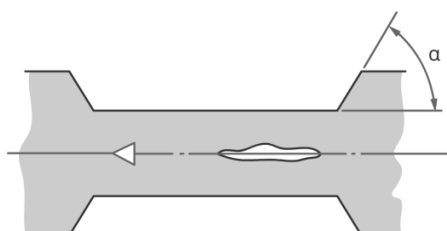
Obr. 27 Princip příčného klínového válcování

Rozhodujícími parametry procesu jsou redukce a úhly α a β . Souvislosti mezi parametrem redukce x a úhlem α z hlediska velikosti plochy tvářeného úseku znázorňuje obr. 28, kde je uveden vztah redukce a úhlu α .



Obr. 28 Vztah redukce a úhlu α [7]

Nevyváženost mezi hodnotami těchto parametrů může vést ke vzniku vnitřních defektů, osových trhlin, jak je zobrazeno na obr. 29.



Obr. 29 Defekt na vývalku

Na strojích příčného klínového válcování je možné zhotovit vývalky, např. s průměrem $(35 \div 100)$ mm s délkou až 750 mm. Výhodou je velká produktivita práce související s poloautomatickým chodem linky, jejíž součástí je zásobník tyčí, indukční ohřev a vlastní válcovací stroj.

Nástroje PKV jsou:

- standardně vyráběny z oceli 1.2344 (ČSN 19 544),
- zušlechťeny na cca 46 ± 2 HRC (před zušlechtěním se polotovary segmentů žíhají k odstranění vnitřního napětí),
- finální tvar se obrábí už do zakaleného segmentu, čímž se minimalizuje jeho deformace,
- po odladění tvaru nástrojů (válcováním na zkušebním stroji) se nástroje nitridují do hloubky cca $0,3 \div 0,4$ mm.

Opravy nástrojů PKV

- standardně se po opotřebení, tzn. po cca 50 000 až 100 000 vývalcích, nástroje snižují na CNC strojích o $2 \div 3$ mm,
- v případě nutnosti se nástroje opravují také navařováním např. pro opravu délek, nekvality při výrobě, při velkém opotřebení a pod,
- každý zásah navařováním způsobuje snížení životnosti a přídavnou deformaci segmentů, proto se opravy navařováním provádí jen výjimečně, nelze je provádět na nitridovaných plochách nástroje;
- v případě opravy nanitridovaných ploch se musí tyto plochy před navařováním odstranit nejčastěji vybrušením. V případě navařování se využívá tradiční technologie ručního navařování klasickou elektrodou EB 503, odpovídá DIN 855-1.

Možnosti strojů pro příčné klínové válcování z přířezu průměr x délka:

a) ULS 70 + ULS70R + ULS70RB + ULS70RA1 atd.

- max. délka polotovaru standart 300 mm (lze prodloužit i na 400 mm),
- max. průměr polotovaru 70 mm,
- min. průměr polotovaru standard 35 mm (je omezeno jen zakladačem stroje a lze tedy i zmenšit).

b) ULS100 + ULS100RA + ULS100RB + ULS100RA1 atd.

- max. délka polotovaru standard 500 mm (lze prodloužit i na 600 mm),
- max. průměr polotovaru 100 mm (ve zvláštních případech až 110 mm),
- min. průměr polotovaru standard 40 mm (je omezeno jen zakladačem stroje a lze tedy i zmenšit).

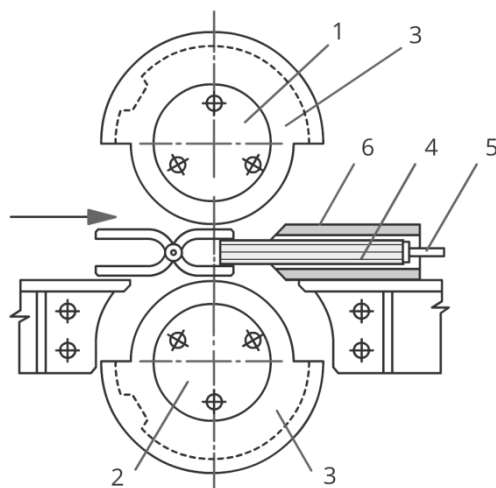
c) ULS160R + ULS160RA

- max. délka polotovaru standard 500 mm (lze prodloužit i na 600 mm),
- max. průměr polotovaru 160 mm (zatím největší vývalek vyválcován průměr 155 mm),
- min. průměr polotovaru standard 50 mm (je omezeno jen zakladačem stroje a lze tedy i zmenšit).

d) ULS60 + ULS 55 (ULS55 Šmeralovy závody v Brně již nevyrábí).

2. 5. 2 KOVÁNÍ NA KOVACÍCH VÁLCÍCH

Při kování na kovacích válcích se s vysokou výkonností zhotovují předkovky výkovků, které mají protáhlé tvary a velké rozdíly průřezů. Tvary výkovků se přibližují geometrií ideálním předkovkům. Princip procesu je na obr. 30.



- 1, 2 – základní válce,
- 3 – vyměnitelné zápustky – segmenty,
- 4 – tvářený polotovár,
- 5 – zařízení pro posuv polotovaru směrem k obsluze,
- 6 – vodící zařízení

Obr. 30 Schéma kovacích válců

Válce se otáčejí rychlostí cca. $60 \text{ otáček} \cdot \text{min}^{-1}$, polotovarem bývá tyčový přířez kruhového nebo čtvercového průřezu. V případě složitějších tvarů se dává přednost postupovému válcování v několika dutinách, segmentech, uložených vedle sebe.

2. 5. 3. ROTAČNÍ KOVÁNÍ

Technologie rotačního kování za tepla je užívána pro výrobu delších dílců kruhového nebo čtyřúhelníkového (čtvercového či obdélníkového) průřezu. Lze vyrobit dílce větších rozměrů kovaných za tepla, ale i menší kované za studena, např. různě osazované hřídele, poloosy, duté hřídele a duté dílce s lokálním zaškrcením.

Tváření je realizováno dvěma až čtyřmi kovadly, která jsou ovládána krátkozdvihovým pákovým, excentrickým či klikovým mechanismem, polotovár je redukován (prodlužován), u dutých dílců též přemísťován dovnitř.

Výhodou rotačního kování je čtyř až šestinásobná produktivita oproti kování na bucharech. Další výhodou je značná úspora materiálu, s čímž souvisí poměrně velká přesnost výkovků a malé přídavky na obrábění.

2. 6. KOVÁNÍ SPECIÁLNÍCH SLITIN

Slitiny se zhoršenou plastičností, např. vybrané Al slitiny, Ti slitiny, žárovevné slitiny a slitiny speciálních ocelí, vyžadují specifické termomechanické podmínky při kování. Dále také dosažení rovnoměrného rozložení jemnozrnné struktury ve všech částech výkovku.

Jde např. o tyto podmínky:

- dodržování úzkého teplotního rozsahu kování,
- vzájemnou vazbu mezi teplotou kování a stupněm deformace,
- vzájemnou vazbu mezi lokální teplotou výkovku, rychlostí deformace, resp. stupněm deformace v daném objemu,
- citlivost slitin na stav napjatosti,
- řešení otázek spojených s tepelnou roztažností materiálů, jejich afinitou k plynům,
- volba mazání.

S tím souvisí odlišnost konstrukce výkovků, zápustek a jejich dutin, volba vhodného tvářecího zařízení a způsobu ohřevu.

LITERATURA:

1. KRÍŽ, Rudolf a Pavel VÁVRA: Strojírenská příručka. Scientia, spol. s r. o., Praha, 1998, 8. sv., část V. Tváření, ISBN: 80-7183-054-2.
2. KOCMAN, Karel a kol. Aktuální příručka pro technický úsek. 15. ed. Praha: Verlag Dashöfer, SAMEK, Radko: Část 8 - Tváření. 122 s. 1998. ISBN 80-902247-2-5.
3. DVOŘÁK Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. Technologie tváření. Plošné a objemové tváření. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s. r. o., 3. vydání 2013. 169 s. ISBN 978-80-214-4747-9.
4. HLUCHÝ, Miroslav, KOLOUCH, Jan a Rudolf PAŇÁK. *Strojírenská technologie 2*. 1. vyd. Praha: Scientia, s. r. o., 1998. 316 s. ISBN 80-7183-117-4.
5. Komorové pece pro ohřev v kovárnách. *Průmyslové pece E-therm TZ* [online]. Klatovy: E-therm TZ, 2011 [cit. 2021-6-4]. Dostupné z: <https://www.ethermtz.cz/vyroby/komorove-pece-pro-ohrev-v-kovarnach/>
6. BABOR, Karel, Jan FIALA a Augustin CVILINEK. Objemové tváření ocelí. Praha: SNTL, 1967, 332 s. Řada strojírenské literatury.
7. FABÍK, Richard. Tváření kovů: učební text: studijní materiály pro studijní program Metalurgické inženýrství Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012, 333 s. ISBN 978-80-248-2572-4.

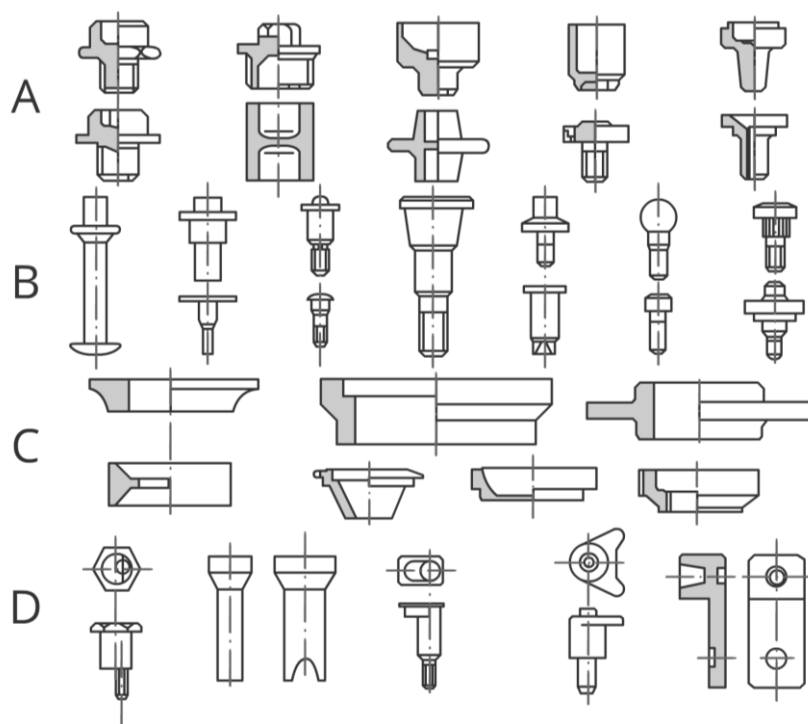
8. ELFMARK, Jiří. Tváření kovů. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1992. ISBN 80-03-00651-1.20.
9. ČSN 22 8308. *Zápustky pro buchary. Směrnice pro konstrukci: Směrnice pro konstrukci.* Praha: Vydavatelství ÚNM Praha, 1971.
10. BENEŠ, Milan a Bohumil MAROŠ. Křivky přetvárných odporů ocelí. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986, 228 s. Poradenská příručka.
11. FAJT, Josef, NOVÝ, Z., ŠUCHMANN, P.: Moderní materiálová řešení pro zvýšení životnosti kováčích zápustek. Sborník přednášek 5. Kovářenská konference, Ostrava: Svaz kováren ČR, Květen 2005, s. 123-128
12. Technologie ABP a ABP Plus. Kalírna Voestalpine High Performance Metals [online]. 2021 [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: <https://www.voestalpine.com/...pdf>
13. CHANG, S. H, LEE, S., Ch., TANG, T., P.: Effect of Shot Peening Treatment on Forging Die Life [online]. 2021 [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: <https://www.jstage.jst.go.jp/...pdf>

3. VYBRANÉ TECHNOLOGIE TVÁŘENÍ ZA STUDENA

Objemové tváření za studena je moderní, hospodárná a vysokoproduktivní metoda výroby strojních součástí. Poskytuje jakostní výrobky a představuje optimální náhradu obráběním součástek, jako jsou: šrouby, svorníky, matice, aj. Kvalitní zpevněný povrch a usměrněná nepřerušovaná vlákna zvyšují únavovou pevnost. K objemovému tváření za studena patří zejména technologie:

- **pěchování** (např. přířezů z tyčí),
- **protlačování** (dopředné, zpětné, sdružené, stranové),
- **redukování** (např. tyčí, drátů),
- **vtlačování** (např. tváření funkčních dutin nástrojů),
- **doplňkové metody tváření povrchů** (např. ražení, válcování závitů a drážek).

Vybrané tvary součástí, které se vyrábí pěchováním, protlačováním a zejména jejich kombinací, jsou znázorněny na následujícím obr. 31. Jedná se o součásti tvaru kalíšků, pouzder (viz obr. 31 A), prstenců (viz obr. 31 C), čepů (viz obr. 31 B) a tvary členité a nepravidelné (viz obr. 31 D). Mohou mít povrch stupňovitý, přírubby, proměnnou tloušťku, u komplikovaných tvarů jsou navíc boční výstupky, hranaté obrysy.



Obr. 31 Příklady součástek tvářených za studena

Hmotnost protlačků se pohybuje od několika gramů až do 20 kg. Parametry struktury povrchu závisející na stavu povrchu nástrojů (protlačovadel) jsou v mezích $R_a = 0,4 \div 12,5 \mu\text{m}$.

3.1. POŽADAVKY NA MATERIÁLY

Ocel má být velmi tvárná, tomu odpovídá struktura feriticko-perlitická (perlit má být globulární). Nejvýhodnějším stavem oceli je žihání na měkko, případně kombinace normalizačního žihání (dosažení jemného zrna) a žihání na měkko (dosažení tvárnosti). Materiály mají mít co nejmenší mez kluzu, co nejvyšší tažnost, nízký obsah uhlíku, fosforu, síry a nekovových vměstků.

Neželezné kovy mají dobré tvárné vlastnosti, pokud jsou čisté. Např. hliníkové či měděné polotovary lze protlačovat s celkovým poměrným přetvořením až 90 % (měď ale dosti zpevňuje). Slitiny vykazují zhoršenou tvárnost, např. některé bronzы, mosazi, slitiny hořčíku, které je třeba vyžíhat.

Výchozím polotovarem jsou špalíky kruhového průřezu a kaloty, které se získají dělením tyčí resp. drátů stříháním nebo řezáním. Čela těchto špalíků je nutné zarovnat většinou první operací – tzv. kalibračním pēchováním.

Proces protlačování provází tření, proto je nutné použít mazivo, které zabraňuje zadírání nástrojů. Tím se sníží deformační odpor a zvýší se kvalita povrchu protlačků.

Ocelové polotovary a obtížně tvařitelné oceli se před protlačováním fosfátují. Nejdříve se odmastí, očistí se povrch a potom následují fosfátování a mydlení. Antikorozi oceli se oxalátují nebo pokovují mědí či zinkem. U hliníku a jeho slitin se používají vysokoviskózní oleje, zinkové stearáty nebo stearát sodný. Čistá měď nevyžaduje mazání, ale u slitin se používá např. zinkový stearát.

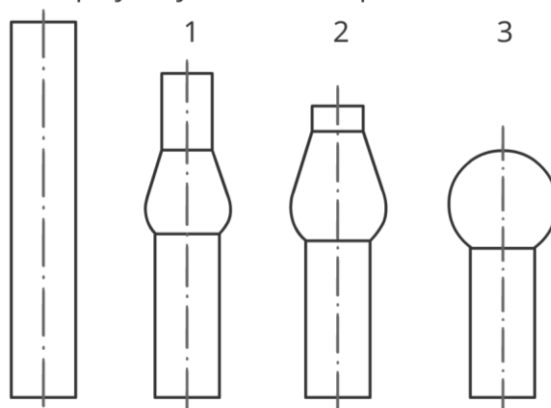
3.2. PĚCHOVÁNÍ

Pēchováním se zmenšuje výška výchozího polotovaru a současně se zvětšuje velikost příčného průřezu. Deformace v celém objemu je v důsledku tření nerovnoměrná, vzniká soudkovitý tvar. K zabránění vzniku trhlin v oblasti největšího průměru se polotovar maže a funkční plochy nástrojů jsou leštěny.

Pēchování se využívá:

- jako samostatná operace při výrobě hlav šroubů, nýtů, čepů, matic, kuliček, tvarovaných osazení, apod. (viz obr. 32),
- jako pomocná operace, např. kalibrace průměru a zarovnání nerovných čel špalíků dělených stříháním, které se následně protlačují,
- v kombinaci s protlačováním.

Postup výroby kulového čepu:



Obr. 32 Příklad dílce vyrobeného pēchováním

Mírou velikosti přetvoření při pēchování je stupeň deformace, který se vyjadřuje skutečným (logaritmickým) přetvořením φ , daným vztahem:

$$\varphi = \ln \frac{H}{H_0} \quad [-] \quad (3)$$

kde: H_0 - počáteční průměr špalíku [mm]

H - konečný průměr špalíku [mm]

Jeho hodnota se dá zjistit z aproximačních křivek přirozeného přetvárného odporu, které se získají z pēchovacích zkoušek nebo z materiálové databáze.

Pēchovací síla se stanoví ze znalosti tlaku působícího ve směru osy na plochu polotovaru:

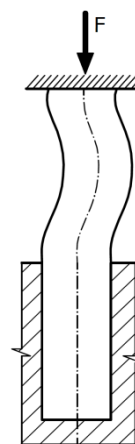
$$F = \sigma_p \cdot \left(1 + \mu \cdot \frac{D_0}{H_0}\right) \quad [\text{MPa}] \quad (4)$$

kde: σ_p - přirozený přetvárný (deformační) odpor materiálu [MPa], který je dán stupněm deformace $\varphi = \ln \frac{H}{H_0} [-]$.

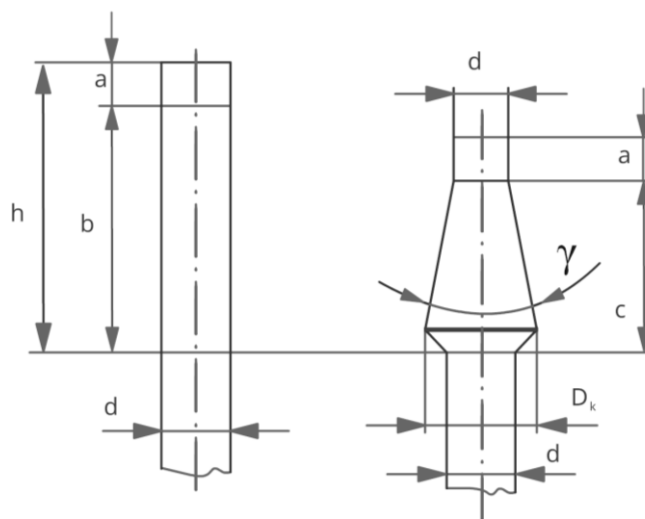
Štíhlostní poměr $\frac{H_0}{D_0}$ je kritériem vybočení, ztráty vzpěrné stability polotovaru (viz obr. 33).

Je-li $\frac{H_0}{D_0} < (2,3 \div 2,5)$ – součást lze pēchovat v jedné operaci. Je-li v intervalu $2,3 < \frac{H_0}{D_0} < 4,5$ – součást lze pēchovat ve dvou operacích (předpēchování, pēchování).

Obr. 33 Vybočení polotovaru s velkou štíhlostí [7]



Ukázka předpěchování hlavy jako první technologické operace v procesu pěchování je na obr. 34.



Obr. 34 Předpěchování hlavy dříku

Při každém úderu se předpěchuje výška pěchované části h , odpovídající hodnotě $2d$. Při pěchování se použije tvaru předpěchovacího kužele o velikosti úhlu $\gamma = 18^\circ \div 20^\circ$. Průměr základny kužele D_k se volí v rozmezí $(1,45 \div 1,65) \cdot d$. Volná pěchovaná délka je dána vztahem $b \approx 2,7 d$, je-li velká, čep vybočuje; je-li malá, čep se těžko dopěchuje.

3. 3. PROTlačOVÁNÍ KOVŮ ZA STUDENA

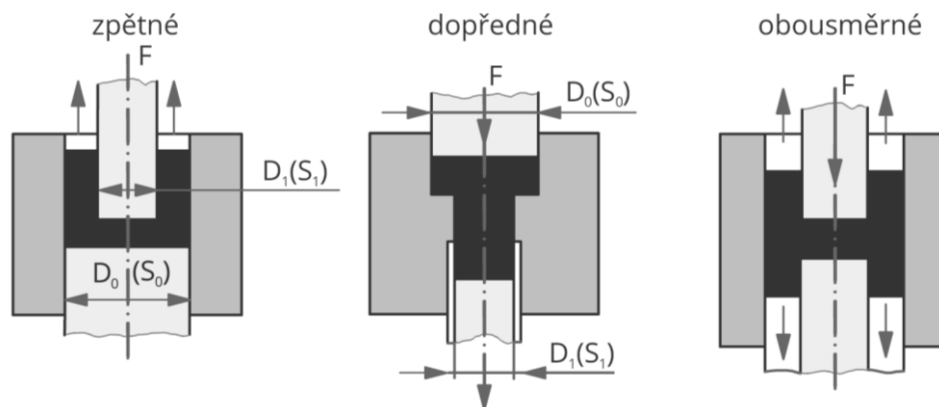
3. 3. 1. ROZDĚLENÍ A ČINITELE OVLIVŇUJÍCÍ PROCES PROTlačOVÁNÍ

Protlačování probíhá jako objemové tváření pod rekrytizační teplotou za působení prostorové napjatosti, která vytváří podmínky pro velké trvalé deformace bez porušení materiálu. Dosahuje se minimálního odpadu, zvýšení mechanických vlastností tvářené součásti, vyšší meze kluzu a pevnosti, nepřerušný průběh vláken a tím i zvýšení meze únavy výlisku.

Mezi základní způsoby protlačování se zahrnuje:

- a) **zpětné protlačování** – materiál se pohybuje proti směru průtlačníku. Výchozím polotovarem je špalík (kalota) kruhového nebo čtvercového průřezu, vznikající součást má zpravidla tvar kalíšku.
- b) **dopředné protlačování** – materiál teče ve směru pohybu průtlačníku otvorem průtlačnice. Vznikají součásti plné i duté, s přírubou či bez příruby; závisí na tvaru výchozího polotovaru (špalík, kalíšek, trubka, prstenec).
- c) **sdužené (obousměrné, kombinované) protlačování** – je kombinací zpětného a dopředného protlačování. Materiál teče ve směru i proti směru pohybu průtlačníku. Podmínkou je, aby ve směru pohybu průtlačníku byl volen menší stupeň přetvoření.
- d) **stranové protlačování** – se uskutečňuje přemísťováním materiálu ve směru kolmém k podélné ose polotovaru. Vytváří se tak výstupky na obvodu určité části výlisku.

Ukázka principů technologií protlačování (viz obr. 35):



a) zpětné protlačování, b) dopředné protlačování c) sdružené/obousměrné protlačování

(plný polotovar, kalíšek, dutý polotovar)

Obr. 35 Způsoby protlačování

Počet tvářecích operací závisí na složitosti konečného tvaru, tvařitelnosti materiálu, vhodné kombinaci protlačování a pěchování. Vychází se z přípustné poměrné deformace polotovaru pro jednotlivé způsoby tváření, maximální hodnoty pro oceli jsou:

- zpětné protlačování $\varepsilon < 0,75$
- dopředné protlačování $\varepsilon < 0,80$
- pěchování $\varepsilon < 0,80$

Tyto maximální hodnoty přetvoření značně zatěžují nástroje, což způsobuje snížení jejich životnosti. Proto je vhodné rozložit celkové přetvoření φ_c na několik stupňů, realizovaných ve zvoleném počtu operací a celkové logaritmické přetvoření lze psát ve tvaru:

$$\varphi_c = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 \quad [-] \quad (5)$$

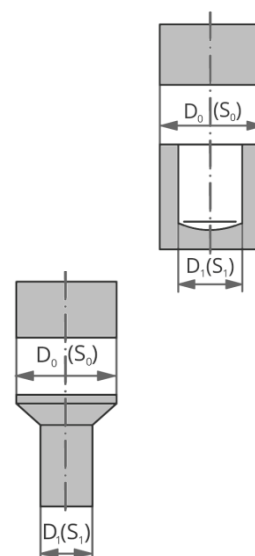
Logaritmické přetvoření těles kruhových průřezů dle druhu protlačování lze stanovit pro:

- **zpětné protlačování dutého tělesa:**

$$\varphi = \ln \frac{S_0}{S_0 - S_1} = \ln \frac{D_0^2}{D_0^2 - D_1^2} \quad [-] \quad (6)$$

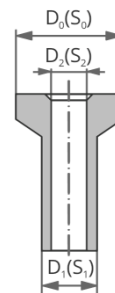
- **dopředné protlačování plného tělesa:**

$$\varphi = \ln \frac{S_0}{S_1} = \ln \frac{D_0^2}{D_1^2} \quad [-] \quad (7)$$

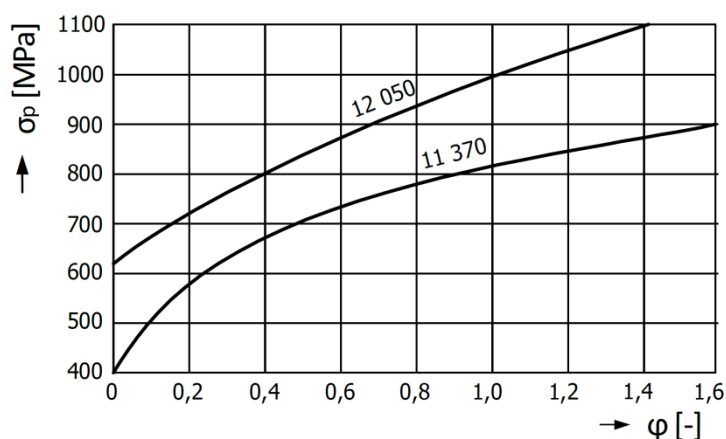


- dopředné protlačování dutého tělesa:**

$$\varphi = \ln \frac{S_0 - S_2}{S_1 - S_2} = \ln \frac{D_0^2 - D_2^2}{D_1^2 - D_2^2} \quad [-] \quad (8)$$



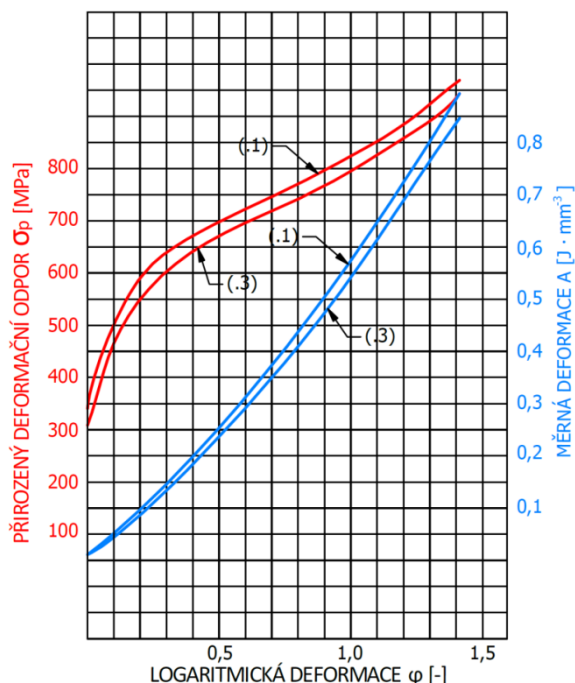
Výsledné zpevnění všech úseků protlačků má být stejné, stanovuje se pomocí křivek zpevnění jednotlivých druhů materiálu, které lze získat pýchovací zkouškou (viz obr. 36)



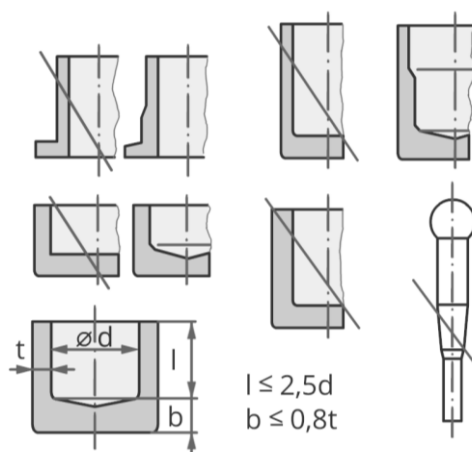
Obr. 36 Křivky zpevnění oceli ČSN 11 370, 12 050

Protlačovací síla se pro jednotlivé způsoby protlačování stanovuje ze vztahů uvedených v normě ČSN 22 0075 s využitím diagramu přirozeného přetvárného odporu (viz obr. 37).

Při návrhu geometrie protlačku se musí respektovat optimální tvary s cílem snížit namáhání nástrojů, které vede k otěru či destrukci. Protlaček nemá mít ostré přechody nebo změny příčných průřezů, protože zabraňují toku materiálu, porušují vlákna, zvyšuje se tvářecí síla. Používají se přechodová zesílení a náběhové úhly (pro dopředné protlačování se volí náběhový úhel kužele $2\alpha = 30^\circ \div 60^\circ$). Dlouhý kužel otvorů nebo dříků způsobují zvýšení síly a nebezpečí zadírání protlačku. Tomu lze zabránit odstupňováním dříku. Dalším problémem mohou být tenká dna, která vedou k natržení materiálu a hluboké otvory, které zvyšují potřebnou tvářecí sílu. Příklady tvarů protlačků jsou na obr. 38.



Obr. 37 Křivky přirozeného deformačního odporu [7]

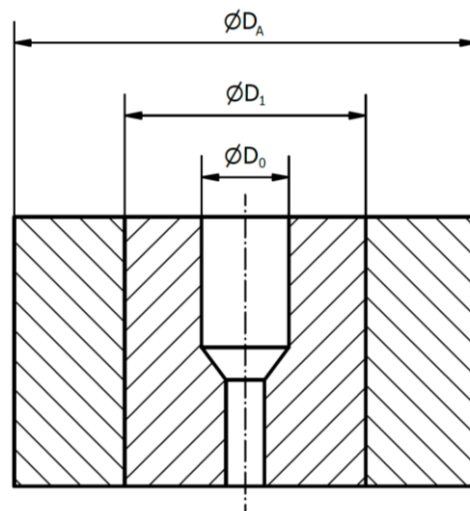


Obr. 38 Doporučené tvary protlačků

3.3.2 ZDĚŘOVÁNÍ PRŮTLAČNIC

Zděřování umožňuje vytvořit celek, který snese vysoké namáhání průtlačnic a zajišťuje jejich snadnou vyměnitelnost. Tyto průtlačnice lze použít pro vnitřní tlaky $p \leq 1\,600\text{ MPa}$ (obr. 39).

Přesné rozměry průtlačnic a zděří se zjišťují pomocí výpočetní techniky v závislosti na vnitřním tlaku, materiálu nástroje a jeho tepelném zpracování. Předpětí se dosáhne postupným nalisováním průtlačnice a zděří na sebe. Přesah z_1 mezi průtlačnicí a zděří, či zděřemí z_2 se volí s přihlédnutím k vnitřnímu tlaku a bývají: $z_1 = z_2 = (0,005 \div 0,008)\text{ mm}$ na každý milimetr průměru.



Obr. 39 Zděřovaná průtlačnice

3.4 ŽIVOTNOST PROTlačOVACÍCH NÁSTROJŮ

Na délku životnosti protlačovacích nástrojů má významný vliv:

- správná volba technologie protlačování. Ta lze úspěšně ověřit využitím/pomocí simulačních programů.
- vhodný tvar a rozměry polotovaru z oceli s přihlédnutím k jeho tepelnému zpracování, kvalitě povrchové úpravy a vhodnou volbou maziva.

- konstrukce a volba funkčních částí protlačovacího nástroje s ohledem na doporučení z norem, odborné literatury a provozních zkušeností, zvláště s přihlédnutím k radiálnímu a tangenciálnímu napětí při měrných tlacích na nástroj. Volba zděrování s ohledem na materiál a tepelné zpracování a zásady provedení.
- správné seřízení nástroje v požadované přesnosti.
- volba tvářecího stroje, jeho tuhost a přesnost. Za tímto účelem se provádí monitorování za účelem sledování chodu tvářecího stroje pomocí senzorů. Odhalí se tak nestandardní proces a urychlí se pomocí dat správné nastavení lisu. Sleduje se vůle ve vedení beranu, stav ložisek apod.

LITERATURA:

1. KRÍŽ, Rudolf a Pavel VÁVRA: Strojírenská příručka. Scientia, spol. s r. o., Praha, 1998, 8. sv., část V. Tváření, ISBN: 80-7183-054-2.
2. KOCMAN, Karel a kol. Aktuální příručka pro technický úsek. 15. ed. Praha: Verlag Dashöfer, SAMEK, Radko: Část 8 - Tváření. 122 s. 1998. ISBN 80-902247-2-5.
3. DVORÁK Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. Technologie tváření. Plošné a objemové tváření. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s. r. o., 3. vydání 2013. 169 s. ISBN 978-80-214-4747-9.
4. HLUCHÝ, Miroslav, KOLOUCH, Jan a Rudolf PAŇÁK. *Strojírenská technologie 2*. 1. vyd. Praha: Scientia, s. r. o., 1998. 316 s. ISBN 80-7183-117-4.
6. BABOR, Karel, Jan FIALA a Augustin CVILINEK. Objemové tváření ocelí. Praha: SNTL, 1967, 332 s. Řada strojírenské literatury.
7. FABÍK, Richard. Tváření kovů: učební text: studijní materiály pro studijní program Metalurgické inženýrství Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012, 333 s. ISBN 978-80-248-2572-4.
10. BENEŠ, Milan a Bohumil MAROŠ. Křivky přetvárných odporů ocelí. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986, 228 s. Poradenská příručka.
14. FELDMANN, Heinz D. Protlačování oceli: určeno pro technology a konstruktéry. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962, 202 s.
15. FOREJT, Milan. *Teorie tváření*. Vyd. 2. v Akademickém nakladatelství CERM, 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. 222. s. ISBN 80-214-2764-7.

4. PLOŠNÉ TVÁŘENÍ

Plošným tvářením se vyrábí součásti (výlisky), které mohou mít velmi malé rozměry nebo velkoplošného tvaru. Jejich typickým rysem je nízká hmotnost, dostatečná pevnost i tuhost, zejména jsou-li opatřeny výztužnými lemy, žebry nebo mají uzavřené obrysové křivky (nádoby kruhové a hranaté, atd.). Nahrazují úspěšně svařované dílce a odlitky, přičemž lze uspořit 10 % až 50 % materiálu a snížit pracnost o 25 % až 75 %.

Základní výchozí polotovary pro plošné tváření jsou:

- plechy jsou dodávány → v tabulích, které se dělí stříháním na rozměrově a tvarově přizpůsobené přístřihy,
 → ve svitcích - svinuté pásy plechu, které mají značnou délku a používají se v hromadné a zpravidla automatizované výrobě výlisků z pásu, vyráběné zejména pomocí nástrojů pro plošné tváření,
- tenkostěnné profily – jsou dodávány v tyčích,
- trubky – jsou dodávány s povrchovou úpravou a tepelně zpracované žíháním.

Dle deformace lze rozlišit dva základní způsoby plošného tváření:

- deformaci s místním porušením soudržnosti materiálu (střih),
- deformace tvárné, bez porušení soudržnosti – změna tvaru se uskutečňuje bez oddělování materiálu.

Podle jednotlivých lisařských prací je možné procesy plošného tváření dle ČSN 22 6001 rozdělit na:

- **stříhání** (prosté stříhání, děrování, vystřihování, ostřihování, přistřihování, nastřihování, prostřihování, protrhávání, vysekávání),
- **ohýbání** (prosté ohýbání, ohraňování, rovnání, zakružování, lemování, obrubování, osazování – prosazování, drápkování, zkrucování),
- **tažení** (prosté tažení, tažení se ztenčením stěny, zpětné tažení, žlábkování, protahování, rozšiřování, zužování, přetahování, objemové tažení),
- **tlačení** (tlačení tvaru, rotační obrubování, rotační lemování, rotační rozšiřování, rotační zužování, rotační žlábkování, rotační drápkování, osazování - prosazování, tlačení se ztenčením stěny).

Způsoby výroby výlisků je závislý na mnoha faktorech. K nejdůležitějším faktorům patří: druh tvářeného materiálu, rozměry a požadovaná přesnost součásti, sériovost, dostupnost výrobního zařízení.

Požadavek na zdokonalení určitého technologického postupu tváření, resp. nutnost vývoje nového postupu, lze zdůvodnit čtyřmi příčinami.

Nejzřetelnější příčinou bývá skutečnost, že danou součást nelze zhotovit dosavadním technologickým postupem vzhledem k viditelným vadám (zvlnění, trhliny, apod.), které se objevují na výlisku v průběhu procesu tažení.

Druhou příčinou bývá vysoké procento skrytých vad, jež mohou zavinit porušení výlisku při následujících technologických operacích.

Třetí příčinou je nevyhovující kvalita vzhledu povrchu finálních výlisků, která spočívá v nedodržení předepsané rozměrové a tvarové přesnosti, kvality povrchu, atd.

Čtvrtou příčinou je nevyhovující ekonomie výroby, která je mimo jiné ovlivněna velikostí tvářecí síly, přípustným stupněm přetvoření použitého materiálu a procentem využití výchozího materiálu.

Celkový výrobní postup součásti tvarované plošným tvářením obsahuje přípravné a dokončovací operace. Obecný výrobní postup součásti lisované z plechu, z nízkolegované oceli, zahrnuje následující technologické operace:

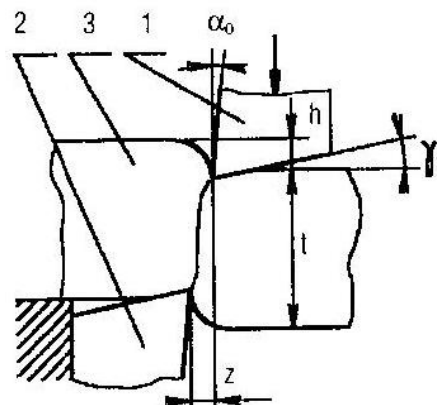
- dělení výchozího plechu,
- úpravy přístřihů (odstranění otřepů, vlnitosti u plechu rovnáním apod.),
- nanášení maziva (mechanicky nebo automaticky),
- tváření (např. tažení apod.),
- mytí a úpravy po tváření (mytí, odstranění přídavků, klempířské úpravy, atd.),
- dokončovací operace (orýsování, děrování otvorů, povrchová ochrana, atd.).

Výlisky mohou být určeny k přímému využití, např.: nádoby, stínidla osvětlení, různé kryty, konzoly, upínky, části potrubí, atd. (postupují přímo do montáže či k prodeji). Mohou být též užity v dalším výrobním procesu – pro svařování, pájení, a to do složitějších sekcí, např. kapoty automobilů.

4.1 PROCES STŘÍHÁNÍ PLECHU A JEHO PARAMETRY

Proces stříhání probíhá při dělení plechu na tabulových nůžkách. Střih nastává, vnikne-li horní (1) a spodní (2) břit nože do stříhaného materiálu (3), jak znázorňuje obr. 40.

Kvalita střížné plochy závisí zejména na velikosti střížné mezery (z), vlastnostech stříhaného materiálu (tvrdost), které mají přímý vliv na hloubku vniknutí břitu do materiálu, kvalitě střížného nástroje, způsobu stříhání, aj.



Obr. 40 Schéma procesu stříhání

Hloubka vniknutí břitů do materiálu bývá:

- tvrdý a křehký materiál: $h = 10 \% t$
- měkký a houževnatý materiál: $h = 60 \% t$

Těsně před porušením soudržnosti dosahuje střížná síla F svého maxima. Stříh proběhne podél linie „S“, která je čarou maximálního smykového napětí daného materiálu. Hodnota střížné síly je dána vztahem:

$$F_s = k \cdot S \cdot \tau_{ps} = k \cdot l \cdot t \cdot 0,8 \cdot R_m \quad [\text{N}] \quad (7)$$

kde: τ_{ps} - pevnost materiálu ve smyku: $\tau_{ps} \cong 0,8 \cdot R_m [\text{MPa}]$

S - plocha roviny stříhu: $S = l \cdot t [\text{mm}^2]$

l - délka stříhu (obvod všech stříhaných částí) [mm]

t - tloušťka stříhaného materiálu [mm]

$k = 1,2 \div 1,55$ - koeficient zahrnující vliv nestejné tloušťky materiálu, velikosti střížné mezery (z), vliv otupení břitů [-]

Velikost střížné mezery (tj. poloviční vůle) mezi střížníkem a střížnicí je závislá na mnoha činitelích, především na druhu materiálu a jeho tloušťce. Obvykle se stanoví v procentech tloušťky stříhaného materiálu:

$$z = (0,04 \div 0,1) \cdot t \quad [\text{mm}] \quad (8)$$

Pro plechy tloušťky $t \leq 3 \text{ mm}$:

$$z = c \cdot t \cdot 0,32 \cdot \sqrt{\tau_{ps}} \quad [\text{mm}] \quad (9)$$

kde: c - součinitel závislý na druhu stříhaného materiálu [-], $c = 7 \cdot 10^{-4}$

Pro plechy tloušťky $t > 3 \text{ mm}$:

$$z = (1,5 \cdot c \cdot t - 0,0015) \cdot 0,32 \cdot \sqrt{\tau_{ps}} \quad [\text{mm}] \quad (10)$$

kde: c - součinitel závislý na druhu stříhaného materiálu [-], $c = 7 \cdot 10^{-4}$

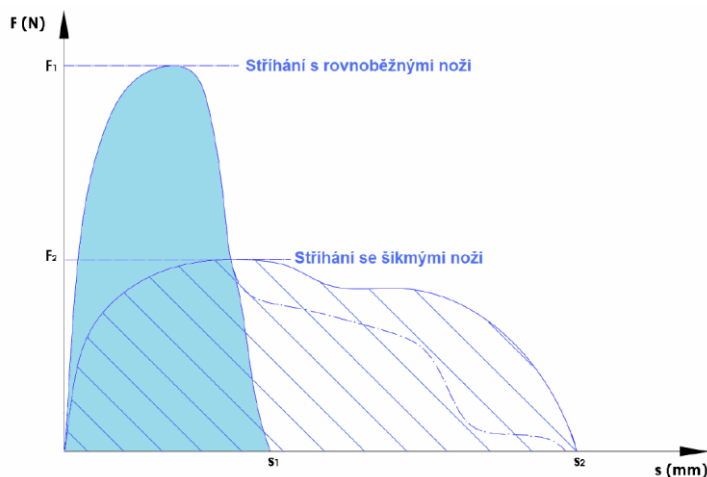
$$\text{Střížná vůle je pak dána vztahem: } v = 2 \cdot z \quad [\text{mm}] \quad (11)$$

Podbroušení nožů snižuje třecí odpory a zlepší též kvalitu střížné plochy, úhel čela bývá $\gamma_0 \approx 8^\circ \div 10^\circ$, úhel hřbetu $\alpha_0 = 1^\circ \div 3^\circ$.

4. 1. 1 DRUHY STŘÍHÁNÍ PLECHU

a) Klasický **prostý stříh** je realizován na:

- **tabulových nůžkách s navzájem rovnoběžnými noži (paralelními)** – užívají se k dělení tabulí plechu, který je ustřížen v jednom okamžiku podél celé délky. Zdvih horního nože je o málo větší než tloušťka plechu. Průběh síly odpovídá křivce a) na obr. 41.

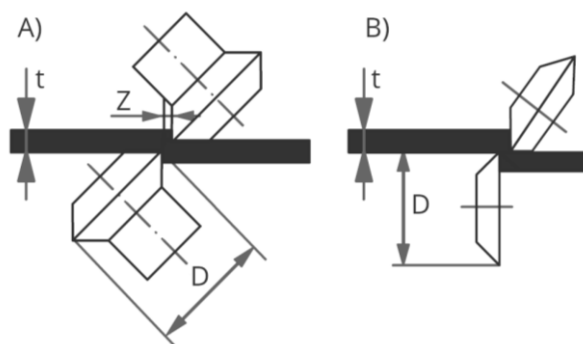


Obr. 41 Pracovní diagram stříhu

Mají mechanický či hydraulický náhon horního nože, bývají vybaveny přidržovači plechu.

- **tabulových nůžkách se šikmým horním nožem** – stříh probíhá postupně, tj. břit vniká do materiálu postupně, proto mají větší zdvih, střížná síla je menší, její průběh znázorňuje křivka b) obr. 41. Silový ráz je velmi malý, ale nevýhodou je ohyb odstříhované části plechu, která se musí v následující operaci narovnat.

- **kotoučových nůžkách** – stříhají postupně otáčejícími se noži, které bývají okružní (a) a křivkové (b) znázorněné na obr. 42.



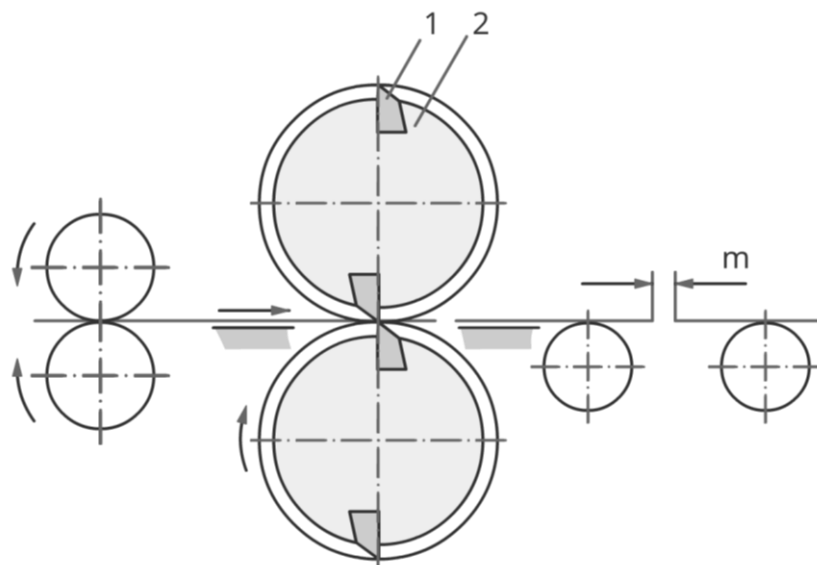
Obr. 42 Uspořádání nožů kotoučových nůžek

Křivkové nože mohou bez defektů stříhat z plechu vyduuté či silně zakřivené linie stříhu. Jsou proto užívány jak na výrobu přístřihů, tak i pro ostríhávání přídavek velkoplošných výlisků.

Vůle mezi noži bývá $0,03 \div 0,1$ mm. Průměr kotoučů se řídí tloušťkou plechu, která může být i více než 10 mm.

- **kmitacích nůžkách** – používají se k vysekávání otvorů, drážek, vystřihování křivkových tvarů

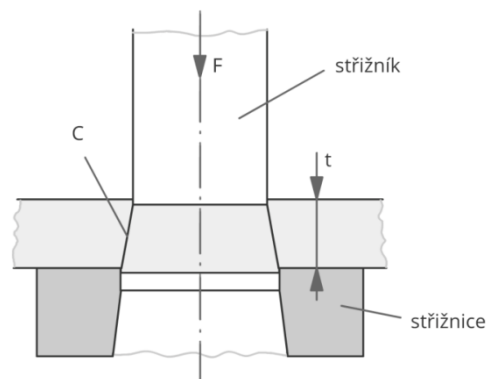
- **letmých nůžkách** (obr. 43) - používají se k dělení plechů, drátů, apod. ve válcovných a tažárnách. Stříhací nástroj je uložen na dvou vodorovných hřídelích. Hřídele jsou spolu spojeny ozubeným převodem k synchronizaci horního a spodního nože. Každý hřídel má samostatný pohon od regulačního elektromotoru. Pohon letmých nůžek je mechanicko-hydraulický. Obvodová rychlost kliky je volena tak, aby jedna otáčka kliky dala přesně definovanou délku ústřížku nebo její zlomek délky. Materiál k nůžkám je dodáván přes podávací válce.



Obr. 43 Schéma bubnových letmých nůžek
1 - nůž, 2 - buben, m - mezeru mezi odstřížky

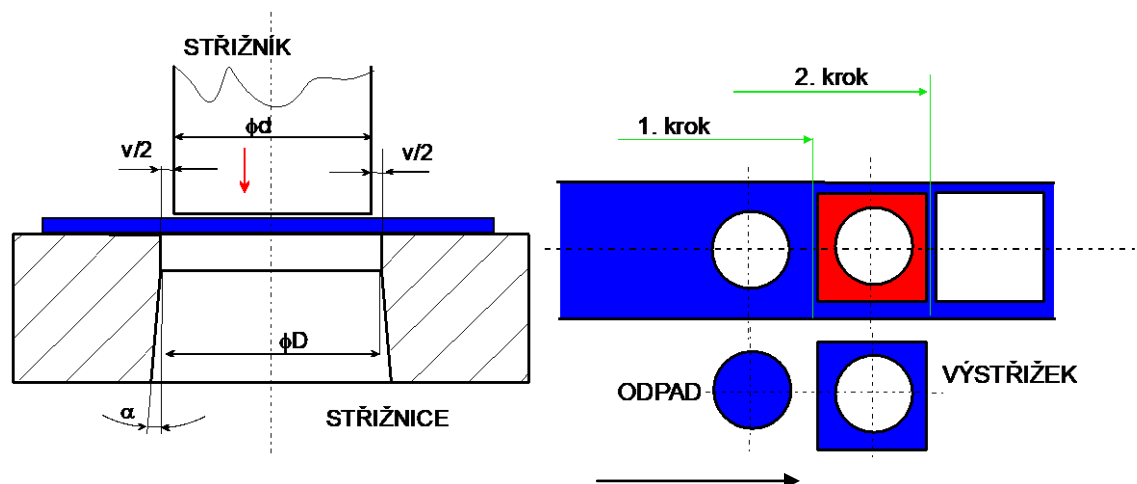
b) Vystřihování

Vystřihováním se vyrábí buď výstřížky, součástky k přímému použití, nebo přístříhy či polotovary určené k dalšímu zpracování. Hlavní částí lisovacích nástrojů (stříhadel) je pohyblivý střížník (1) a nepohyblivá střížnice (2), na jejímž čele leží plech, jak ukazuje obr. 44. Obrysový tvar její dutiny, právě tak jako střížníku, souhlasí s obrysem výstřížku. Střížník se zasouvá až do hrdla střížnice, které je opatřeno fazetkou, poněvadž musí protlačit přes její dutinu výstřížek. Mezi střížníkem a střížnicí musí být vůle, která se volí dle druhu stříhaného materiálu a ovlivňuje kvalitu střížné plochy, přesnost výstřížku, velikost střížné síly a životnost nástroje. Obecně platí, že větší vůle znamená snížení kvality střížné plochy, zejména u měkkého materiálu, na druhé straně však také zmenšení tření a otěru hrdla střížnice.



Obr. 44 Princip stříhadla pro vystřihování

Stříhadla se člení na **jednoduchá, postupová, sloučená** atd. (viz normy ČSN), rozdíl je v tom, vyrábí-li se výstřížek v jedné či více operačních polohách. Princip činnosti postupového stříhadla uvádí obr. 45.



Obr. 45 Schéma postupového stříhadla

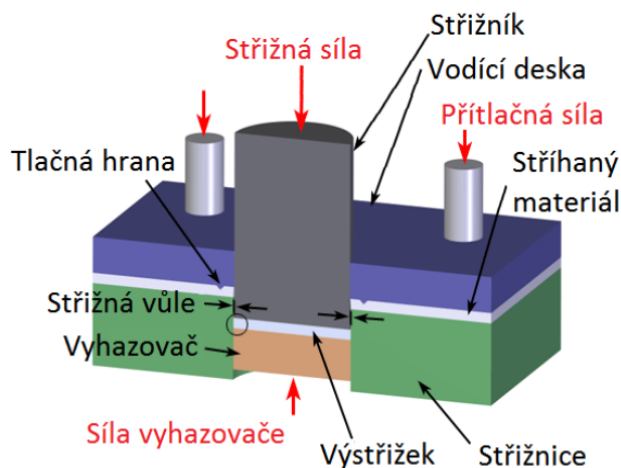
Polotovarem je zpravidla pás, který je automaticky podáváný. Minimální odpad je zaručen optimálním posuvem a orientací výstřížku.

c) Děrování

Nástroje (děrovač) pracují stejným principem jako stříhadla. Výrobkem je otvor, kterým se opatřují jak vylisky, výstřížky, tak i např. svařence. Jde o otvory kruhové a zejména pak profilové. Střížná plocha obsahuje mikrotrhliny, resp. otřepty.

d) Přesné stříhání

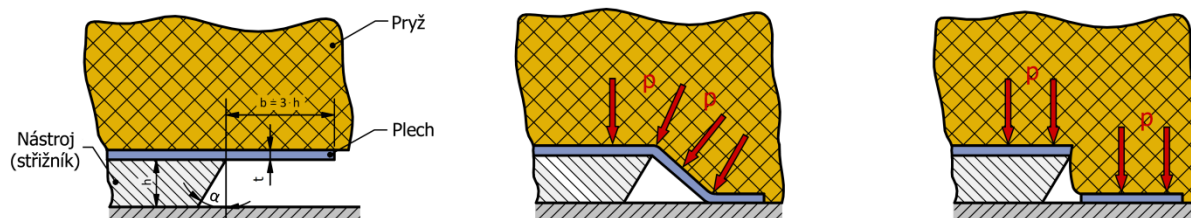
Slouží k výrobě velmi přesných výstřížků nebo otvorů, které se dále neopracovávají, vzhled povrchu je srovnatelný s obráběnými plochami, jde o hodnoty $R_a = 0,8 \div 1,6 \mu\text{m}$. Princip spočívá ve změně charakteru stavu napjatosti v oblasti stříhu, který se získá pomocí nátláčných hran a tlaku horního i spodního střížníku, viz obr. 46.



Obr. 46 Princip přesného stříhu

e) Stříhání nepevným nástrojem

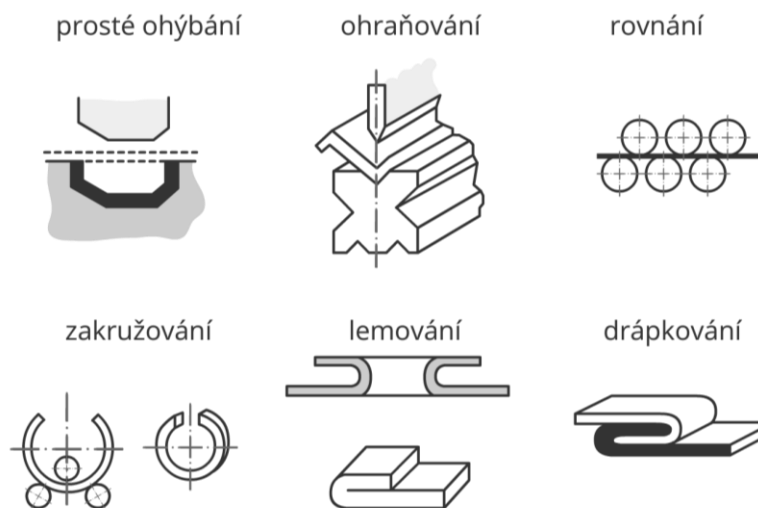
Střížnou sílu vyvozuje univerzální střížnice, kterou představuje pryž či polyuretan uložený v pouzdře. K pohybu pouzdra se využívají vřetenové nebo hydraulické lisy. Pryž umožňuje stříhat tenké plechy (cca 1 mm) měkké uhlíkové oceli a hliníkové slitiny. Střížná plocha není kvalitní, doporučuje se přídavek $0,8 \div 1 \text{ mm}$ a je zvýšený odpad. Technologie je vhodná pro kusovou či malosériovou výrobu, stříhání součástek, přístřihů, rozvinutých tvarů i skupinové vystřihování (obr. 47).



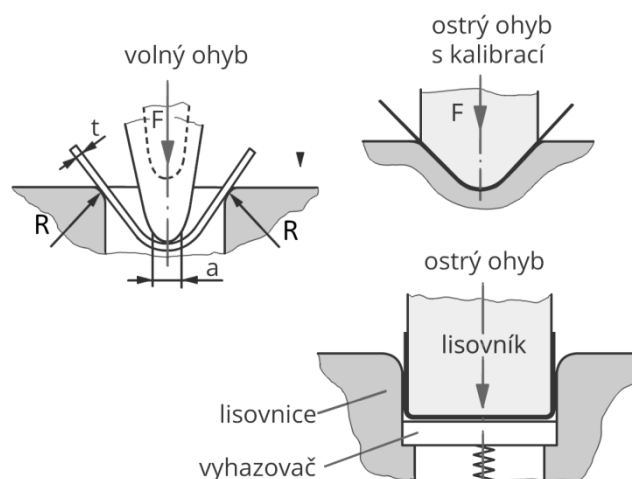
Obr. 47 Ukázka průběhu stříhání plechu nepevným nástrojem - metoda Guerin

4. 2. PROCES OHÝBÁNÍ PLECHU A JEHO PARAMETRY

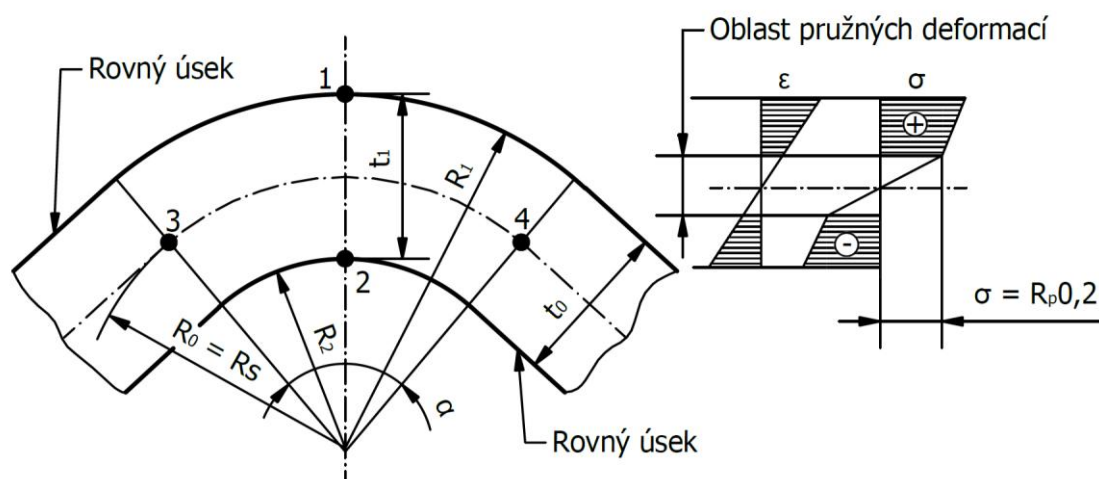
Ohýbání je trvalé deformování materiálu, kterým se dosahuje požadované změny tvaru bez podstatné změny průřezu. Pro dosažení trvalého ohybu je nutné, aby ohybné napětí bylo nad mezí kluzu R_e , ale nesmí překročit mez pevnosti R_m , s ohledem na porušení soudržnosti tvářeného materiálu. Jednotlivé způsoby ohybu jsou uvedeny na obr. 48, 49, 50.



Obr. 48 Jednotlivé metody ohybu



Obr. 49 Ohyb tvaru V a U



R_0 - neutrální plocha [mm]; R_s, R_0, R_1, R_2 - poloměry ohybu [mm]
 t_0 - výchozí tloušťka plechu [mm]; t_1 - tloušťka plechu v místě ohybu [mm]

Obr. 50 Průběh ohybového napětí

Hlavním parametrem ohybu je poměr $\frac{R_2}{t_0}$: $\frac{R_2}{t_0} > 6$ znamená volný ohyb,

$\frac{R_2}{t_0} < 6$ znamená ostrý ohyb.

a) Minimální poloměr $R_{\min}$ ohybu – je poloměr, při jehož překročení by na vnější tahové straně ohybu došlo k porušení materiálu v krajních vláknech. Závisí především na plastičnosti materiálu, druhu materiálu, tloušťce plechu, způsobu ohýbání a kvalitě povrchu.

Orientační hodnoty platící pro optimální povrch (bez rýh a mikrotrhlin) a pro příčný či podélný směr vláken jsou uvedeny níže:

- pro měkkou ocel $R_{\min} = (0,4 \div 0,8) \cdot t$
- pro středně tvrdou ocel $R_{\min} = 1,5 \cdot t$
- pro měkkou měď $R_{\min} = 0,25 \cdot t$
- pro hliník $R_{\min} = 0,35 \cdot t$

$$R_{\min} = \frac{t}{2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_c} - 1 \right) = c \cdot t \quad [\text{mm}] \quad (12)$$

kde: t - tloušťka ohýbaného materiálu [mm]

ε_c - mezní prodloužení $\rightarrow$ při jeho překročení dojde k porušení ohýbaného materiálu (napětí přesáhne mez pevnosti v tahu R_m) [mm]

ckoeficient [-]:
 měkká ocel $c = 0,5 \div 0,6$
 měkká mosaz $c = 0,3 \div 0,4$
 hliník $c = 0,35$
 dural $c = 3 \div 6$
 měkká měď $c = 0,25$

b) Maximální poměr $R_{\max}$ ohybu – je poloměr, při němž v krajních vláknech na tahové straně dojde k trvalé deformaci.

$$R_{\max} = \frac{t}{2} \cdot \left(\frac{E}{R_e} - 1 \right) \quad [\text{mm}] \quad (13)$$

kde: E - modul pružnosti v tahu [MPa]

R_e - mez kluzu materiálu [MPa]

Rozvinutá délka l_c odpovídá rozměru výchozího přístřihu v linii ohybu:

$$l_c = \sum_{i=1}^n l_i + \sum_{j=1}^m l_{0j} \quad [\text{mm}] \quad (14)$$

$$\text{Zkrácená délka oblouku: } l_0 = \frac{\pi \cdot \alpha}{180} \cdot (R + x \cdot t) \quad [\text{mm}] \quad (15)$$

kde: α - úhel ohybu [°]

R - vnitřní poloměr ohybu [mm]

x - posunutí neutrální vrstvy [-]

Hodnoty x závisí na úhlu ohybu, tloušťce materiálu. Směrné hodnoty uvádí norma ČSN 22 7340.

c) Odpružení – při ohýbání polotovaru má materiál po odlehčení snahu se vrátit do původního tvaru a to o úhel odpružení β . Velikost odpružení závisí na kvalitě materiálu, tloušťce materiálu,

poloměru ohybu, úhlu ohybu a způsobu ohybu. Velikost odpružení lze zjistit pomocí diagramů sestavených na základě praktických zkoušek nebo pomocí výpočtů:

$$\text{- ohýbání do tvaru V: } tg \beta = 0,375 \cdot \frac{l}{k \cdot t} \cdot \frac{R_e}{E} \rightarrow \beta \quad [^\circ] \quad (16)$$

$$\text{- ohýbání do tvaru U: } tg \beta = 0,75 \cdot \frac{l_m}{k \cdot t} \cdot \frac{R_e}{E} \rightarrow \beta$$

kde: β - úhel odpružení $[^\circ]$

l - vzdálenost ohýbaných čelistí [mm]

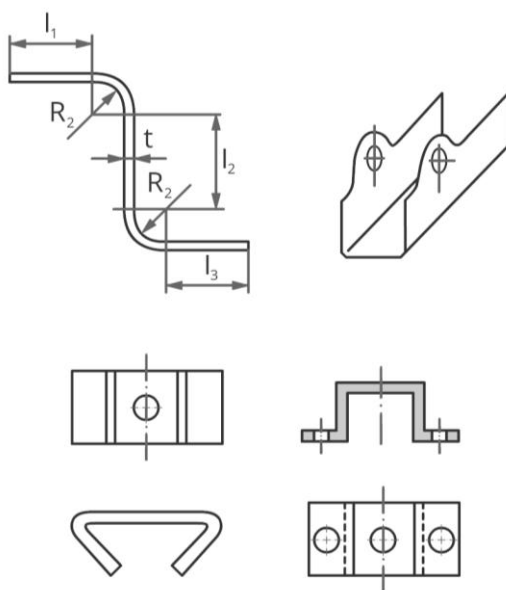
l_m - rameno ohybu [mm]

k - součinitel určující polohu neutrální plochy v závislosti na poměru $\frac{R_0}{t}$ (dle ČSN 22 7340 z diagramu), $k = 1 - x$.

4. 2. 1 ZPŮSOBY OHÝBÁNÍ PLECHU

Prosté ohýbání

- uplatňuje se zejména u dílců menších rozměrů, opatřených ostrými poloměry (obr. 51);
- geometrie součástek může vzniknout kombinací ohybu do tvaru U a V, které se odlišují z hlediska velikosti a průběhu ohybové síly;
- ohýbadla se konstruují jako jednoduchá, postupová a sdružená. Polotovarem může být přístřih nebo pás plechu – ovládacím zařízením je zpravidla excentrický lis;

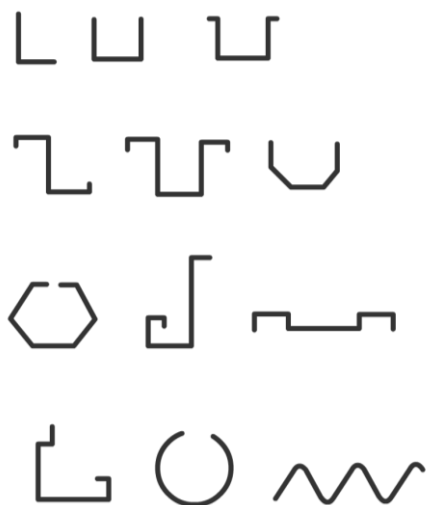


Obr. 51 Příklad součástí vyrobených v ohýbadlech

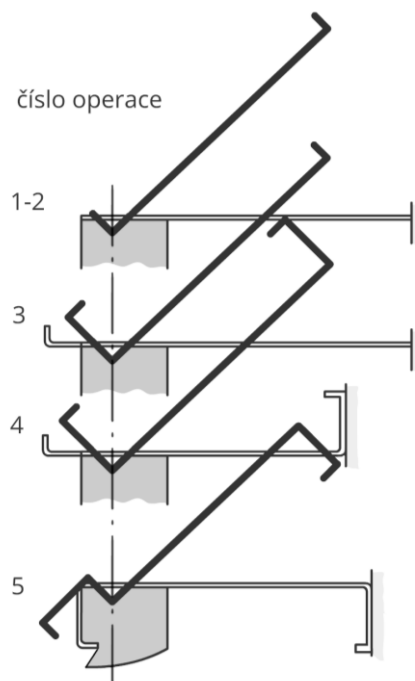
Sdružená ohýbadla – kombinují zpravidla operace ohybu s děrováním a vystřížením přístříhu z pásu.

Kalibrace – zpřesňuje poloměr, značně eliminuje důsledky odpružení, je ovšem doprovázena ztenčením v oblasti poloměru. Kalibrační síla může být dvou a třínásobkem síly ohýbací.

Ohraňování – ohraňování se uplatňuje zejména při tváření pásů plechu do tvaru profilů – jde většinou o ohyb ostrý ($\frac{R_2}{t_0} < 6$). Různé profilové tvary se tvoří kombinací ohybu geometrie V a U (obr. 52).



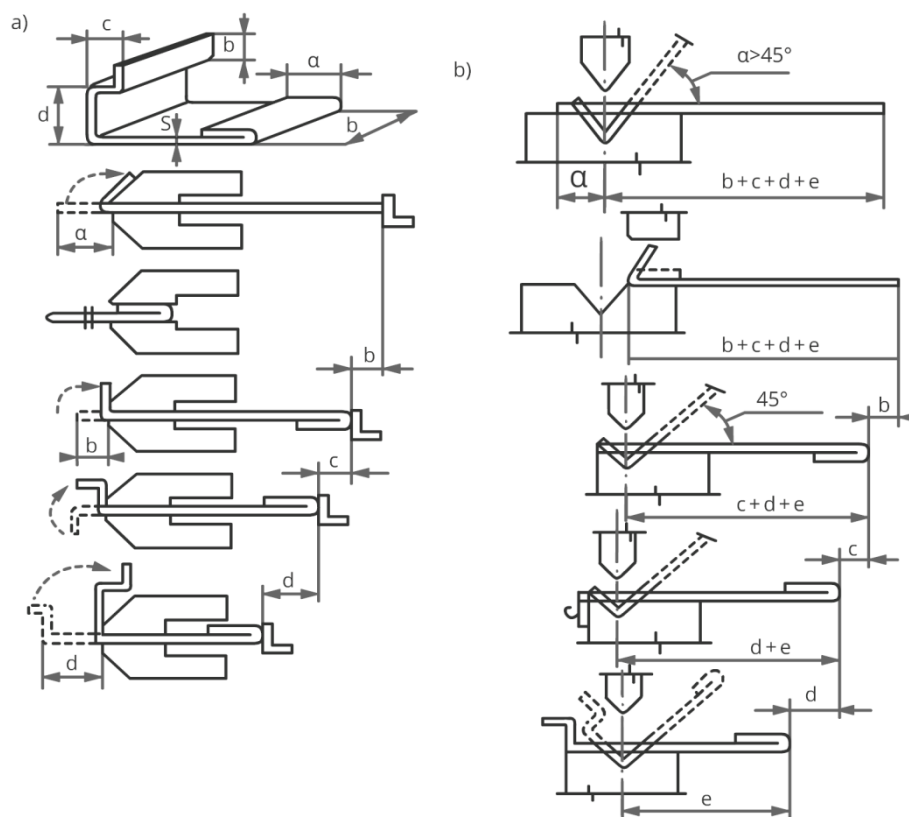
Obr. 52 Příklady profilů vyrobených ohraňováním



Obr. 53 Postupný ohyb profilu

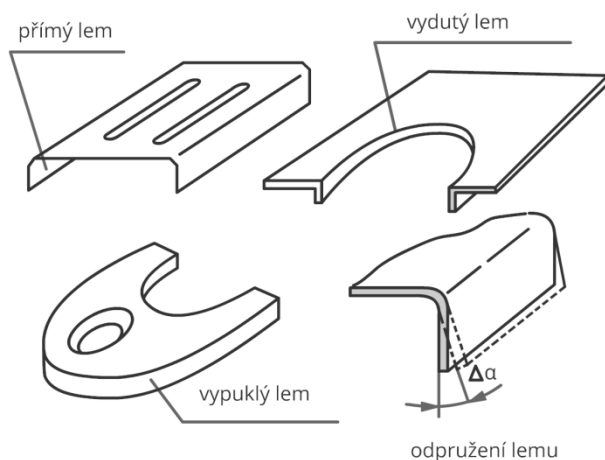
Při výrobě výše uvedených profilů se uplatňuje postupný ohyb (jak ukazuje obr. 53).

Ohraňovací lis (pracovní délka několik metrů) má pohyblivý lisovník a prismatickou pevnou lisovnici, opatřenou tvarově odlišnými výřezy, které se nastavují do pracovní polohy dle potřeby (obr. 54).

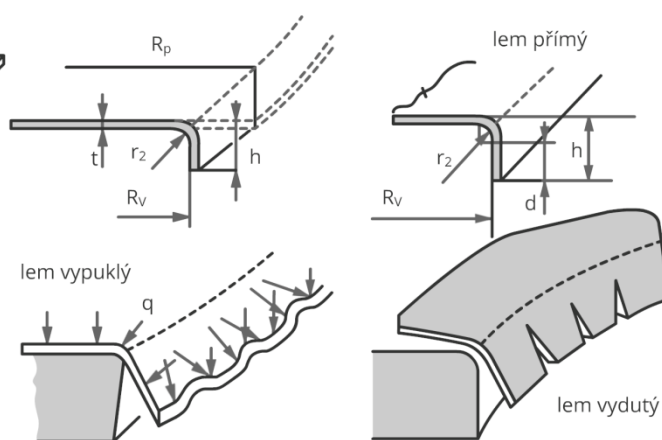


Obr. 54 Schéma výroby součásti na ohýbačce a ohraňovacím lisu

Lemování je ohýbání okraje rovinné, anebo prostorové plochy za účelem zaoblení ostrých hran, zpevnění okrajů a získání ozdobného vzhledu. Touto technologií lze vyvolit: přímý lem, vydutý lem, vypuklý lem, jak je uvedeno na obr. 55, 56.



Obr. 55 Příklady dílů s lemy



Obr. 56 Geometrie lemů

kde:

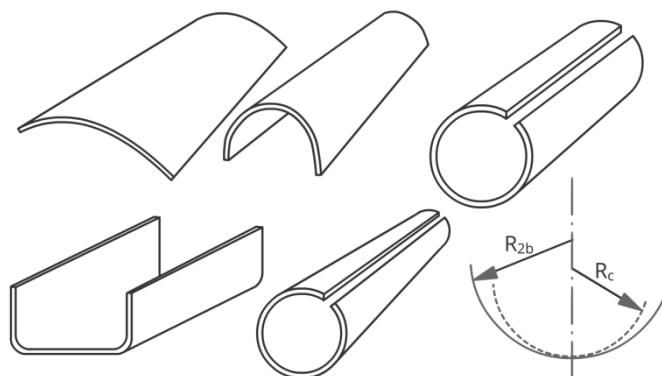
$(h)_{\min} = (R_2)_{\min} + 2t \rightarrow$ při lemování konvenčními lemovadly (kovovými),

$(h)_{\min} = (R_2)_{\min} + 5t \rightarrow$ při lemování nepevným nástrojem (pryží, není v obrázku).

U **vypuklého lemu** ($R_v < R_p$) mohou vzniknout vlny. Představují defekt, který zapříčiní tlakové napětí působící ve směru obrysu, a které zpěchovává přebytečný materiál.

U **vydutého lemu** ($R_v > R_p$) je materiál natahován a na okraji lemu mohou vznikat trhliny. Vznik vln lze potlačit zejména při lemování konvenčními lemovadly, kdy se proces podobá operaci tažení a tažná mezera zvlnění dovolí. Obecně platí, že nižší výška lemu, tlustější plech a menší úhel ohybu potlačuje jak vznik vln, tak i trhlin.

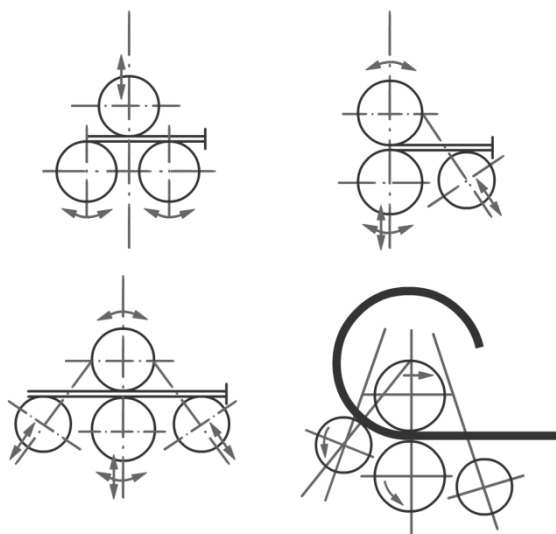
Zakružování – jde o volný ohyb, dílce mají v příčných řezech kruhový či nekruhový tvar o velkých poloměrech, v podélném směru jsou povrchy přímkové. Provádí se na zakružovačkách různého provedení. (obr. 57).



Obr. 57 Dílce vyrobené na zakružovačkách

Tenké plechy se zakružují za studena na čtyřválcových zakružovačkách nebo tříválcových nesymetrických, u kterých nehrozí ostré „proboření“ plechu. Schémata jsou uvedena na obr. 58. Tlusté plechy ($t > 40$ mm) se zakružují za tepla.

- a) tříválcová zakružovačka symetrická,
- b) tříválcová zakružovačka nesymetrická,
- c) čtyřválcová zakružovačka



Obr. 58 Uspořádání válců zakružovaček

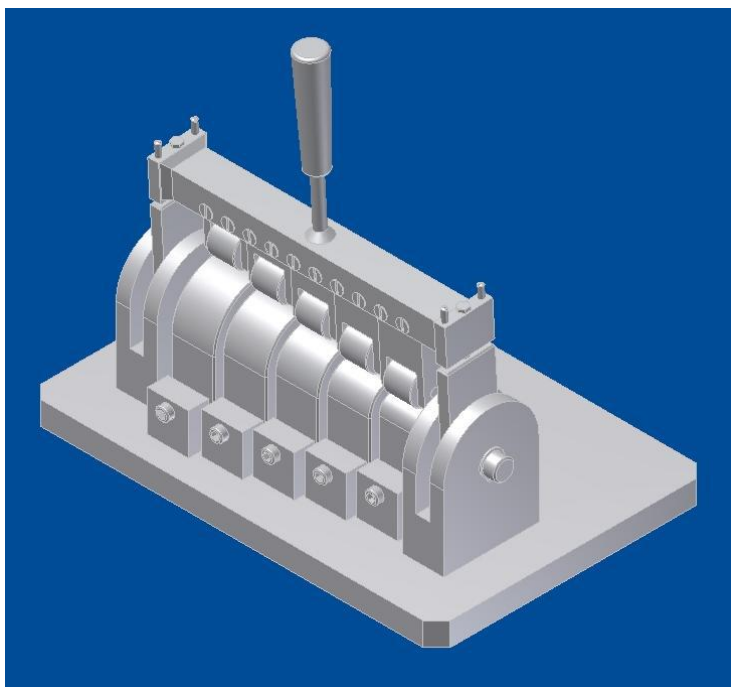
Rovnění – rozlišuje se na ruční a strojní. Ruční rovnáním se rovnají plechy a tyče kladivem. Strojní rovnání tabulí či pásů plechů se provádí na rovnačkách. Jde o střídavé ohýbání sestavou 7 až 17 naháněných válců, které v případě tenkých plechů mívají průměr ≈ 60 mm. Zakřivení způsobené prvními válci je největší, ohybové napětí je mnohem vyšší než mez kluzu R_e . Výstupní válce mají vzdálenost takovou, že se dosahuje již jen „pružných ohybových napětí“. Nerovnosti plechu jsou tak eliminovány.

OHÝBÁNÍ POVRCHOVĚ UPRAVENÝCH PLECHŮ

Povrchově upravené ocelové plechy dnes již zasahují do většiny průmyslových odvětví a svým významem rozhodují o kvalitě a funkční spolehlivosti budoucích výrobků. Ochranné povlaky na kovových materiálech mají nezastupitelnou úlohu u velmi široké oblasti používaných konstrukčních materiálů. Ke zjišťování odolnosti vytvořených povlaků vůči praskání nebo odtrhování povlaku z ocelového plechu po ohybu zkoušeného povrchově upraveného plechu se v laboratořích provádí zkouška ohybem o 180° na válcovém trnu (ČSN EN ISO 1519).

Při postupném testování vzorků plechu s povlakem je třeba dle stávajících postupů měnit válce o různých průměrech a při tom se sleduje, kdy se objeví trhлина v povlaku, resp. jeho odloupení od ocelového plechu. Rozměr vzorků je pro existující typy zkušebních zařízení omezen šířkou 50 mm a tloušťkou 1 mm. Vždy je třeba provést po příslušném ohybu demontáž a následně montáž zkušebního zařízení pro další experiment.

Ke zkoušení ocelového plechu s povlakem hliníku a Steel podle DIN EN 327/EN 101143 s mezí pevnosti v tahu $R_m = 307$ MPa, smluvní mezí kluzu $R_{p0,2} = 154$ MPa, tažností $A_{80} = 43$ % a tloušťky 1,5 mm byl použitý nový odstupňovaný ohýbací přípravek (obr. 59), vyvinutý na ÚST VUT v Brně. Tento přípravek umožňuje testování povlakovaných plechů o větší tloušťce, než současné zkušební přípravky. Dále umožňuje současný ohyb pěti vzorků v intervalu hodnot úhlů od 0° do 180° pomocí kladek přes válcové segmenty. Lze tak zhotovit U ohyby s vnitřním poloměrem R11, R17, R23, R29 a R35 mm. Válcové segmenty lze snadno vyměnit za jiný poloměr. Ohnutý vzorek je v případě zřetelného poškození povlaku posuzován vizuálně, a pokud nedojde ke zjevnému poškození povlaku za použití všech segmentů, následuje bližší zkoumání funkčnosti povlaku na mikrotrhliny pod mikroskopem.



Obr. 59 Odstupňovaný ohýbací přípravek

Cílem experimentu bylo na novém zkušebním odstupňovaném ohýbacím přípravku testovat přilnavost vybraných vzorků o délkách od 98 do 181 mm a jednotné šířky 18 mm. Všechny vzorky byly s povlakem Al, na kterých byl dodatečně za studena nanesen povlak Steel. Povlak Steel slouží pro další úpravu povrchu oceli (tepelná odolnost až do 600 °C, zvýšení korozivzdornosti, estetický efekt). Chemickým rozbořem povlaku bylo zjištěno, že povlak obsahuje 13,6 hmotnostních % Si, který zpevňuje povlak a přispívá ke zhoršení plastických vlastností při tvarování plechu. Dále dle dodavatele odolává povlak kyselinám, solným výparům a je odolný proti atmosférickým a korozním jevům. Lze ho použít pro úpravu svarů na antikoročních ocelích namísto tradičních postupů moření. Před nanesením povlaku Steel je třeba povrch Al důkladně očistit. Na základě provedených ohybových zkoušek ve zkušebním přípravku bylo zjištěno, že přilnavost povlaku Steel byla nevyhovující. Proto byl použit multitryskový plazmový systém od MU Brno o šířce 100 mm s devatenácti tryskami poskytujícími nízkoteplotní a neizometrický výboj za atmosférického tlaku. Fyzikální podstata jevu u plazmového systému spočívá v generování plazmatu za atmosférického tlaku.

Za základ trysek byly použity dielektrické kapiláry z křemenného skla, kterými protéká argon, včetně případných směsí. Vzniklá plazma tryšká z dutiny a z ústí plazmové trysky do vnějšího prostředí, kde působí na povlakované vzorky ocelového plechu. Tepelné účinky na povrchu vzorků se mohou pohybovat v rozmezí od 30 °C až 1 600 °C. Vhodné seskupení trysek do jiných tvarů umožňuje opracovávat i větší plochy zkušebních vzorků, resp. polotovarů plechů v průmyslové praxi. Díky nanesenému povlaku Steel multitryskovým plazmovým systémem na zkušebním vzorku s povlakem Al nevykazoval tento povlak známky poškození po ohybu vzorku, který byl proveden na odstupňovaném ohýbacím přípravku.

4.3 TAŽENÍ PLECHU A JEHO PARAMETRY

Tažení je technologický proces, při kterém dochází k trvalému přetvoření výchozího polotovaru – přístřihu rovinného tvaru na tvar prostorový bez změny tloušťky výchozího materiálu. Pomocí lisovacích nástrojů – tažidel vznikne tvar miskovitěho tvaru, který se nazývá výtažek.

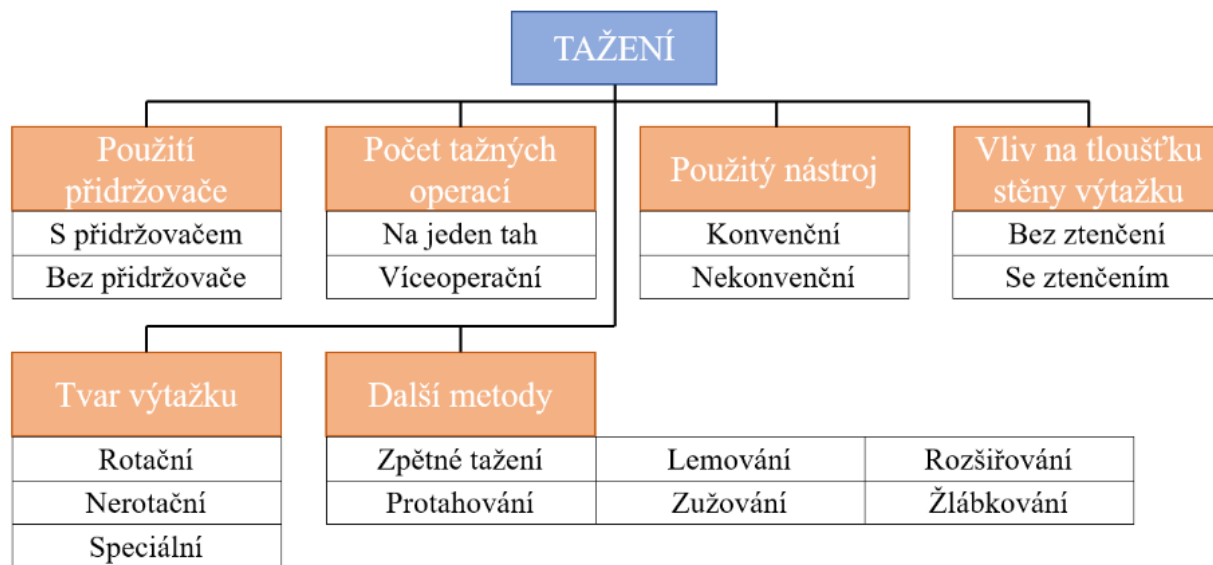
Výtažky lze zhotovit:

- **jednooperačním tažením** – výtažek je tažen na jednu operaci tažníkem, který z rondelu pomocí tažnice vytvoří válcový úsek výtažku o průměru d a výšce h . Přebytný materiál rondelu se jednak vytáhne do oblasti stěny, a jednak napěchuje působením tlakového tangenciálního napětí σ_t .
- **dvouoperačním tažením** – v druhé operaci se použije jako vstupní polotovar výtažek z první operace. Proces zpěchování a vytahování probíhá v šikmém úseku výtažku, který může být též přitlačován tvarovým přidržovačem.

Výtažek může být dále vyroben:

- konvenčním tažením tažidlem – jedno a víceoperačním postupem,
- tažením nepevným nástrojem (metodou Hydroform, Marform atd.),
- tlačení,
- explosivním tvářením, magnetickoimpulsním tvářením.

Další rozdělení technologií tažení je znázorněno na obr. 60.



Obr. 60 Rozdělení technologie tažení dle různých parametrů

Rozlišují se tyto technologie tažení:

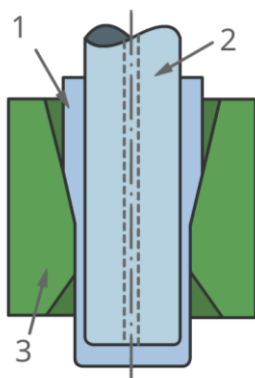
a) tažení bez ztenčení stěny (tj. tažení prosté) – jedná se o tváření bez podstatné změny tloušťky materiálu ($t_0 = \text{konst.}$), označuje se také jako tažení prosté. Tímto způsobem lze zhotovit: duté, obvodově uzavřené výlisky, rotačních i nerotačních tvarů, s přírubou i bez příruby.

b) tažení bez přidržovače – používá se u nízkých a tvarově jednoduchých výtažků tažených z poměrně tlustého materiálu. Tažidla bez přidržovače jsou z hlediska konstrukce jednoduchá, levná a provozně spolehlivá, ale redukce při tažení musí být poměrně malá, jinak se začne okraj taženého přístřihu vlnit.

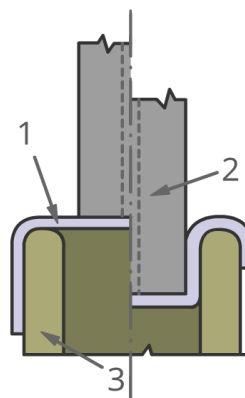
c) tažení s přidržovačem (obr. 69) – tažený materiál je v průběhu tažné operace přidržován přidržovačem. Tím se dosáhne větších redukcí a zabrání se případnému zvlnění okraje. Pro tažení s přidržovačem jsou vhodné jednočinné a dvojčinné lisy.

d) tažení se ztenčením stěny (obr. 61) – používá se u součástí s menší tloušťkou stěny, než je tloušťka dna. Tloušťka stěny t_0 je redukována v mezeře mezi tažníkem a tažnicí na tloušťku stěny t_1 , přičemž tloušťka dna zůstává nezměněna. Tím se získá delší výtažek. Optimální úhel kužele náběhové hrany tažnice se obvykle pro tažení běžných nízkouhlíkových ocelí volí 60° .

e) tažení zpětné (obr. 62) – první tah je proveden běžným sdruženým tažidlem, vytáhne se válcový výtažek prostým tažením a ve druhé operaci se provede tažení v obráceném směru. Při tomto tažení se dosahuje až o 25 % větší redukce, než u prostého tažení. Materiál je při tomto způsobu tažení méně namáhán a tím se méně zeslabuje. Okraje výtažku se téměř nikdy nezvlní.



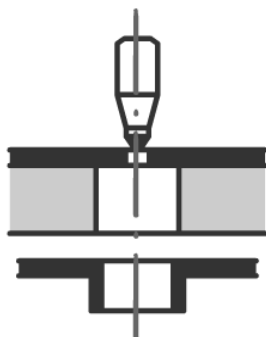
Obr. 61 Tažení výtažku se ztenčením stěny
(1 - výtažek, 2 - tažník, 3 - tažnice)



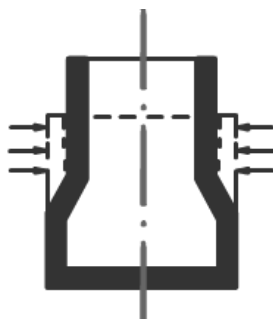
Obr. 62 Zpětné tažení
(1 - polotovar - výtažek zhotoven 1. tažnou operací, 2 - tažník, 3 - tažnice)

f) protahování (obr. 63) – protažením materiálu prostříženým otvorem (obvykle kruhovým) se vytvoří válcová stěna. Protahování otvorů je v podstatě tvoření lemů kolem otvorů nebo po okraji dutých součástí. Ostré hrany se zaoblují a současně dochází k jejich zpevňování. Materiál je v průběhu protahování namáhán pouze tahem. Tuto technologii lze rozdělit na protahování bez ztenčení stěny a se ztenčením stěny.

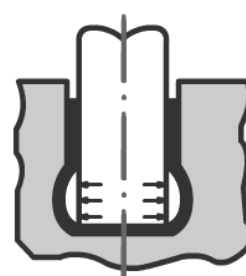
g) zužování (obr. 64) – se zpravidla využívá ke tvarování válcových, trubkovitých polotovarů, k zúžení konců trubek, apod. Tvářecí síla působí tlakem na volné čelo polotovaru a zvolna jej zasouvá do dutiny matrice, která má potřebný tvar. Lze použít i přidržovač.



Obr. 63 Protahování



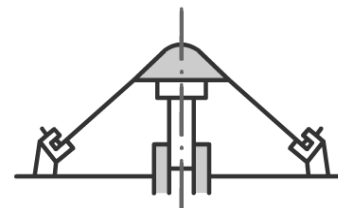
Obr. 64 Zužování



Obr. 65 Rozšiřování

h) rozšiřování (obr. 65) – postup i užití je stejný jako u zužování, avšak místo zužování dochází k rozšiřování konců trubek, průměrů výlisku apod.

i) vypínání (obr. 66) – (také přetahování) je přetváření plechového přístřihu do tvaru jednoduchého výtažku napínáním přes šablonu – tažník. Přístřih plechu je pevně upnut na protilehlých koncích. Protažením se plech značně oslabuje a zpevňuje. Nevýhodou této technologie je nízká produktivita způsobená dlouhými výrobními časy a velká spotřeba materiálu (část upnutá v kleštinách se odštíhuje). Naproti tomu výhodou je nízké pořizovací náklady nástrojů a můžeme vyrábět výtažky s dvojitou křivostí.



Obr. 66 Vypínání

4.3.1 TAŽENÍ ROTAČNĚ SYMETRICKÝCH VÝTAŽKŮ

Patří z hlediska výroby k nejjednoduššímu způsobu tažení plechu. Často slouží jako výchozí polotovár pro tažení čtvercových výtažků. Výpočtové vztahy odvozené pro rotačně symetrické výtažky jsou základem pro výpočty výtažků složitějšího tvaru.

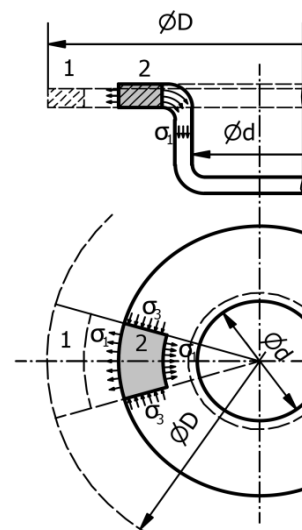
Velikost **napjatosti a deformace** je různá v různých fázích tažení a v různých místech polotovaru, jak je uvedeno na obr. 67.

→ v přírubě polotovaru vzniká vlivem tlaku přidržovače prostorová napjatost a deformace. V ploše příruby vznikají radiální tahová napětí σ_1 a tangenciální tlaková napětí σ_3 a k nim v kolmém směru osová tlaková napětí σ_2 . Při tažení bez přidržovače se mění schéma napjatosti v přírubě z důvodu absence tlakového napětí σ_2 .

→ na poloměru tažnice vzniká složitá deformace způsobená prostorovým ohybem za současného působení největšího radiálního tahového napětí σ_1 a malého tečného tlakového napětí σ_3 .

→ válcová část výtažku je podrobena jednoosé tahové napjatosti σ_1 a rovinné deformaci. Část výtažku, který přechází válcová část ve dno, je podrobena prostorové nestejnorodé napjatosti, která způsobuje značné prodloužení a ztenčení jeho tloušťky v tomto místě. V důsledku toho je tato oblast výtažku kritickým místem, ve kterém se nejčastěji výtažek poruší.

→ ve dně výtažku vzniká během tažení rovinná tahová napjatost a prostorová deformace.



Obr. 67 Schéma napjatosti a deformace při tažení válcového výtažku bez ztenčení stěny

4.3.1.1 Stanovení velikosti přístříhu

Při určování velikosti přístříhu se vychází z předpokladu, že se tloušťka stěn výtažku vzhledem k tloušťce dna nemění, takže plocha přístříhu se rovná ploše povrchu výtažku:

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = S_v \quad [\text{mm}^2] \quad (17)$$

kde: S - plocha výstřížku $[\text{mm}^2]$

S_v - plocha výtažku $[\text{mm}^2]$

D - průměr výstřížku $[\text{mm}]$

Ze základního vztahu vyplývá rozměr výchozího materiálu:

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot S_v} = 1,13 \cdot \sqrt{S_v} = 1,13 \cdot \sqrt{\sum S} \quad [\text{mm}] \quad (18)$$

kde: $\sum S = S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n$ $[\text{mm}^2]$ je součet ploch jednotlivých částí povrchu výtažku zahrnující velikost příruby a přidavek na jeho odstřižení.

Po vytažení výtažku vzniknou nerovné okraje, které se z důvodů přesných rozměrů výtažku odstřihují. Proto se musí připočíst při jednooperačním tažení přídavek min. 3 % a při každé další operaci se tento přídavek zvětšuje o 1 % velikosti přístřihu. [16]

Má-li výtažek složitý tvar, používá se pro stanovení povrchu Guldinova pravidla: povrch rotačního tělesa S vytvořený otáčením křivky libovolného tvaru podle osy se rovná součinu z délky tvořící křivky L a dráhy těžiště této křivky. Dalším možným způsobem určení průměru výstřižku je grafická metoda. V současnosti se využívá počítačových programů ke stanovení přesné hodnoty plochy či objemu materiálu.

4. 3. 1. 2 Součinitel a stupeň tažení, počet tažných operací

Při podrobném rozboru tažení lze zjistit, že tahová napětí vzrůstají s rostoucí výchozí šířkou prstencové části výchozího materiálu $\frac{D-d}{2}$, tj. s rostoucí výškou výtažku h .

Součinitel tažení pro první tah vychází ze vztahu (6) pro poměrné přetvoření:

$$m_1 = \frac{d}{D} \quad [-] \quad (19)$$

kde: d - konečný průměr výtažku [mm]

D - průměr přístřihu (rondelu) [mm]

$$\text{Pro další tahy platí } m_n = \frac{d_n}{d_{n-1}} \quad [-] \quad (20)$$

$$\text{Převrácená hodnota součinitele tažení } m \text{ je stupeň tažení } K: \quad K = \frac{1}{m} \quad [-] \quad (21)$$

Výtažky s tloušťkou pod 1 mm se táhnou s přidržovačem v jednom nebo více tazích, podle příslušných součinitelů odstupňování m_1 až m_n .

Na volbu součinitele tažení má vliv několik parametrů a to: mechanické vlastnosti materiálu (mez pevnosti, mez kluzu, tažnost), tloušťka plechu, jakost povrchu plechu a mazivo. Čím je tloušťka plechu větší a kvalita použitého maziva lepší, tím je možno použít nižších hodnot součinitele tažení. Plech musí mít dostatečnou drsnost, aby na něm dobře ulpělo mazivo.

Počet tažných operací závisí na tvárnosti materiálu a ukazateli deformace - součiniteli tažení. Pokud je součinitel m_1 nižší než doporučená hodnota pro první tah, je nutno tažení rozložit na několik operací (obr. 68).

Určení počtu tahů:

$$\begin{aligned}
 1. \text{ tah: } d_1 &= m_1 \cdot D_0 \\
 2. \text{ tah: } d_2 &= m_2 \cdot d_1 = m_2 \cdot m_1 \cdot D_0 \\
 3. \text{ tah: } d_3 &= m_3 \cdot d_2 = m_3 \cdot m_2 \cdot m_1 \cdot D_0 \\
 n\text{-tý tah: } d_n &= (m_n)^{n-1} \cdot m_1 \cdot D
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

kde: d_1, d_2, d_3 - střední průměry výtažků v jednotlivých operacích [mm].

Celkový součinitel tažení je dán součinem součinitelů tažení jednotlivých operací:

$$m_c = m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 \cdot \dots \cdot m_n \quad [-] \tag{23}$$

Norma ČSN 22 73 01 doporučuje volit součinitel tažení pro 2. a další operaci v rozmezí (0,75 ÷ 0,85) nebo lze použít nomogram, uveden v této normě.

Dle lit. [21] je počet potřebných, po sobě jdoucích tahů funkcí poměru výšky a průměru výtažku:

$$n = \frac{h}{d} \quad [-] \tag{24}$$

kde: n - počet tahů [-]
 h - výška výtažku [mm]
 d - průměr výtažku [mm]

Tabulka 4 Počty tahů n pro válcové výtažky

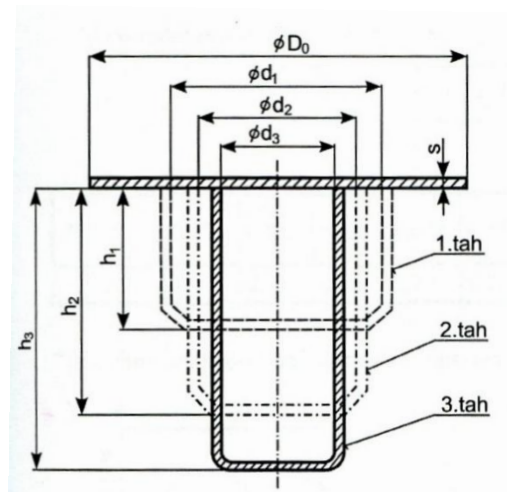
h/d	< 0,6	0,6 ÷ 1,4	1,4 ÷ 2,5	2,5 ÷ 4,0	4,0 ÷ 7,0	7,0 ÷ 12,0
n	1	2	3	4	5	6

4. 3. 1. 3 Použití přidržovače

Táhnout bez přidržovače (u výtažků tažených z poměrně tlustého materiálu) nebo s přidržovačem, aby nedošlo k zvlnění příruby, vyplývá z empirických vztahů ověřených praxí nebo lze stanovit dle [20]. Obecně lze doporučit potřebný tlak přidržovače dle tabulky 5.

Tabulka 5 Doporučené tlaky přidržovače v závislosti na druhu materiálu.

Materiál	p [MPa]
Hlubokotažné oceli	2,0 ÷ 3,0
Nerezové oceli	2,0 ÷ 2,5
Měď	1,2 ÷ 1,8
Hliník	0,8 ÷ 1,2
Mosaz	1,5 ÷ 2,0



Obr. 68 Postup víceoperačního tažení

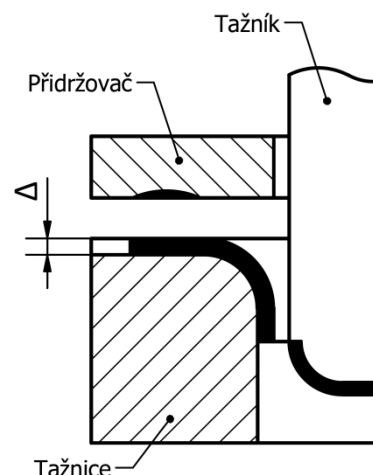
4. 3. 1. 4 Poloměr hran nástroje

Poloměr hran, zejména tažnice, značně ovlivňuje proces, např. pro 1. či 2. tah je optimální hodnota $r_t = (6 \div 10) \cdot t$. Vyšší hodnoty vedou ke zvlnění, přidržovač ztrácí funkci; malé hodnoty r_t zvyšují tažnou sílu a vzniká nebezpečí utržení dna. Poloměr tažníku r_k pro 1. operace bývá shodný s r_t .

Díky otěru nástroje o tažený materiál, které může vést až ke ztrátě rozměrů dle výkresů a nalepování se materiálu (části plechu) na tažnici dochází k opotřebení funkčních částí tažidla při hlubokém tažení (viz obr. 69).

Mezi významné faktory ovlivňující toto opotřebení patří:

1. konstrukční faktory
 - vedení nástroje
 - tuhost nástroje
 - tuhost tvářecího stroje
 - volba způsobu tažení
 - tažná vůle
2. technologické faktory
 - rychlost nástroje
 - relativní rychlost skluzu po nástroji
 - deformační rychlost materiálu
 - teplota stykových ploch
 - tažná síla
 - přidržovací síla
 - použité mazivo a plech



Obr. 69 Exponovaná místa u tažného nástroje

Dle dostupných informací z průmyslové praxe je opotřebení tažníku $5 \div 8x$ menší v porovnání s opotřebením tažnice a přidržovače. Děje se tak z důvodu klouzání materiálu po tažnici, než po tažníku (čelo tažníku bývá drsnější).

4. 3. 1. 5 Tažná mezera

Velikost tažné mezery z_m se volí větší, než je tloušťka plechu, aby se přebytečný materiál mohl při vytahování přemístit a nepěchoval se. Jen při kalibraci je tažná mezera stejná. Pro stanovení velikosti tažné mezery použijeme vztahu:

$$z_m = (1,2 \div 1,3) \cdot t_0 \text{ [mm]} \quad \text{pro první tah} \quad (25)$$

$$z_m = (1,1 \div 1,2) \cdot t_0 \text{ [mm]} \quad \text{pro poslední tah}$$

Výpočtové vztahy pro velikost tažné mezery při tažení tenkých plechů se v odborné literatuře liší. Zvláště vzorce ke stanovení velikosti tažné mezery tenkých povlakovaných plechů se vyskytují sporadicky. Z výše uvedeného důvodu byly provedeny experimenty na VUT v Brně, Ústavu strojírenské technologie za účelem optimalizace velikosti tažné mezery. Pro experimenty

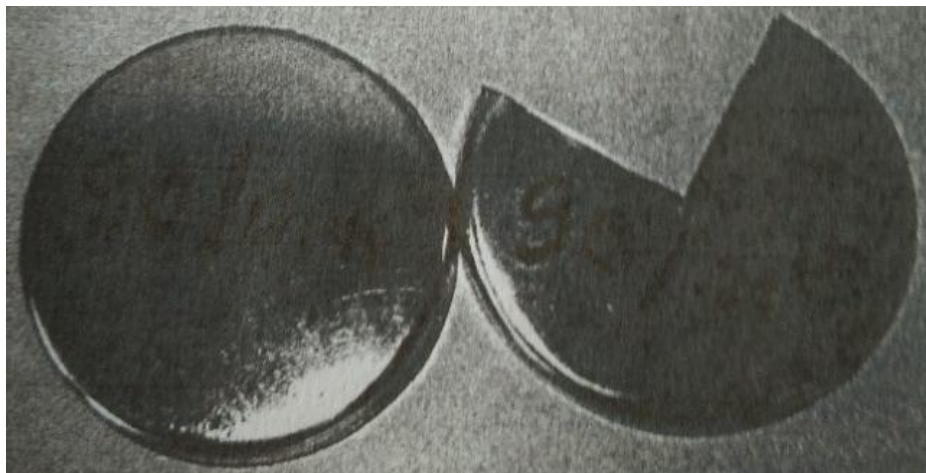
byl zvolen plech tloušťky 0,16 mm s oboustranně naneseným povlakem cínu o plošné hmotnosti 2,0/2,0 g · m².

Ukázka zkušebního výtažku je na obr. 70. Nejlepších výsledků kvality povrchu, rozměrové a tvarové přesnosti při experimentech bylo dosaženo s průměrem rondelu $D = 90$ mm, tloušťky plechu $t = 0,16$ mm a při velikosti tažné mezery $t_m = 0,17$ mm. Jsou-li porovnány hodnoty t_m zjištěné pomocí výpočtových vztahů v odborné literatuře, vychází hodnota např. dle Hellwiga $t_m = 0,240$ mm, dle směrnice č. 3175 VDI je pro stupeň tažení $K = 1,28$ a velikost rondelu $D = 90$ mm hodnota mezery $t_{mmax} = 0,181$ mm. V tuzemské odborné literatuře a normách ČSN pro tažení je všeobecně doporučována velikost tažné mezery jako násobek 1,1 až 1,3 tloušťky plechu, což činí pro daný případ hodnotu v intervalu 0,192 až 0,208 mm. Jednostranná vzdálenost mezi povrchem válcového tažníku a válcovou tažnicí je nazývána tažná mezera "z". Dvojnásobek hodnoty "z" je velikost tažné vůle, tedy $v = 2 \cdot z$. Zaoblení tažnice bylo nitridováno na tvrdost 560 ± 10 HV1.

Tabulka 6 Tažná mezera t_m a její porovnání s experimentem [22]

Autoři	Výpočtové vztahy	Početní řešení mezery [mm]	Experiment na VUT
TSCHÄTSCH, H.	$w = t \cdot \sqrt{\frac{D}{d}} = 0,16 \cdot \sqrt{\frac{90}{70,08}}$	$w = 0,181$	Optimální tažná mezera t_m $= t_{max} + 0,01$ [mm] $t_m = 0,17$ mm
OEHLER	$w = t + k \cdot \sqrt{t} = 0,16 + 0,07 \cdot \sqrt{0,16}$	$w = 0,188$	
HELLWIG, W.	$u_{z1} = t + 0,2 \cdot \sqrt{t} = 0,16 + 0,2 \cdot \sqrt{0,16}$	$u_{z1} = 0,240$	
ZUBCOV, M. J.	$z = t_{max} + c \cdot t = 0,16 + 0,2 \cdot 0,16$	$z = 0,192$	
ROMANOVSKIJ	$z = \frac{d_m - d_n}{2} = t_{max} + n \cdot t = 0,16 + 0,2 \cdot 0,16$	$z = 0,192$	
ŠOFMAN, L. A.	$z = t \cdot \left(1 + 0,05 \cdot \sqrt{\frac{10}{t}}\right) = 0,16 \cdot \left(1 + 0,05 \cdot \sqrt{\frac{10}{t}}\right)$	$z = 0,223$	
VIDI - Richtlinie 3175	$u_{zmax} = t \cdot \sqrt{\beta} = t \cdot \sqrt{\frac{D_0}{d}} = 0,16 \cdot \sqrt{\frac{90}{70,08}}$	$u_{zmax} = 0,181$	
ČSN 22 7301 Tažení dutých válcových výtažků - směrnice pro konstrukci	- pro 1. tah: $t_m = (1,2 \div 1,3) \cdot t_0 = 1,3 \cdot 0,16$ - pro konečný tah: $t_m = (1,1 \div 1,2) \cdot t_0 = 1,2 \cdot 0,16$	$t = 0,192 \div 0,208$ $t = 0,176 \div 0,192$	
SRP, K. aj.	$z = t + 0,07 \cdot \sqrt{10 \cdot t} = 0,16 + 0,07 \cdot \sqrt{10 \cdot 0,16}$	$z = 0,249$ pro ocelový plech	

($t = 0,16$ mm, $D = 90$ mm, oboustranný povlak Sn 2,0/2,0 g · m², $d = 70,08$ mm, mazivo DRAWSOL WDC 9, lis CTC 5)



Obr. 70 Ukázka zkušebního vzorku - výtažku [22]

4. 3. 1. 6 Tažná síla a práce

Stanovení velikosti sil a práce při tažení se používá teoretický vzorec, který je založen na základě rozboru napjatosti a deformací a praktický vzorec, který vychází z přípustného napětí (meze pevnosti) ve výtažku. Praktické vzorce pro výpočet tažné síly vycházejí z toho, že dovolené napětí je na mezi pevnosti, tj. největší tažná síla musí být o něco menší, než síla potřebná na odtržení bočních stěn výtažku při přechodu do dna (obr. 69). Dle velikosti tažné síly se určuje lis, na kterém bude výtažek tažen.

$$\text{Skutečná tažná síla } F_t = C \cdot o \cdot t_0 \cdot R_m = C \cdot \pi \cdot d \cdot t_0 \cdot R_m \quad [\text{N}] \quad (26)$$

kde: C - součinitel vyjadřující vliv součinitele tažení m s přihlédnutím k poměrné tloušťce $\frac{t_0}{D_0}$

R_m - mez pevnosti materiálu (plechu) [MPa]

d - průměr výtažku [mm]

t_0 - tloušťka plechu [mm]

$$\text{Práce při tažení } A_t \quad A_t = \frac{k \cdot F_c \cdot h}{1000} \quad [\text{J}] \quad (27)$$

kde: F_c - největší potřebná síla [N]

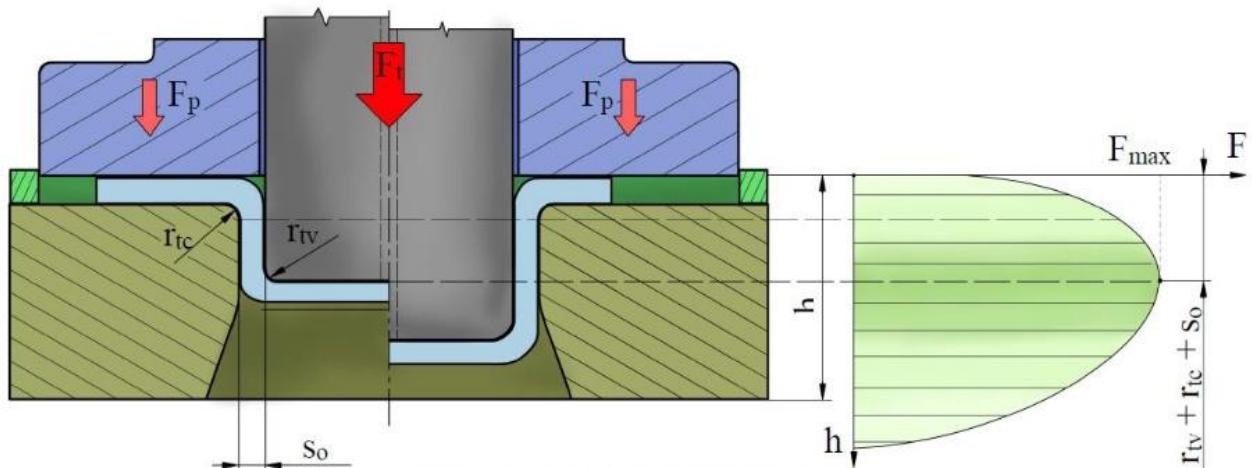
h - hloubka výtažku (pracovní zdvih lisu) [mm]

k - opravný koeficient respektující pracovní diagram, $k = \frac{2}{3}$ [-]

$$\text{Tlak přidržovače se počítá dle: } F_p = S_c \cdot p_p = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) \cdot p_p \quad [\text{N}] \quad (28)$$

kde: S_c - činná (funkční) plocha pod přidržovačem [mm²]

p_p - měrný přidržovací tlak (viz tab. 5) [MPa]

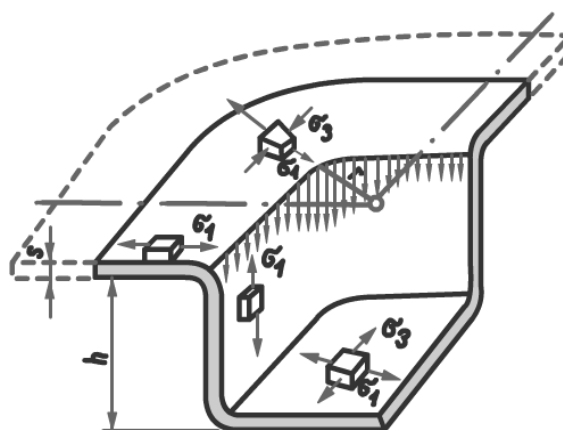


Obr. 71 Schéma tažení s přidržovačem a průběh tažné síly v průběhu tažení

4.3.2 TAŽENÍ NEROTAČNÍCH VÝTAŽKŮ

Při tažení výtažků nerotačních tvarů, např. výtažků čtvercového, obdélníkového nebo nepravidelného tvaru, jsou technologické podmínky poněkud odlišné v porovnání s tažením výtažků válcových.

Stejně jako u tažení rotačních výtažků vycházíme z předpokladu, že během tažení nedochází k podstatným změnám tloušťky taženého plechu. Stav napjatosti v rohovém zaoblení a ve svislých stěnách je rozdílný. Na rovných stěnách je stav napjatosti podobný jako u ohybu. Největší tahové napětí je v rozích a nejmenší na přímých stěnách výtažku, viz obr. 72.



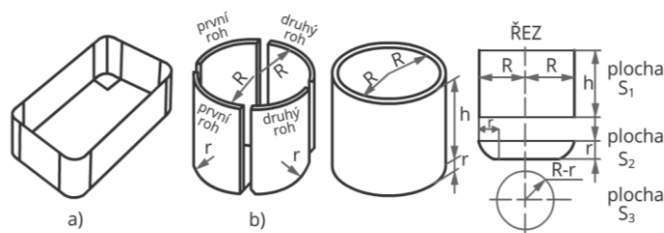
Obr. 72 Schéma napjatosti při tažení čtvercových nádob

Boční stěny mají při deformaci pravoúhlých výtažků kladný vliv v tom, že:

- maximální deformace, tj. deformace v rozích je v porovnání s tažením válcových výtažků stejných rozměrů mnohem nižší,
- tangenciální napětí v přírubě jsou menší, příruba je stabilnější,
- součinitel tažení v prvním tahu je v porovnání s válcovým výtažkem nižší.

4. 3. 2. 1 Stanovení velikosti a tvaru přístřihu

Jedna z možností je určit přibližný tvar přístřihu s postačujícím množstvím materiálu pro tažení obdélníkového výtažku dle obr. 73, kdy čtvercový výtažek má zaoblené rohy jak u dna, tak i v rozích (poloměry R a r). Z toho lze předpokládat, že celkové množství kovu potřebného k vytvoření všech čtyř rohů výtažku je stejné, jako u válcového výtažku stejné výšky a o průměru rovném dvojnásobku rohového poloměru.



Obr. 73 Obdélníkový výtažek, z jehož rohů lze získat teoretický válcový výtažek

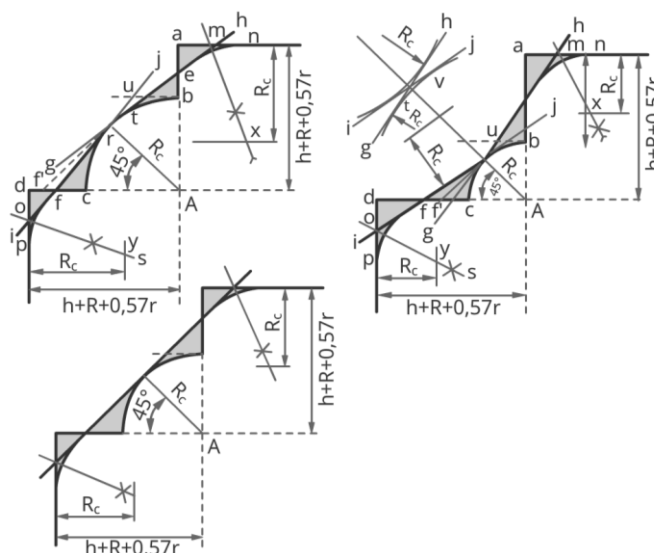
Celkovou plochu přístřihu lze stanovit pomocí poloměru kruhového přístřihu R_c potřebného k tažení teoretického válcového výtažku vytvořeného z odříznutých rohů výtažku obdélníkového:

$$R_c = \sqrt{2 \cdot R \cdot h + R^2 + 1,14 \cdot R \cdot r} \quad [\text{mm}] \quad (29)$$

Známe-li velikost poloměru R_c , lze nakreslit obdélník (čárkovaně) v měřítku 1:1, jeho rozměry jsou dány obecnými kótami uvedenými na obr. 73. Tento obdélník představuje plochou část dna výtažku. Prodloužením jeho stran nad body A, B, C, D o hodnotu

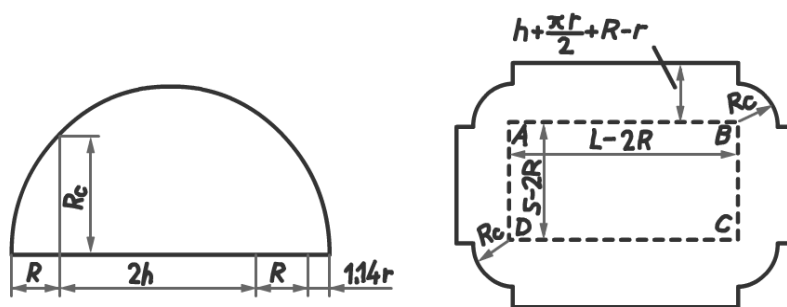
$$h + \frac{\pi \cdot r}{2} + R - r \cong h + R + 0,57 \cdot r \quad [\text{mm}] \quad (30)$$

se obdrží tvar přístřihu pro obdélníkový výtažek bez rohových částí, tato část je tvářena pouze ohýbáním. Z bodů A až D se opiše čtvrtkružnice o poloměru R_c (obr. 75). Tím vznikne teoretický tvar přístřihu se správným množstvím kovu pro tažení výtažku, který však nelze použít, protože materiál uniká do stěn tvářených pouze ohybem. Tím by chyběl v rozích a ve stěnách přebýval. Proto se přechody zaoblí poloměrem dle obr. 74, pak mohou vzniknout tři základní tvary rohů přístřihu, podle vzájemného poměru hodnot R , r , h . Tato grafická metoda poměrně přesně určí tvar přístřihu pro tenké plechy. U materiálu tlustších vznikají nestejněměrné posuny vnitřních a povrchových vrstev materiálu. Proto ji nelze použít.



a) vypouklý tvar, b) vydutý tvar, c) rovný tvar

Obr. 74 Konstrukce tvaru rohu přístřihu u nerotačních výtažků

Obr. 75 Teoretický tvar přístřihu (vpravo) s postačujícím množstvím materiálu pro tažení obdélníkového výtažku, stanovení R_c (vlevo)

Má-li výtažek přírubu, postupuje se při určování tvaru přístřihu obdobně, pouze při výpočtu poloměru R_c se musí uvažovat i plocha příruby.

Dále lze velikost přístřihu vypočítat dle normy dle ČSN 22 7303 [23]. V praxi se provede jeden z výše uvedených výpočtů předběžné velikosti plochy výtažku a na lisu se provede 1 ÷ 2 kusy zkusmo. Z výsledků tažení se posoudí, kde je třeba přidat či ubrat materiál, aby nebylo nutno výtažek ostříhovat. Dále se posuzuje šířka příruby, pokud ji má výtažek mít, aby se zabránilo případnému zvlnění. Nebo se příruba navrhne, kvůli lepšímu tažení výtažku. Dále se zvažuje použití brzdících žeber, jejich tvar a rozložení.

Součinitel tažení m pro hranaté výtažky je obdobou součinitele tažení válcových výtažků. Vychází z rohové části (místo teoretické válcové nádoby) a je dán jako poměr:

$$m = \frac{r_1}{R_0} \quad [-] \quad (31)$$

kde: r_1 - poloměr zaoblení výtažku [mm]
 R_0 - redukovaný poloměr přístřihu [mm]

$$\text{Součinitel tažení pro 2. až n-tý tah: } m_n = \frac{r_n}{r_{n-1}} \quad [-] \quad (32)$$

Tažení čtyřhranných výtažků se provádí převážně s přidržovačem. Bez přidržovače na jeden tah lze táhnout čtyřhranný výtažek, má-li součinitel tažení pro první operaci potřebnou hodnotu. Výtažky z materiálu s tloušťkou $t_0 < 1 \text{ mm}$ se táhnou s přidržovačem na jeden nebo více operací.

Tažná mezera se u tažidel pro nerotační výtažky pro první tahy volí asi $1,1 \cdot t_0$. Větší tažná mezera se volí také u posledního tažidla při větším počtu tažných operací. Je-li tažná mezera větší, umožní se přirozené zvětšení tloušťky materiálu při tažení v rozích a tím se sníží jednak stupeň zpevnění a jednak velikost tažné síly. Výtažek je v rozích pevnější, jelikož se méně zeslabí. Proto se volí tažná mezera (t_{m1} , t_{mr1}) různá v podélných stěnách a různá v kruhově zaoblených bočních stěnách (obr. 76).

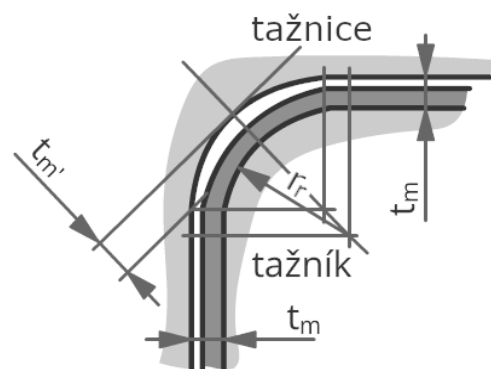
Stanovení tažné mezery v podélné stěně:

$$t_{m1} = t_{mn} = (1,15 \div 1,3) \cdot t \quad [\text{mm}] \quad (33)$$

Stanovení tažné mezery v rozích:

$$t_{mr1} = t_{mm} = (1,3 \div 1,4) \cdot t \quad [\text{mm}] \quad (34)$$

kde: t - tloušťka taženého plechu [mm]



Obr. 76 Velikost tažné mezery při tažení nerotačních výtažků

4. 3. 2. 2 Tažná síla a práce

Při výpočtu maximální tažné síly se předpokládá, že v rozích výtažku dochází k tažení a v rovných stěnách k ohybu, pak lze použít vzorec:

$$F_{tmax} = t_0 \cdot R_m \cdot (2 \cdot \pi \cdot R \cdot C_1 + L \cdot C_2) \quad [\text{N}] \quad (35)$$

kde: L - součet délek přímých částí stěn výtažku [mm],

R - poloměr zaoblení výtažků [mm].

C_1 , C_2 - konstanty [-], jsou závislé na provedení tažidla, mazání, druhu a kvalitě taženého plechu apod.:

$C_1 = 0,5$ - mělké výtažky

$C_2 = 0,2$ - pro nulový přidržovací tlak

$C_1 = 2$ - pro hlubší výtažky, $H = (5 \div 6) \cdot R$

$C_2 = 0,3$ - pro používaný přidržovací tlak

Tažnou sílu lze vypočíst i dle vzorců uvedených v normě ČSN 227303 a ČSN 227301.

K tažení hranatých výtažků se využívá speciálně upravená tažnice, ve které jsou zasunuta brzdící žebra. Pod pojmem brzdící žebro se rozumí výstupek vytvořený pod přidržovačem za účelem přibrzdění tvářeného materiálu. Při tažení v nástroji bez brzdících žeber se přitlačné plochy rychle opotřebovávají, což má za následek nerovnoměrnost stlačení materiálu a vznik vln.

Použití brzdících (tažných, předtahových) žeber (lišť, prahu, výstupku) umožňuje:

- zvětšit sevření příruby tvářeného polotovaru a tím zvýšit přibrzdění jeho toku během tažení,
- rozšířit rozmezí působnosti přidržovacího smýkadla lisu,
- usměrnit přemísťování tvářeného polotovaru v rozích v rovných částech tažnice,
- záměrně zvětšovat přibrzdění přemísťovaného materiálu na jednotlivých částech (místech tažnice) pomocí brzdících žeber,
- v některých případech dovoluje snížit jakost obrobení povrchu tažnice i přidržovače tažného nástroje,
- stabilizuje tažení velkých nepravidelných výtažků.

4. 3. 2. 3 Volba přidržovače pro přístřihy "Tailored blanks" [24], [25], [26],

Přístřihy Tailored blanks jsou svařené z více částí, z nichž každá může být z jiného materiálu o jiné tloušťce. Tyto přístřihy se používají pro zpevnění výlisku v namáhaných částech buď použitím materiálu s lepšími mechanickými vlastnostmi, nebo materiálu o větší tloušťce. Druhou možností použití je snížení hmotnosti použitím tenčího materiálu v částech výlisku, kde není silové namáhání, nebo použití tenčího plechu o vyšší pevnosti v tahu R_m při zachování tuhosti výlisku. Výhodou Tailored blanks přístřihů je možnost tvářet jeden dílec z více typů materiálů v jednom nástroji.

Jinou možností by bylo lisovat z každého materiálu jeden dílec a ty následně svařovat ve větší komponenty, tím by se ovšem zvýšily náklady na pořízení nástrojů a svařování by se muselo provádět v dalším přípravku. Navíc by zde mohlo dojít k nepřesnostem vlivem tepelné deformace materiálu při svařování nebo nepřesností jednotlivých komponentů svařence. Přístřihy se vystřihují ze svitků plechu, svaří se a následně vylisují → Tailored blanks.

Úprava nástroje pro lisování z Tailored blanks přidržovače, tažníku a tažnice

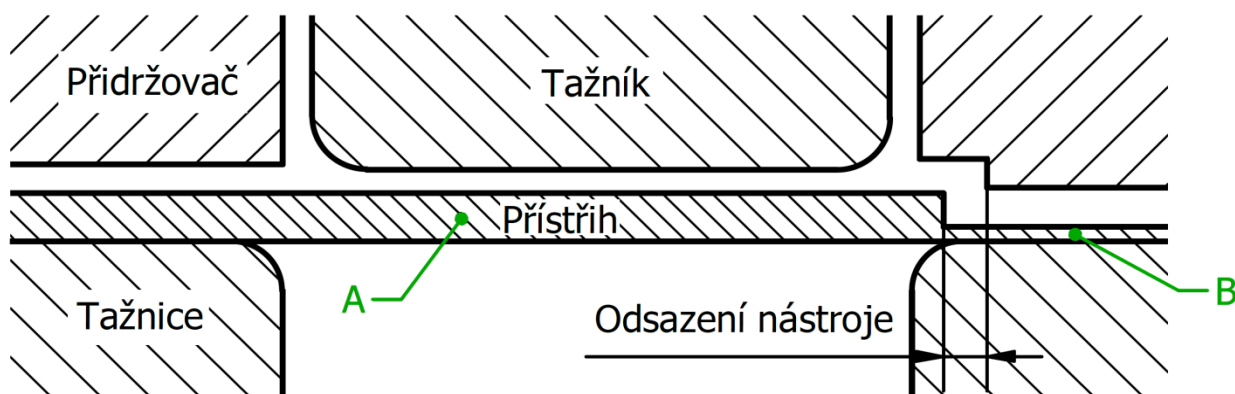
Rozdílná tloušťka materiálu a různé mechanické vlastnosti v různých místech přinášejí problémy při tváření z těchto přístřihů.

Při tažení je nutno upravit přidržovač pro různé tloušťky materiálu, ovšem z důvodu různých tolerancí tloušťky každého svitku může dojít k nestejnému tlaku na přírubě. Navíc kvůli různým mechanickým vlastnostem materiálů, jako jsou mez kluzu, modul deformačního zpevnění, mez pevnosti a tažnost, dochází k nerovnoměrné deformaci podél tvaru výtažku, proto je někdy nutné brzdřit snadno tvaritelné materiály vyšším tlakem přidržovače. K tomu je možné použít následující úpravy nástrojů:

a) schodovitý pevný přidržovač

Úprava přidržovače (obr. 77) je provedena změnou výšky v různých oblastech přidržovače podle tloušťky plechu. Tloušťka plechu má svůj jmenovitý rozměr a příslušnou toleranci, proto např. v jedné výrobní dávce má plech A větší rozměr než jeho jmenovitý rozměr a plech B je pod jmenovitým rozměrem, dochází k nedostatečnému tlaku na plech B.

Obtížně se zde také dosahuje většího tlaku na dobře tvařitelné materiály, musí se používat např. brzdící žebro, které ovšem není příliš vhodné při tváření povrchově upravených dílců, např. v automobilovém průmyslu nejčastěji používaných pozinkovaných plechů.



Obr. 77 Schodovitý přidržovač (A - tlustý plech, B - tenčí plech)

b) pružný přidržovač

Úprava přidržovače spočívá v použití pružné vrstvy na povrchu ocelového schodovitého přidržovače. Jako pružný člen se používají polyuretanové desky. Schodovitý přidržovač se vyrobí podle jmenovitého rozměru plechu a podle tloušťky nalepené polyuretanové desky se reguluje tlak přidržovače v různých částech přístřihu.

Nevýhodou této úpravy oproti segmentovému přidržovači je obtížná regulace tlaku při úpravách tvaru výlisku, a změně tloušťky nebo materiálu plechu. Regulace se provádí úpravou výšky přidržovače nebo změnou tloušťky pružné desky. Vysoký tlak polyuretanu může také způsobit nežádoucí ztenčení tloušťky stěny.

c) segmentový přidržovač

Princip segmentového přidržovače spočívá v rozdělení přidržovače podle oblastí různých materiálů na přístřihu. Každý segment má vlastní regulaci přitlačné síly. Provádí se mechanickým přednastavením výšky segmentu nebo častěji hydraulickým ovládáním každého segmentu, kterým se dá regulovat průběh tlaku na částech přidržovače i během procesu tažení.

Nevýhodu této metody jsou vysoké náklady na nástroj s ohledem na cenu hydraulických pístů, jejichž počet se zvyšuje s počtem segmentů a složitosti přístřihu.

d) úpravy tažníku a tažnice

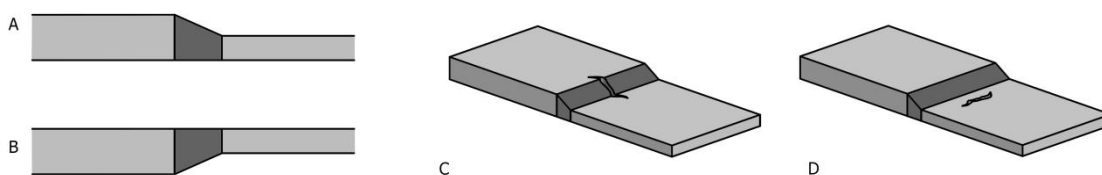
Při tváření svařeného dílu z materiálů nestejné tloušťky vzniká problém při deformaci v oblasti svaru. Může dojít ke zvlnění materiálu svarového spoje, popř. k defektům svaru či v tepelně ovlivněné oblasti.

Obr. 78 a, b ukazuje na dvě možná umístění přístřihu při lisování: rovnou stranou směrem dolů (a) nebo nahoru (b). Při lisování, kdy rovná strana je v kontaktu s tažnicí a tvarová směrem k tažníku případ (a) v případě, že se tažník pohybuje shora dolů, může dojít ke zvlnění plechu při nabalování na tažník. Toto zvlnění vzniká na tenčím z obou materiálů, protože v oblasti podél svarového spoje není plech v kontaktu s tažníkem.

Možné řešení tohoto problému spočívá ve schodovité úpravě tažníku, podobně jako u přidržovače. Tvar schodu musí být ovšem stejný, jako tvar svaru u hotového výlisku, a i v tomto případě může být problémem pohyb svarového spoje v rovině plechu při deformaci. Úpravou tažníku dojde k omezení zvlnění, ale také k navýšení nákladů na výrobu nástroje.

Při lisování, kdy se hladká strana přístřihu dotýká tažnice, by bylo toto schodovité upravení možné použít na tažnici pouze v případě, že je svar ve směru pohybu materiálu, což je málo případů. Potom by nebyla potřeba úprava přidržovače.

Dílce z polotovarů Tailored Blanks jsou většinou lisovány podle prvního případu, upravuje se tedy přidržovač a tažník. V automobilovém průmyslu je obvykle dílec orientován dutinou dovnitř, a proto je vnější povrch dílců hladký.



a, b - možné umístění přístřihu při lisování
c, d - defekty v oblasti svaru

Obr. 78 Ukázka defektů v místě svaru při lisování polotovaru z různých tloušťek plechu

Při větších napětích a deformacích může dojít k trhlinám ve svaru (obr. 78 c), pokud působí tahová napětí v ose svaru. Prasklina vzniká kvůli nízké tažnosti materiálu svaru, který se při svařování relativně rychle ochlazuje a vznikají tak pevnější a tvrdší fáze. Hodnotu tažnosti svaru lze ovlivnit volbou podmínek svařování.

Pokud působí tahová napětí kolmo na svar, dochází k trhlině na straně tenčího plechu (nebo plechu s nižší pevností), jak ukazuje obr. 78 d. Působící napětí se nejvíce projevuje v tepelně ovlivněné oblasti tenčího plechu a při překročení R_m dochází ke vzniku trhlin.

Tažení plechu je tedy technologicky náročnější hlavně z důvodu změny vlastností materiálu v oblasti svaru.

Technologie lisování z přístřihů Tailored Blanks, neboli přístřihů šitých na míru, se využívá např. v automobilovém průmyslu. K výhodám zejména patří:

- snížení hmotnosti karoserie při zachování tuhosti,
- zvýšení bezpečnosti použitím vysocepevných ocelí,
- úspora materiálu v méně namáhaných místech,
- menší počet operací svařování v dalším zpracování.

K nevýhodám lze přiřadit:

- složitější tvářecí technologie,
- vyšší cena nástrojů,
- kritická místa pro vznik trhlin v okolí svaru.

LITERATURA:

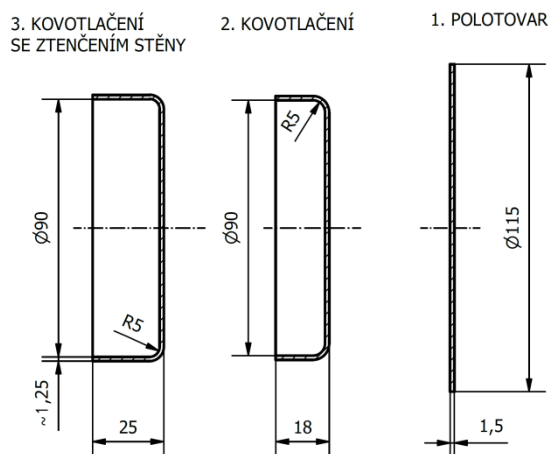
2. KOCMAN, Karel a kol.: Aktuální příručka pro technický úsek. 15. ed. Praha: Verlag Dashöfer, SAMEK, Radko: Část 8 - Tváření. 122 s. 1998. ISBN 80-902247-2-5.
3. DVOŘÁK Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ: Technologie tváření. Plošné a objemové tváření. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s. r. o., 3. vydání 2013. 169 s. ISBN 978-80-214-4747-9.
15. FOREJT, Milan. *Teorie tváření*. Vyd. 2. v Akademickém nakladatelství CERM, 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. 222. s. ISBN 80-214-2764-7.
16. TIŠNOVSKÝ, Miroslav a Luděk MÁDLE: Hluboké tažení plechu na lisech. Nakladatelství technické literatury Praha, 1990, s. 200. ISBN 04-212-90
17. BAREŠ, Karel. *Lisování*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1971, 567 s. ISBN 04-234-71.
18. LANGE, Kurt. Handbook of Metal Forming. 1985. New York: McGraw-Hill, c1985, 1156 s. ISBN 0-07-036285-8.
19. LENFELD, Petr. Technologie II. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005. ISBN 80-7372-020-5.
20. ČSN 22 7301: Lisovací nástroje. Tažení dutých válcových výtažků. Směrnice pro konstrukci. Účinnost 1. 11. 1969.
21. BOLJANOVIC, Vukota. Sheet metal forming processes and die design. New York: Industrial Press, 2004, 219 p. ISBN 08-311-3182-9.
22. DVOŘÁK, M. a kol. Výzkum tvařitelnosti nových velmi tenkých materiálů na bázi strukturovaného Sn s minimální hmotností povlaku. Výzkumná zpráva. 27 s. + 28 příloh. 2004. In: KOCMAN, K. Rozvoj progresivních vysoce přesných strojírenských technologií. MSMT 262100003.
23. ČSN 22 7303: Lisovací nástroje. Tažení dutých čtyřhranných výtažků. Směrnice pro konstrukci. Účinnost 1. 10. 1967.
24. EMMERYCH, Thomas: *ThyssenKrupp* [online]. 2009 [cit. 2009-12-01]. Dostupný z www: <http://www.ika.rwth-aachen.de/veranstaltung/2009/09-13/pdf/tkas_emmerich.pdf>
25. MEINDERS, Vincent Thomas, VAN DER BERG, Albert and Han HUÉTINK: Deep Drawing Simulation of Tailored Blanks and Experimental Verification [online]. 2009 [cit. 2009-12-01]. Dostupný z WWW: <http://doc.utwente.nl/33429/1deep_drawing_conf.pdf>.
26. www.tailoredsteelproducts.org

4. 4 ROTAČNÍ TLAČENÍ PLECHU - KOVOTLAČENÍ

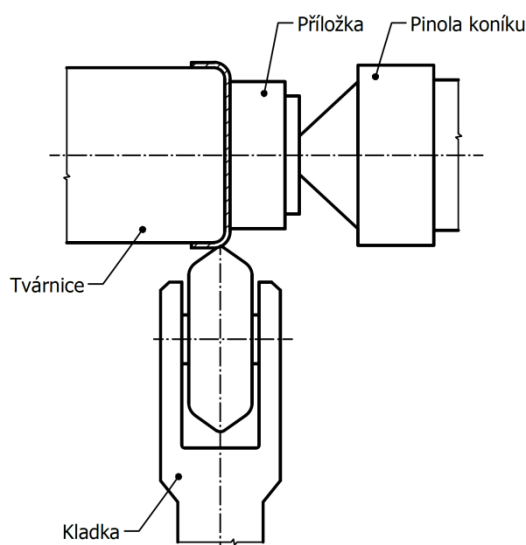
Jedná se o metodu zpracování plechu, která je vhodná pro výrobu tvarově složitých součástí s proměnnou tloušťkou stěny. Touto technologií lze zhotovovat duté, kuželové, vyduuté a vypouklé součásti bez ztenčení nebo se ztenčením tloušťky stěny (viz obr. 79). K rotačnímu tlačení se používají kovotlačitelské stroje (obr. 80). Rychlost otáčení polotovaru se volí s ohledem na druhu materiál a jeho tloušťku (viz tab. 7). K snížení tření a ke zlepšení kvality povrchu hotového dílce je nutné použít mazivo (např. mýdlo, lůj, směs loje s minerálními oleji). Rotačním tlačáním lze i lemovat, zužovat a rozšiřovat výtažky i v sériové výrobě.

Tabulka 7 Přehled rychlostí otáčení polotovaru v závislosti na materiálu.

Hliník a jeho slitiny	1200 ot. min ⁻¹
Nerezové oceli	min. 400 ot. min ⁻¹
mosaz	400 ÷ 1200 ot. min ⁻¹



Obr. 79 Ukázka technologického postupu výroby válcového výtlačku



Obr. 80 Schéma nástroje pro kovotlačení rotační součásti

Smykové tlačení je rotační tlačení plechu s redukcí tloušťky stěny výtvarku. Předností uvedené technologie je mimo jiné značná úspora materiálu vzhledem ke klasické technologii obrábění. Uvedená přednost tlačení plechu zvláště vynikne při zpracování cenově dražších materiálů, např. nerezová ocel 17 241, která je vhodná k výrobě dílců pro zařízení v potravinářském, zdravotnickém a chemickém průmyslu. Technologické a teoretické aspekty technologie kovotlačení jsou uvedeny v literatuře [27] a v patentových spisech [28].

Při klasickém tažení kuželových výtažků hrozí ztráta stability ve stěně výtažku, proto se smykové tažení nabízí jako vhodná alternativa jejich výroby. Experimentem bylo prokázáno, že je možné použít technologii smykového tlačení ke zhotovení kuželového vzorku se ztenčením stěny na 1,2 mm z původního rondelu o jmenovité tloušťce 3 mm. Z původního rozměru rondelu 40 mm byly zhotoveny kuželové výtažky s vrcholovým úhlem $52^{\circ} 22'$ z austenitické nerezové oceli 17 241.1 tepelně zpracované rozpouštěcím žháním při $T = 1075^{\circ}\text{C}$ a výdrží na teplotě 15 min a ochlazením na vzduch při $T = 20^{\circ}\text{C}$. V rámci experimentů, které proběhly na Odboru technologie tváření kovů a plastů, bylo zjištěno, že výsledky smykového tlačení byly lepší z hlediska vzorků z vyžíhané oceli za daných podmínek a funkčnosti tvaru, než v případě smykového tlačení rondelů z nerezové oceli v dodaném tvaru.

LITERATURA:

3. DVOŘÁK Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ: Technologie tváření. Plošné a objemové tváření. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s. r. o., 3. vydání 2013. 169 s. ISBN 978-80-214-4747-9.

27. VESELÝ, M. a kol.: Atlas informací pro uživatele tenkých plechů. 1. díl VUSTE, Praha. 1970. s 55 - 58.

28. Patentové spisy: DE 04431500, DE 04238815, DE 04214512, DE 03929963, DE 03104842, EP 00245050, US 04134284, US 0455976, US 03991598, US 03815396.

29. DVOŘÁK, M. a kol: Uplatnění progresivních technologií při tváření plechů s povrchovou úpravou. Výzkumná zpráva. 15 s. 1999. In: KOCMAN, K.: Rozvoj progresivních vysoce přesných strojírenských technologií. MSMT 262100003.

30. DVOŘÁK, M. a kol: Tvařitelnost plechů s úpravou povrchu. Výzkumná zpráva. 28 s. 2000. In: KOCMAN, K.: Rozvoj progresivních vysoce přesných strojírenských technologií. MSMT 262100003.

31. HAYAMA, M.: Analysis of working force in shear spinning of cones. Bulletin of the Faculty on Engineering Yokohama National University, Vol. 26, March 1977.

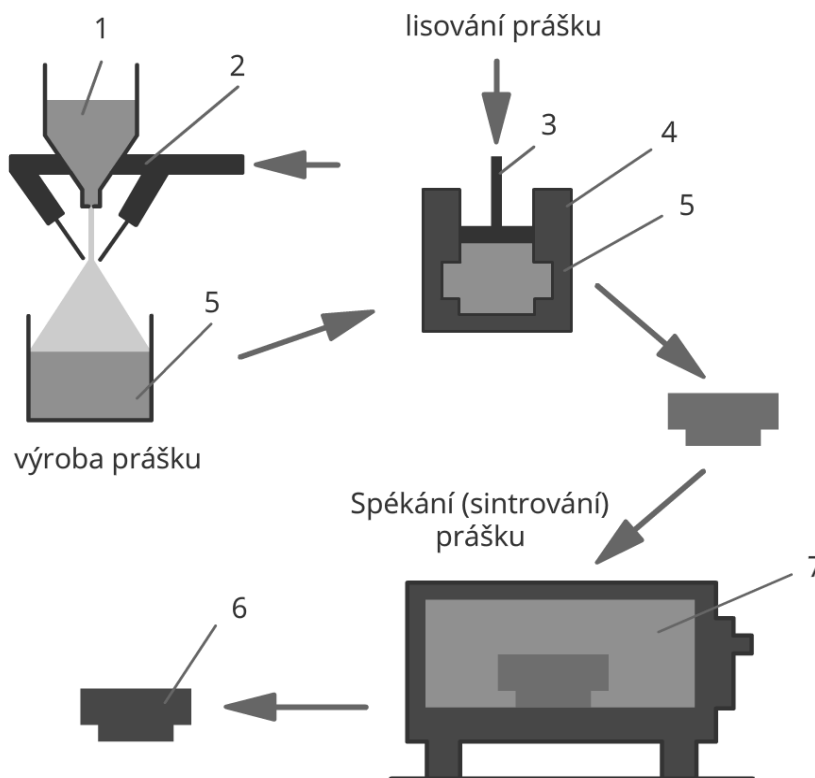
32. HAYAMA, M. and TAGO, A.: The fracture of wals on shear spinning. Bull. of the Faculty of Engineering Yokohama National University, Vol. 17, March 1968, pp. 93 - 103.

33. KALPAGCIOGLU, S.: On the mechanics of shear spinning. Fransaction of the ASME, Journal of Engineering for Industry, May 1961, pp. 125 - 130.

34. ČSN EN ISO 6892-1: Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty. Účinnost: 1. 1. 2021.

5. PRÁŠKOVÁ METALURGIE

V porovnání s ostatními technologiemi zpracování kovových materiálů je prášková metalurgie (PM) relativně mladým odvětvím. Jak název napovídá, základním meziproduktem v této technologii je kovový prášek. Technologie práškové metalurgie se skládá ze tří fází, viz obr. 81.



Obr. 81 Schéma postupu spékání prášku

5.1 PODSTATA PRÁŠKOVÉ METALURGIE

Prášková metalurgie je technologie, při které jsou zhotovovány polotovary nebo hotové výrobky spojováním kovů nebo kovů s nekovy ve formě prášků působením tlaku a tepla při teplotách nižších než je teplota tavení alespoň jedné ze spojovaných složek.

Dle požadavků na konečné vlastnosti výrobků se používají 3 základní postupy výroby:

PRÁŠEK → ZHUTŇOVÁNÍ → SLINOVÁNÍ

- nejjednodušší, nejekonomičtější,
- zhutnění max. 80 %, u menších, tvarově jednodušších výlisků lze dosáhnout většího zhutnění.

PRÁŠEK → ZHUTŇOVÁNÍ → SLINOVÁNÍ → KALIBROVÁNÍ

- vyšší rozměrová přesnost výlisků, vyšší hustota a menší pórovitost,
- během kalibrování dochází k zpevňování.

PRÁŠEK → ZHUTŇOVÁNÍ → SLINOVÁNÍ → KALIBROVÁNÍ → SLINOVÁNÍ

- teplota prvního slinování je nižší,
- po kalibraci proběhne druhé slinování (vyžíhání) → snížení vnitřního napětí, uzavření trhlinek, součást má vyšší pevnost, vyšší hustotu, lepší rozměrovou stabilitu.

Rozměrová a tvarová přesnost vyráběných součástek je ovlivněna především druhem prášku a jeho charakteristickými vlastnostmi („zabíravost“ prášku, jeho vlhkost, mazání, tvarová složitost součásti). Maximální rozměry jsou určeny druhem prášku, požadovanou hustotou a kapacitou lisu.

5.2 UŽITÍ TECHNOLOGIE PRÁŠKOVÉ METALURGIE

Tato technologie se používá v případech, kdy:

- není možné dané materiály zpracovat jinou technologií, jako například v případech spojování komponent, které se spolu neslévají,
- je tato technologie hospodárnější než jiné, jako například při zpracování materiálů s vysokým bodem tavení nebo při sériové výrobě drobných součástí,
- tato technologie dává lepší výsledky než technologie ostatní, jako například při požadavku vysoké čistoty materiálů, požadavku dosažení přesného chemického složení nebo potřeby dosažení zvláštní struktury (poréznost),
- lze kombinovat kovové a nekovové složky nebo kombinovat s prvky, které nelze připravit jinými technologiemi,
- je možnost póry nasytit dalšími kovy pro dosažení speciálních vlastností při dosažení až o 100 % nižší hmotnosti,
- je potřeba dosáhnout povrchu s vysokou odolností proti opotřebení.

Mezi nevýhody práškové metalurgie patří:

- menší hutnost a tím i pevnost a houževnatost vyrobených materiálů,
- vysoké náklady na nástroje
- tvar a velikost součástí je omezena možnostmi lisu, velikost součástí závisí na maximální lisovací síle zařízení a zákonech šíření tlaku v prášku.

5. 3 VÝROBNÍ POSTUP TECHNOLOGIE PRÁŠKOVÉ METALURGIE

Výrobní postup se skládá z těchto etap:

- ✓ výroba prášků,
- ✓ úprava prášků,
- ✓ zhutňování (kompaktizace) prášků,
- ✓ spékání čili slinování výlisků z prášků,
- ✓ konečná úprava výrobků.

5. 3. 1 Výroba prášků

Volba výrobní metody závisí na druhu kovu, jeho množství, požadované čistotě prášku, velikost a tvaru částic a ekonomičnosti postupu. Prášky je možno vyrábět:

- 1) mechanickým způsobem výroby prášku,
- 2) fyzikálně-mechanickým způsobem výroby prášku,
- 3) chemickým způsobem výroby prášku,
- 4) elektro-chemickým způsobem výroby prášku.

ad 1) MECHANICKÝ ZPŮSOB VÝROBY PRÁŠKU

Drcení a mletí tuhého kovu – velice záleží na mechanických vlastnostech mletého (drceného) materiálu, z nichž je nejdůležitější tvárnost mletého kovu. Vlivem spotřeby energie na plastickou deformaci, překonání tření a vlivem ostatních ztrát se snižuje účinnost procesu. Způsob mletí rozhoduje o stupni rozmělnění, jeho průběhu a tvaru částic prášku (u velmi jemných částic hrozí nebezpečí vzájemného třecího svařování). Křehké kovy a slitiny se drtí, je vhodná pro prášky Fe, Mn, Cr, Al, Mn, Cu, Sb, Bi, mosaz, Be, apod.

Drcení spečené kovové houby probíhá zejména v čelistových a kladivových drtičích. V čelistovém drtiči probíhá první stupeň rozmělnování (hrubý prášek), které se uskutečňuje mezi

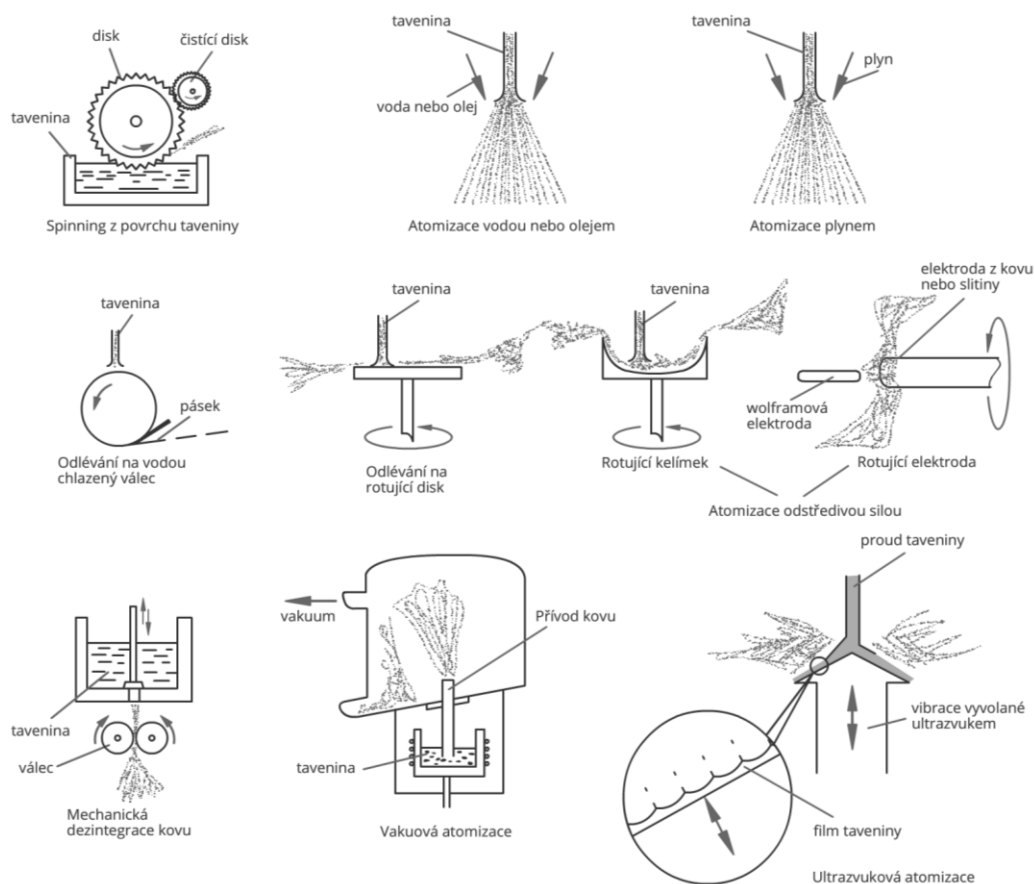
pevnou a pohyblivou čelistí. Následně je potřeba tento prášek domlít v některém jiném typu mlýnu. V kladivovém drtiči se materiál drtí pomocí nárazu kladívek, které jsou upevněné v rotoru.

Mletí zpravidla probíhá v kulovém mlýně, kdy k rozemletí dochází mechanickými nárazy tvrdých mlecích těles, vynášených rotačním pohybem bubnu na rozměšňovaný prášek. Pro mletí za mokra se využívá tzv. atritorů, kde se pohyb mletého materiálu a mlecích kuliček dosahuje míchadlem a oběhovým čerpadlem, které zajišťuje cirkulaci kapaliny s práškem.

Fe, Ni, Cu, Ag, Al prášky se vyrábějí ve vířivých mlýnech, kde se částčky navzájem otloukají, až má prášek tvar šupinek.

ad 2) FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÝ ZPŮSOB VÝROBY PRÁŠKU

Při tomto způsobu výroby prášku je tavenina rozstříkována (atomizace taveniny) působením tlakového plynu, proudu tekutiny nebo pomocí odstředivých sil (obr. 82). Takto vytvořené kapky následně tuhnou v důsledku rychlého ochlazení v rozstříkovacím mediu. Čím větší je přehřátí taveniny a mechanická energie působící na taveninu, tím větší je podíl jemného prášku. Velikost prášku se snižuje s rostoucí teplotou taveniny, tzn. s klesající viskozitou.



Obr. 82 Schéma možných způsobů atomizace taveniny

a) Rozstříkávání taveniny vodou je nejvhodnější při zpracování předem legovaných prášků. Výhody této technologie výroby:

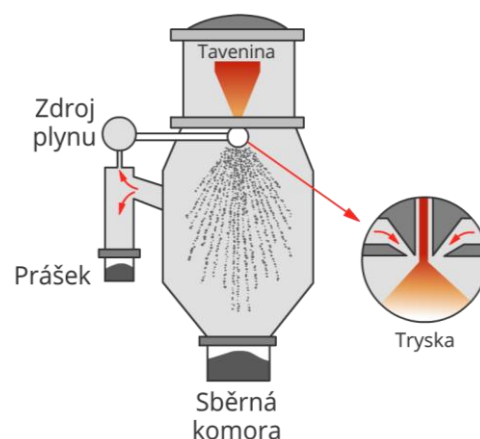
- lze použít pro většinu slitin (např. Pb, Zn, Sn, Al, Fe),
- stejnorodé složení všech částic,
- možnost ovlivnění tvaru, velikosti a struktury částic,
- vysoká čistota prášku a malé ztráty.

Proud taveniny je „roztržtý“ proudem vody. Proces atomizace taveniny vodou se vyznačuje vysokou hustotou rozstříkovacího media (vody), vysokou rychlostí ochlazování a tvorbou páry v místě kontaktu vody a taveniny. Oproti jiným způsobům je atomizace vodou ekonomicky výhodnější z důvodu nízké ceny rozstříkovacího media (vody) a dostupnosti, nestlačitelnosti, vysoké ochlazovací schopnosti a velmi vysoké produktivity, která může být až 30 t/h. Získané částice jsou charakteristické nepravidelným tvarem a relativně vysokým obsahem kyslíku. Proto např. při výrobě práškového hliníku je vzhledem k jeho tendenci k samovznícení vhodnější použít rozstříkávání inertním plynem (dusíkem, argonem).

Získaný prášek má značný obsah kyslíku, vysokou křehkost a tvrdost. U rychlořezných ocelí je jeho struktura tvořena martenzitem, karbidem, austenitem a delta feritem v důsledku vysokých ochlazovacích rychlostí. Takto získaný prášek nejde dobře zpracovat, proto je nutné ho žíhat. Žíhací proces u rychlořezných ocelí je značně náročný. Musí se snížit relativně vysoká tvrdost na cca polovinu, a to žíháním v redukční nebo inertní atmosféře. Je třeba snížit i obsah kyslíku o 1/3 a to žíháním ve vakuu. Vodou se nedoporučuje rozprašovat kovy a slitiny, které snadno a rychle korodují.

b) Rozstříkávání taveniny plynem

Podstatou atomizace plynem (obr. 83) je dezintegrace proudu taveniny vzduchem, dusíkem, heliem nebo argonem, proudícím z trysek pod tlakem. Rozprašovací tlak je nižší. Tato metoda se s výhodou používá na výrobu prášku niklových superslitin a mnoha dalších vysoce legovaných materiálů. Hlavní výhodou atomizace taveniny plynem je homogenita výroby a dobré vlastnosti prášku, plynoucí z jejich sférického tvaru (tvar částic je kulový).



Obr. 83 Rozstříkávání a chlazení plynem

c) Rozstříkávání taveniny odstředivou silou

Metody atomizace taveniny pomocí odstředivé síly lze rozdělit na jednostupňový nebo dvoustupňový proces. Mezi základní metody, využívající jednostupňový proces, patří metoda rotující elektrody REP (Rotation Electrode Process) a PREP (Plazma Rotating Electrode Process). U metody REP jsou v aparatuře umístěny dvě elektrody - anoda z příslušné slitiny, ze které se vyrábí prášek a wolframová katoda. Přiložením napětí vzniká mezi elektrodami oblouk a dochází k

natavení povrchu slitinové elektrody. Rotací této elektrody ($1000 \div 20000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$) se kapky nataveného kovu rozprašují v tanku, který má chlazený plášť. Princip metody PREP je obdobný, avšak mezi anodou ze slitinového kovu a vodou chlazenou wolframovou katodou je vybuzen heliový plazmový oblouk, který opět nataví povrch anody a v důsledku odstředivých sil dochází k oddělování kapek taveniny. Na elektrodu, která rotuje rychlostí až $15000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$, jsou kladeny vysoké požadavky na stabilitu, homogennost a povrchovou kvalitu. Výhodou této metody je dosažení vysoké čistoty produktu a to, že tavenina není v kontaktu s keramickým kelímkem nebo podložkou. Proto se používá např. na přípravu prášku titanu a jeho slitin, vzhledem k jeho korozní povaze v tekuté fázi.

Při dvoustupňovém procesu probíhá tavení daného kovu nebo slitiny (např. pomocí indukčního ohřevu v tavicím kelímku) a dezintegrace taveniny pomocí rychle rotujícího chlazeného kola, disku nebo kelímku odděleně ve dvou krocích. Problémem při dvoustupňového procesu je přenos vysokých rotačních rychlostí na taveninu. Tato metoda atomizace se používá na výrobu prášku hliníku, titanových slitin, superslitin a vysokotavitelných kovů.

ad 3) CHEMICKÝ ZPŮSOB VÝROBY PRÁŠKU

Při redukci v pevné fázi je eliminováno znečištění kovu struskou, která se vyskytuje při tavném způsobu. Získaný kovový prášek je však nutné dále rafinovat mechanickými, magnetickými nebo chemickými postupy. Nejvýznamnější je **redukce** čisté železné rudy, kdy vzniká železná houba, která se drtí, prosívá, popř. magneticky třídí. Pak následuje žihání ve vodíkové atmosféře pro snížení obsahu uhlíku a kyslíku a také k odstranění zpevnění. Prášek je levný. Lze získat i prášky Cu, Ag, Fe, Ni, Co, W, Mo, Ti.

ad 4) ELEKTRO-CHEMICKÝ ZPŮSOB VÝROBY PRÁŠKU

Přibližně 60 kovů lze úspěšně získat elektrolýzou, kde elektrický proud působí jako redukční činidlo. Elektrolytem může být roztok nebo roztavená sůl, která vede proud v důsledku přítomnosti iontů. Elektrolýzou z vodných roztoků se připravují práškové kovy, které nemají velkou afinitu ke kyslíku jako Cu, Fe a Ni.

Elektrolýza probíhá v jednoduchém případě na dvou elektrodách připojených na stejnosměrný proud, kde anoda je z kovu, jehož ionty jsou v roztoku. Při průchodu elektrického proudu se bude kov na anodě (kladná elektroda) rozpouštět a na katodě (záporná elektroda) vylučovat.

Na katodě probíhá redukce – vylučují se elektropozitivní složky (kovy, vodík), na anodě probíhá oxidace – vylučují se elektronegativní složky. Prášky vyrobené elektrolýzou jsou vysoké čistoty, mají dendritickou strukturu, dobrou lisovatelnost, vysokou pevnost neslinutých výlisků a vysokou aktivitu při slinování. Lze takto připravit prášky Fe, Ti, Cr, Nb, V, Ta apod.

5. 3. 2 Úprava prášků

Úprava prášků navazuje na jejich výrobu a způsob úpravy závisí na dalším zpracování. Nejčastěji se jedná o:

- třídění prášků podle velikosti částic proséváním, vzdušným tříděním (vhodně řízeným proudem vzduchu) nebo plavením (řízeným proudem vody nebo jiné kapaliny),
- redukci prášků po jejich výrobě a zjištění chemického složení, pokud došlo vlivem okolních podmínek k jejich povrchové oxidaci,
- sušení prášků (pokud byly vyrobeny rozprašováním vodou),
- míchání prášků podle žádaného složení výrobků v např. bubnových mísičích,
- přidávání dalších složek podle zvláštních požadavků, například přidávání maziva pro zlepšení lisovatelnosti. Slinovadla neboli pojiva jsou kovové přísady, které se přidávají do výchozích směsí pro zdokonalení slinovacího pochodu. Obvykle se při slinování částečně nebo zcela roztaví, takže slinování probíhá za přítomnosti kapalné fáze. Dalšími pomocnými prostředky jsou plniva, která se přimíchávají ke kovovému prášku v určitém množství. Během slinování dochází k jejich odpaření, takže v konečném výrobku vzniká žádaný stupeň pórovitosti.

Chemické složení prášků

Žádaného složení lze dosáhnout 2 základními způsoby:

1. **smícháním vhodných prášků** (Fe prášek + grafit + legované prvky v prášku). Konvenční smíchání základních prášků (výroba obvykle mletím nebo redukcí) umožňuje rychlé a snadné změny složení.

Takto vyrobené prášky nejsou ale vhodné pro kování jako následnou operaci. Mechanické vlastnosti jako tažnost a vrubová houževnatost jsou horší, což způsobuje metalurgická heterogenita. Nestejnorodost se odstraňuje difuzí při vysokých slinovacích teplotách po dlouhou dobu. Difuzní proces se urychluje legujícími přísadami.

2. **legovanými prášky** (rozprašením tekuté slitiny) – vyrábí se rozprašením tekuté slitiny o požadovaném složení (prášek je homogenní, každá částice má stejné složení). Při slinování lze použít nižší slinovací teploty, prášky mají lepší mechanické vlastnosti, lze je tepelně zpracovat a cementovat, mají vyšší tvrdost, což zhoršuje lisovatelnost, proto se prášky žíhají po rozprašení.

Prvky ovlivňující vlastnost výrobků:

- kyslík – vznik oxidů, které způsobují únavové trhliny; kysličnickové vrstvy zabraňují růstu zrn a snižují velikost vazby mezi částicemi.
- uhlík – zvyšuje pevnost v tahu, snižuje plastické vlastnosti a vrubovou houževnatost (jako u běžných ocelí). Vliv se redukuje vyšší popouštěcí teplotou při tepelném zpracování.

- síra – způsobuje křehkost za tepla, narušuje homogenitu.
- křemík – snižuje mechanické vlastnosti.
- nikl – zvyšuje prokalitelnost, používá se u speciálních slitin, ale hrozí vznik masivních karbidů při pomalém ochlazování, které snižují houževnatost.
- mangan – zlepšuje mechanické vlastnosti, ale má vysokou afinitu ke kyslíku, proto se přidává s cínem.
- chrom – ovlivňuje zvýšení prokalitelnosti, tvrdosti a pevnosti. Nevýhodou je opět vysoká afinita ke kyslíku, takto vzniká oxidická vrstva snižující houževnatost.
- měď – málo ovlivňuje prokalitelnost, ale nad 0,4 % zvyšuje mechanické vlastnosti a zlepšuje korozní odolnost, snižuje slinovací teplotu, spolu s cínem zvyšuje stabilitu rozměrů.
- niob – zvyšuje pevnost, ale i přetvárný odpor.

5. 3. 3 Metody zhutňování prášků

Metody zhutňování práškových materiálů lze rozdělit do dvou základních skupin:

1. Zhutňování pomocí statického nebo dynamického tlaku při pokojové nebo zvýšené teplotě – zhutňování jednostranným nebo vícestranným statickým tlakem v matrici s horním a spodním razníkem pro velkoobjemovou výrobu součástek různých typů: kování, izostatické lisování, průtlačné lisování, válcování, lisování za tepla např. pro tažné nástroje ze slinutých karbidů.

2. Beztlaké zhutňování – volný zásyp (např. výroba filtrů), strásání, vibrační zhutňování např. pro palivové elementy jaderné techniky a metoda keramického lití.

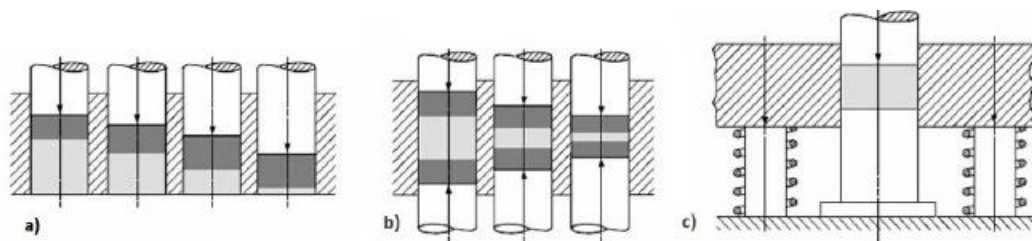
ad) 1 Zhutňování pomocí statického nebo dynamického tlaku při pokojové nebo zvýšené teplotě

a) Lisování prášků v pevných nástrojích

Při lisování dochází k zhutňování prášku a současně k jeho tvarování základního tvaru budoucího výrobku před jeho spékáním. Způsob lisování, druh lisovacích nástrojů a šíření lisovacího tlaku závisí na velikosti a tvaru částic, způsobem přípravy prášku, ale i na tření prášku o stěny nástroje.

Tření při lisování se snižuje přidáním maziv do prášků (sterát zinečnatý) nebo přímým mazáním stěn nástroje (koloidní grafit). Mazáním se snižují potřebné tlaky pro dosažení předepsané hustoty a umožňuje rovnoměrnější rozložení hustoty.

Při jednostranném lisování je nejvyšší lisovací tlak na okrajích lisovacího nástroje, nejnižší pak na spodním okraji výlisku. Při oboustranném lisování, tzn. při pohyblivém horním a dolním razníku, lze lisovat výlisky o dvojnásobné výšce. Rozdělení tlaku je lepší než u jednostranného lisování, ale je rovněž ovlivněno třením na stěnách lisovací formy. Vlastnosti výlisků do značné míry závisí na způsobu lisování. Na obr. 84 jsou uvedeny základní principy nejpoužívanějších postupů lisování v matricích. Oboustranné lisování se upřednostňuje, protože zaručuje příznivější rozložení hustoty a celkovou hustotu výlisku. Dále umožňuje rychlejší vytahování výlisku z matrice.



Obr. 84 Lisování v matrici: a) jednostranné lisování, b) oboustranné lisování, c) lisování s plovoucí matricí

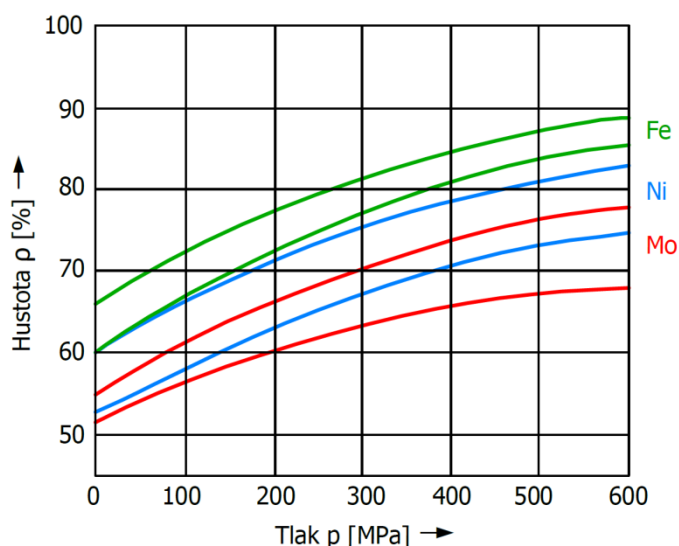
Lisovací tlaky jsou závislé především na druhu prášku a na požadovaném stupni zhutnění. Pohybují se v širokém rozmezí od 200 MPa (pro neželezné kovy nebo výrobky s nižší požadovanou hustotou) do 2000 MPa. Lisovací nástroje mohou pracovat přímočarým pohybem lisovadel, rotačně (válcováním) a vytlačováním kalibrovaným otvorem.

b) Izostatické zhutňování (lisování)

Při izostatickém lisování je prášek uzavřen v pouzdře, na které působí tlak přenášený plynem, gumou, plastickou hmotou nebo kapalinou. V tomto případě se používá hydrostatické lisování.

Hlavní přednost této metody spočívá v tom, že se odstraní tření mezi práškem a stěnami matrice, které vedlo k nerovnoměrnému rozložení tlaku, tahu i hustoty výlisku. Pouzdro, ve kterém je prášek uzavřen, musí mít speciální vlastnosti. Za vysokého tlaku se musí chovat jako kapalina, aby přenášelo tlak na prášek izostaticky. Za normálního tlaku se musí chovat jako pevná látka, aby i po naplnění těžkým práškem držela svůj tvar, na kterém závisí přesnost výlisku.

Izostatické lisování umožňuje dosáhnout vyšších hustot lisovaných materiálů (obr. 85), dovoluje vyrábět komponenty větších rozměrů a zpracovávat obtížně lisovatelné prášky – např. výroba molybdenových tyčí.

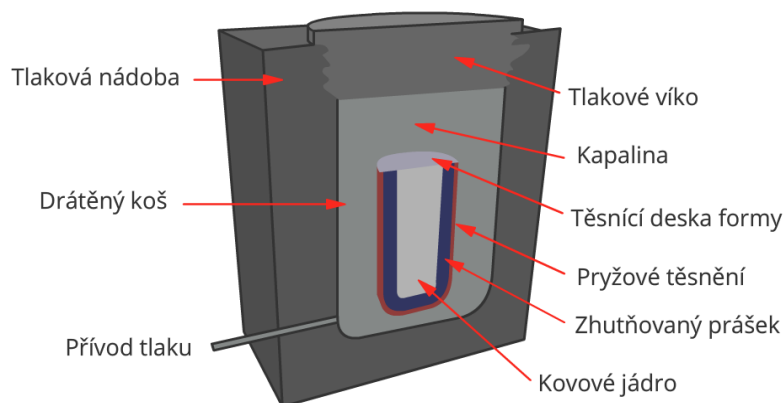


Obr. 85 Zvýšení hustoty izostatickým lisováním

Izostatické lisování za studena (CIP – cold isostatic pressing)

Tento postup izostatického lisování se provádí v ocelové tlakové nádobě. Po jejím uzavření se vhodným zařízením vyvine požadovaný tlak, který se pohybuje v rozmezí 200 MPa (pro keramiku a grafit) až do 400 MPa pro kovové prášky. Pro lisování stačí prodleva na maximálním tlaku v řádu několika sekund, ale jeho snižování se musí (zejména v oblasti nižších tlaků) provádět pomalu, aby nedošlo k tvorbě trhlin. Izostatické lisování se používá hlavně pro výlisky větších rozměrů a rotačních tvarů z obtížně tvařitelných materiálů. Tímto způsobem lze získat výrobky z SiN, keramiky a grafitu, slinutých karbidů (válce, matrice), molybdenu, wolframu aj.

Izostatické lisování za tepla (HIP - Hot Isostatic Pressing) – místo gumového pouzdra se používají pouzdra plechová, tlakové médium je nejčastěji plyn (obr. 86). Na utěsněném pouzdru je připevněna trubka pro plnění práškem a zároveň pro odvodu vzduchu. Plnění probíhá při normální nebo zvýšené teplotě, případně v inertní atmosféře. Poté jsou pouzdra uložena do palet a následuje předehřev na teplotu blízkou slinovací teplotě. Po složení do izostatického lisu proběhne zhutnění za tepla na požadovanou hustotu. V celém průběhu slinování zůstává teplota konstantní (cca 1200°C), pouze se mění tlak (cca 100 MPa). V místech dotyku částic kovového prášku vznikají za těchto podmínek nová spojení a z vysoce čistého kovového prášku tak vzniká součást s homogenní strukturou a zcela izotropními vlastnostmi. Následné kování a válcování zajistí, že konečný výrobek je bez pórů a má velmi jemnou karbidickou strukturu (velikost karbidů cca. $3 \div 5 \mu\text{m}$). Tyto konečné výrobky mohou být ve formě drátů, tyčí, plechů nebo profilů. Tváření za tepla má také za následek výrazné zvýšení houževnatosti, zvýšení bezpečnosti proti lomu, zvýšení odolnosti proti otěru a díky kvalitnímu povrchu s homogenní strukturou lze součást povlakovat. Tento výrobní proces umožňuje vyrábět slitiny s obsahem až 3,4% uhlíku a celkovým obsahem legujících prvků až 39 %, dále pro rychlořezné oceli, Ti-slitiny a superslitiny. Její výhodou je možnost zpracování velkých slinutých součástek s velmi malou (zbytkovou) pórovitostí. V případě slinutých karbidů je např. obsah pórů po lisování a slinování $1 \div 2 \%$. Zhutňování prášku na rozměry, které jsou blízké konečným požadovaným hodnotám, umožňuje dosahovat vysokého využití materiálu.



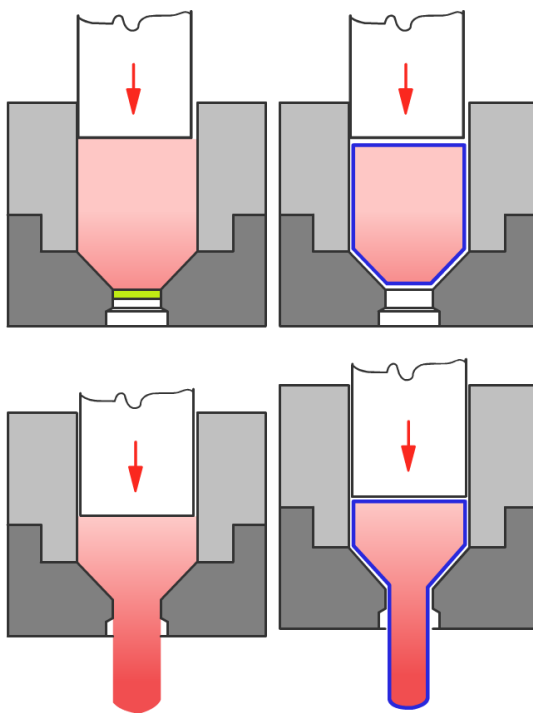
Obr. 86 Schéma izostatického lisování za tepla

c) Protlačování (extruze)

Jde o lisování kovového prášku nebo polotovarů vyrobených předlisováním, eventuálně předběžným slinováním v souvislém pramenu. Proces se může provádět za normální nebo zvýšené teploty (slinovací teploty). V případě průtlačného lisování za normální teploty je směs z prášku a plastifikátoru lisována přes trysku do formy tyčí nebo trubek. Plastifikátor je přísada, obvykle

organická látka (např. vosk, umělá pryskyřice apod.), která se přidává ke kovovým práškům pro vznik plastické těstovité hmoty vhodné ke tvarování. Schéma přímého a nepřímého způsobu protlačování je uveden na obr. 87.

Technologie protlačování se používá pro všechny materiály, které mohou být zpracovány postupy práškové metalurgie. Jedná se o slinuté karbidy, vysokoteplotní materiály s vysokou tvrdostí a zejména o technickou keramiku. Lisovací směs obsahuje 20 – 30 % plastifikátoru, který musí být před vlastním slinováním odstraněn. Lisovací tlak je realizován např. pomocí pístu nebo šneku. Jemné prášky vyžadují vyšší tlaky než v případě protlačování hrubých prášků, protože vzniká více spojů, které se v procesu lámou a opět svařují.

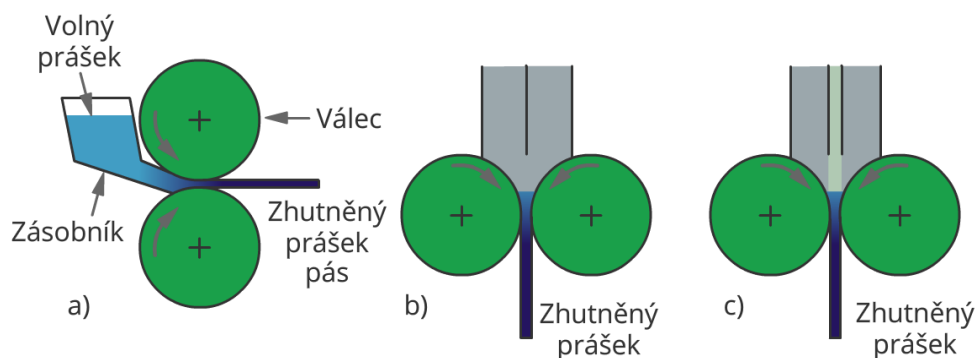


Obr. 87 Schéma protlačování prášku

d) Válcování prášků

Při technické realizaci válcování prášků je snaha zařadit do jedné technologické linky následné slinování surového pásu, jeho další tváření za studena, žíhání s případným dalším válcováním za studena. Avšak vzhledem k různé rychlosti jednotlivých operací je někdy účinnější provádět tyto operace odděleně.

V případě výroby pórovitých pásů nebo pásů z těžce tvařitelných nebo speciálních materiálů je technologie válcování prášků často jediným možným způsobem zpracování. Jedná se např. o výrobu pásů se speciálními magnetickými a elektrickými vlastnostmi ze slitin Al-Ni-Co nebo Cu-Ti. Dále se tento způsob aplikuje při výrobě povlakovaných pásů pro třecí nebo kluzné materiály (obr. 88a) a bimetalických (obr. 88b) nebo trimetalických pásů (obr. 88c).



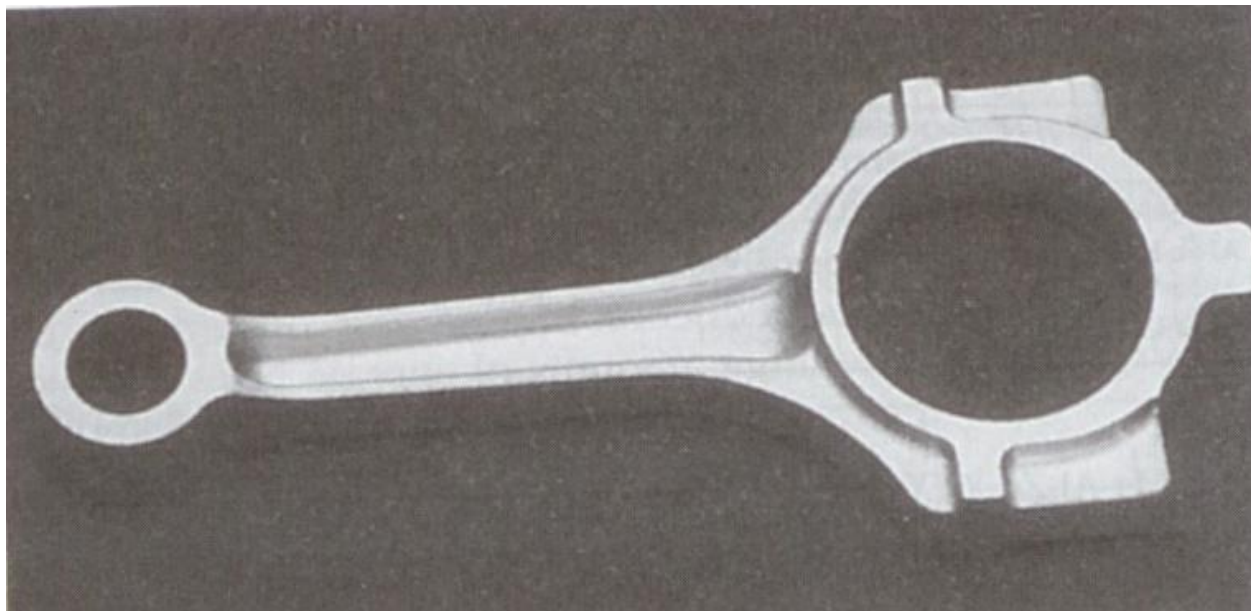
Obr. 88 Uspořádání válcování prášku: a) horizontální uspořádání se šnekovým přívodem prášku, b) svislý přívod prášku (příprava bimetalu), c) svislý přívod prášku (příprava trimetalu)

e) Kování prášků

Tato technologie spojuje výhody práškové metalurgie s technikou kování v zápustkách. Dají se tak připravit poměrně komplikované tvary o vysoké hustotě (až 99,5 %) a přesnosti výrobku (obr. 89). V zásadě lze provádět kování buď neslinovaného výlisku (tj. kování prášků) nebo výlisku slinovaného, většinou v ochranné atmosféře za tepla.

Technologické operace kování:

- příprava práškové směsi – mísení práškové kovu s lisovacími přísadami (lubrikanty, grafit, aj.),
- lisování předlisku,
- ohřev za účelem odstranění maziva pod ochrannou atmosférou,
- slinování (v případě kování slinutého výlisku),
- kování,
- závěrečné operace (tepelné zpracování, broušení ap.).



Obr. 89 Ojnice, vyrobená kováním prášků

f) Lisování explozí

Stlačování prášku detonací trhavin lze provést explozí buď na volném prostranství, nebo v uzavřených tlakových nádobách.

Lisování explozí na volném prostranství může být provedeno následujícím způsobem:

a) práškové materiály jsou stlačovány přímo (tzv. kontaktní systém) – kontejner s práškem je v přímém kontaktu s náloží; získání výlisků ve tvaru tyčí nebo trubek,

b) explozivní lisování s plochou náloží – výroba polotovarů ve tvaru desek.

Formování prášků detonací v uzavřených tlakových nádobách je principiálně velmi podobné konvenčnímu lisování kovových prášků. Mohou se používat běžné systémy nástroje válec – píst, přičemž se razníku udílí impuls buď tlakovou vlnou, nebo úderem ocelového válce, uvedeného do pohybu detonací příslušné dávky trhavinové nálože.

ad 2) Tvarování bez působení vnějšího tlaku

Všechny metody tvarování bez působení vnějšího tlaku mají společný princip v tom, že se ke kovovému prášku přidává takové množství vhodné nekovové látky, aby vzniklá suspenze byla buď tekutá a dala se odlévat, nebo byla tvárná. Tato látka musí být z výrobku beze zbytku odstranitelná, a to za takových podmínek, aby nedošlo k porušení jeho tvaru před dosažením dostatečné pevnosti slinováním. Mezi hlavní výhody patří:

- a) není zapotřebí nákladných lisů a lisovacích nástrojů, tzn. nízké pořizovací náklady na vybavení,
- b) lze ekonomicky vyrábět i menší série,
- c) lze zvětšit velikost vyráběných částí.

Metoda keramického lití

Do sádrové formy se odlévá buď plný odlitek, nebo dutý odlitek na kovové jádro. Dutý odlitek je možné získat také tak, že po usazení tuhých částic v určité tloušťce na stěně formy se zbytek břčky vylije. Tato metoda je velice rozšířena v keramice. Nazývá se metodou lití břčky, kterou se obvykle označuje suspenze jemného jílu v nosné kapalině, nejčastěji vodě.

Pro přípravu břčky u kovových prášků platí stejné zásady jako v keramice. Břčka je tím stářejší, čímž jemnější je prášek a čímž větší je viskozita nosné kapaliny (poměr kovového prášku ke kapalině 3:2). Protože kovové prášky jsou často hrubší než keramické a protože viskozitu není možné zvyšovat s ohledem na lití, hrají rozhodující úlohu při přípravě břčky stabilizátory (např. sodné a amonné soli kyseliny alginové). Stabilizátory zabráňují tomu, aby se suspenze tuhé fáze neoddelila od kapaliny a sedla ke dnu formy v čase kratším než je doba zpracování břčky.

5. 3. 4 Spékání (slinování) prášků

Po kompaktizaci prášků, které se provádí lisováním, následuje slinování (spékání) za vysokých teplot. Při lisování dojde pouze k mechanickému zaklesnutí práškových částic, jejich vzájemné difúzní spojení nastává až ve fázi slinování.

Teplota slinování závisí na druhu spojovaného materiálu a na jeho složení. V případě slinování polotovarů vytvořených z jednoho prášku, tj. prášku vyrobeného z jediného materiálu, se volí teplota slinování ve výši asi 80 % teploty jeho tavení. Ke spojování částic prášku dochází difúzí.

U polotovarů vytvořených ze směsi prášků může dojít ke spojení prachových částic dvojím způsobem:

- v prvním případě je teplota slinování nižší než teplota tavení všech složek směsi a ke spojení dochází difusí,
- ve druhém případě je teplota slinování vyšší než teplota tavení některé nebo některých složek, přičemž alespoň jedna ze složek zůstává v tuhém stavu. Pak dochází ke spojení tuhých částic jejich smáčením kapalnou fází a následující difusí (podobně jako při pájení).

V případě nebezpečí oxidace prášků nebo jejich jiného nežádoucího chemického ovlivnění se slinování provádí v ochranné atmosféře nebo ve vakuu.

5. 3. 5 Konečná úprava slinutých výlisků

Slinuté výrobky často ještě nevyhovují na ně kladeným požadavkům. Proto se u nich provádí konečná úprava, která závisí na druhu spékaného materiálu a účelu výrobků. Mezi nejčastější konečné úpravy patří:

- opakované lisování a slinování s cílem zvýšení hutnosti a tím i pevnosti a houževnatosti,
- kalibrování, což je dolisování za studena pro dosažení přesného tvaru a rozměrů,
- nauhličení, které se provádí u ocelových výrobků, které mají být za účelem zvýšení tvrdosti kaleny,
- zaplnění pórů kovem s nižší teplotou tavení, například mědí nebo niklem, za účelem odstranění porézности,
- sycení mazivem u výrobků, které mají mít nízký součinitel tření (samomazná ložiska),
- povrchová ochrana proti korozi.

5. 4 VÝROBKY PRÁŠKOVÉ METALURGIE

Výrobky zhotovené technologií práškové metalurgie mohou být vytvořeny z různých materiálů a sloužit různým účelům. Proto je při snaze o systematické uspořádání jejich výčtu možno sestavit přehledy podle různých hledisek. V následujícím přehledu bylo zvoleno hledisko použití výrobků v hlavních technických oborech.

- **Konstrukční (strojní) součásti**

- **mechanicky namáhané součásti** - menší sériově vyráběné součásti, u nichž nejsou kladeny vyšší nároky na pevnost houževnatost (součásti pro motorová vozidla, do kancelářských strojů, šicích strojů, kuchyňských strojů, ozubená a řetězová kola, pístní kroužky). Materiálem je ocel, ocel s grafitem, ocel s mědí, bronz.

- **kluzná ložiska**

- tlustostěnná samomazná ložiska – využívá se poréznosti jejich struktury k získání dlouhodobé samočinné mazací schopnosti. Před montáží do stroje se ložiska sytí olejem.
- tenkostěnná ložiska tlakově mazaná - mají stejný tvar a funkci jako tentýž typ ložisek vyráběný obráběním s tím rozdílem, že umožňuje značnou úsporu materiálu. Nejčastějším materiálem je olověný bronz.
- tenkostěnná ložiska nemazaná - jsou vyrobená ze směsi cínového bronzu a plastu s nízkým součinitelem tření, nejčastěji teflonu, proto nevyžadují žádné mazání. Nejsou ale vhodná pro vyšší rychlosti otáčení.

- **třecí materiály** – jedná se o materiály s vynikající odolností proti abrazi a s dobrou tepelnou vodivostí. Důležité jsou také odolnost proti zadření a mechanická pevnost. Používají se u strojních součástí, kde je požadován vysoký součinitel tření (např. pro vysoce zatěžovaná spojková a brzdová obložení dopravních prostředků). Prášková metalurgie spojení kovu (ocel, bronz) a keramické složky (přidává se křemenný prach, karbid křemíku nebo asbest zvyšující tření). Pro dosažení např. měkkého záběru nebo zamezení blokování, se přidává grafit a olovo.

- **pórovité materiály (kovové filtry a destičky)** – jsou to porézní materiály s řízenou velikostí pórů (od jednotek do stovek mikrometrů), využívají k filtraci i k čištění kapalin a plynů. Bývají vyráběny z kovů, jako je ocel, bronz, nikl, stříbro, karbid wolframu, karbid křemíku, korozivzdorné oceli, titan atd.). Jsou relativně houževnaté, vyznačují se dobrou korozní odolností, odolností proti tepelným šokům a proti mechanickému namáhání.

- **žárovzdorné a žárovevné materiály** – používají se pro tepelné motory nebo měřicí techniku.

Do této skupiny patří

- vysokotavitelné kovy, jako wolfram (3 410 °C), tantal (2 996 °C), molybden (2 610 °C), niob (2 486 °C), vanad (1 890 °C), chrom (1 875 °C), titan (1 668 °C),
- kysličníky, především Al_2O_3 , a jejich spojení s kovy; například pro výrobu hořáků, pyrometrů a tepelně namáhaných forem se užívá slinutina složená z 30 % Al_2O_3 a 70 % chromu,
- karbidy některých kovů (wolframu, titanu a dalších); například na lopatky spalovacích turbin se užívá slinutina $\text{TiC}+\text{Ni}+\text{Cr}$,

- silicidy, tj. sloučeniny křemíku s některými kovy spojené s dalšími složkami; například pro výrobu tavicích kelímků a trysek raket se užívá slinutina $\text{MoSi}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$,
- boridy, tj. sloučeniny bóru s některými kovy (zirkonem, titanem, chromem, molybdenem); příkladem užití jsou hořáky tryskových a raketových motorů nebo ventilová sedla pístových spalovacích motorů.

- **Elektrotechnické součásti**

- **magnety** – vyrábějí se z kovů nebo jejich kyslíčků. Podle magnetických vlastností, které je možno ovlivnit složením, se rozdělují na materiály magneticky měkké a magneticky tvrdé.

Kovové magnety se vyrábějí ze železa nebo ze směsi železa s hliníkem, niklem, kobaltem či molybdenem. Známé jsou magnety označované Alnico, zhotovené z Fe, Al, Ni a Co. Někdy se přidávají i nekovové složky, například křemík.

Nekovové magnety se vyrábějí z kyslíčků železa FeO nebo Fe_2O_3 jejich slučováním s kyslíčky jiných kovů (zinek, mangan). Pro jejich označení se užívá názvu ferity. Nejvýznamnější jsou sloučeniny MnOFe_2O_3 a ZnOFe_2O_3 . Žádný z těchto kyslíčků sám není magnetický, jejich sloučenina je feromagnetická.

- **kontakty** – je u nich požadována vysoká elektrická vodivost, vysoká tepelná vodivost, tvrdost a odolnost proti erozi elektrickým obloukem. Tyto vlastnosti jsou do určité míry protichůdné a zpravidla jich není možno dosáhnout použitím jediného kovu. Pro velká napětí, malé proudy a častá přerušení se užívá wolfram. Pro velká napětí a velké proudy se užívá wolfram s mědí nebo stříbrem. Pro nižší napětí a velké proudy se užívá stříbro s niklem nebo kyslíčkem kadmia.

- **vlákna** - vedou proud při vysokých teplotách, proto se nejčastěji zhotovují z wolframu nebo molybdenu. Mají vysokou teplotu tání (wolfram 3 410 °C, molybden 2 610 °C), proto se vyrábějí redukcí pevných práškových oxidů vodíkem v tuhém stavu. Vlastní spékání prášků probíhá při teplotách vyšších než 1 500 °C v případě molybdenu a v případě wolframu dokonce vyšších než 2 500 °C. Pevné polotovary jsou opakovaně tvářeny za vysokých teplot až do finálních tvarů.

- **Nástrojové materiály**

- **slinuté karbidy (WC (TiC,TaC) – Co)** – jsou to velmi tvrdé kompozitní materiály, u kterých jsou částice karbidů (WC, TiC, TaC) spojeny dohromady měkkým kobaltem. Výchozími surovinami pro jejich výrobu jsou karbidy wolframu, titanu, chromu, molybdenu, tantalu, niobu a dalších. Ke karbidovým práškům se jako pojivo přidává kobalt.

- **keramické řezné materiály**- základní složkou je umělý korund, kyslíček hlinitý Al_2O_3 . Pro zvýšení houževnatosti se přidává karbid wolframu nebo karbid molybdenu.

- **brusné materiály** - těleso kotouče je zpravidla z hliníku. Na jeho funkčním povrchu se pak nalisováním a spékáním vytváří vrstva diamantových brusných zrn s kovovým pojivem.

- **nitridy a koridy** – do této skupiny patří různé sloučeniny dusíku a sloučeniny boru, nitridy a boridy. Nejznámějším materiálem této skupiny je nitrid bóru, uváděný pod obchodním označením borazon.

LITERATURA:

35. KRAUS, Václav: Tepelné zpracování a slinování. ZČU v Plzni, 2013. 274 s. ISBN: 978-80-261-0260-1.
36. *ASM Handbook: Volume 7: Power Metal Technologies and Applications*. Ed. Peter W. Lee. 1st. ed. Materials Park: ASM International 1998, 1147 p. ISBN 978-0871703873.
37. GERMAN, RANDALL, M. *Sintering Theory and Practice*, Canada: Wiley, 1996. 568 s. ISBN: 978-0-471-05786-4.
38. ANGELO, P., SUBRAMANIAN, R. *Powder metallurgy: Science, Technology and Applications*. Delhi: PHI Learning Pvt, 2008. 312 p. ISBN 9788120332812.
39. SKOTNICOVÁ, Kateřina a Miroslav KURSA. *Prášková metalurgie: studijní opora*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, 2014. ISBN 978-80-248-3596-9.