



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

POUŽITÍ TECHNOLOGICKÝCH ZKOUŠEK TVAŘITELNOSTI PŘI TVÁŘENÍ

THE APPLICATION OF TECHNOLOGICAL FORMABILITY TESTS AT FORMABILITY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ALEŠ PAGÁČ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. MICHAELA CÍSAŘOVÁ

BRNO 2012

ABSTRAKT

PAGÁČ Aleš: Použití technologických zkoušek při tváření.

Práce vypracovaná v rámci bakalářského studia oboru B-STG předkládá návrh vhodnějšího materiálu pro výrobu zadané součásti. Byl vypracován technologický postup výroby zadané součásti. Na základě literární studie problematiky hlubokého tažení a podle technologických výpočtů byl zvolen hydraulický tažný lis CUPS xx DEU o jmenovité síle 250 kN a navrženo tažení na postupovém nástroji. Materiálem funkčních částí byla zvolena slitinová nástrojová ocel 19 436.9.

Klíčová slova: Tažení, tažný nástroj, ocel 19 436.9, hydraulický lis

ABSTRACT

PAGÁČ Aleš: The Application of Technological formability Tests at Formability.

The work elaborated in frame of Bachelor's studies branch B-STG presents a proposal of a creation technology of assigned component. Was elaborated technological procedure production of assigned component. On the basis of literary of the issue of drawing and calculation realized engineering hydraulic deep drawing press with nominal tensile force 250 kN and constructed drawing die. Drawing punch and drawing die are produced from alloyed instrumental steel 19 436.9.

Keywords: deep drawing, drawing die, 19 436.9 steel, hydraulic press

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PAGÁČ, Aleš. Použití technologických zkoušek tvařitelnosti při tváření. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 61 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michaela Císařová.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V dne 25.5.2012

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji paní Ing. Michaele Císařové za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce.

Dále děkuji paní Ing. Eva Šmehlíkové, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce.

Dále pak Doc. Ing. Milanu Dvořákovi, CSc. za realizaci při zkoušce tvařitelnosti hloubením dle Erichsena.

Ing. Kamilovi Podanému, Ph.D. za realizaci, ochotu a odbornou pomoc při tahové zkoušce.

Zadání	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
Obsah	

ÚVOD	10
1. SOUČASNÝ STAV	11
1.1 Ceny ocelí	11
2. TVAŘITELNOST V PLOŠNÉM TVÁŘENÍ	13
2.1 Chemické složení, mikrostruktura, mechanické a technologické vlastnosti	13
2.2 Kvalita a rozměrová přesnost plechů	14
2.3 Zkoušky tvařitelnosti	14
2.3.1 Zkoušky mechanických vlastností plechů	15
2.4 Zjišťování a hodnocení tvařitelnosti plechů pomocí technologických zkoušek	20
2.4.1 Zkouška hloubením podle Erichsena	21
2.4.2 Zkouška kalíškovací	22
2.4.3 Zkouška rozšiřováním otvoru podle Siebela a Pompa	23
2.4.4 Zkouška tažením v kuželové tažnici (Fukuiho zkouška)	24
2.4.5 Zkouška hydraulická (Tomlenova)	25
2.4.6 Zkouška zvlněním (Conical Cup Wrinkling Test)	26
2.4.7 Zkouška vyboulením (Yoshida Buckling Test)	26
2.4.8 Zkouška kombinovaná - hluboké tažení a hloubení (Engelhartova - Grossova)	27
2.5 Zkoušky ohybatelnosti plechů	28
2.5.1 Zkouška lámavosti	28
2.5.2 Zkouška dvojitém ohybem	29
2.5.3 Zkouška střídavým ohybem	29
2.5.4 Zkouška podle Gütha	30
3. TECHNOLOGIE TAŽENÍ	31
3.1 Schémata napjatostí a deformací	31
3.2 Základní postup výroby výtažku	32
3.3 Princip tažení rotačních výtažků	32
3.4 Tažení válcových součástí s přírubou	33
3.5 Vady výtažků	34
3.6 Procesní parametry tažení	35
3.6.1 Tvar a velikost přístřihu	35
3.6.2 Počet tažných operací	36
3.6.3 Tažná síla a práce	37
3.6.4 Použití přidržovače	39
3.6.5 Tažná mezera	40
3.6.6 Tažná rychlost	40
3.6.7 Poloměry zaoblení tažné hrany tažníku a tažnice	40
4. ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ MATERIÁLU	43
4.1 Navržené materiály	43
4.2 Zkouška tahem ČSN EN 10002 – 1	43

4.3 Zkouška hloubením podle Erichsena ČSN EN ISO 20482	47
5. NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY SOUČÁSTI	49
5.1 Určení základních rozměrů	49
5.1.1 Stanovení velikosti výchozího polotovaru	49
5.1.2 Nástřihový plán	50
5.1.3 Určení počtu tažných operací	53
5.1.4 Součinitel tažení	53
5.1.5 Poloměr zaoblení hran nástroje	53
5.1.6 Velikost tažné mezery	53
5.1.7 Průměr tažníku a tažnice	54
5.1.8 Určení potřeby přidržovače	54
5.1.9 Zdvih tažného beranu a vyhazovače	55
5.1.10 Síla přidržovače	55
5.1.11 Tažná síla	55
5.1.12 Tažná práce	56
5.2. NÁVRH STROJE	56
5.3. NÁSTROJ.....	57
6. Závěr	61
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých zkratk a symbolů	
Seznam příloh	
Výkresová dokumentace	

ÚVOD [4], [7]

Technologie plošného tváření patří k nejhospodárnějším, nejproduktivnějším a nejprogresivnějším výrobním metodám. Technologie tváření patří do oblasti beztržkových technologií, lze vyrobit součásti rozmanitých tvarů a rozměrů jinou technologií téměř nevýrobitelné a zároveň velmi přesné. Během tváření je materiál účinkem vnějšího zatížení uveden do plastického stavu, ve kterém mění svůj tvar i vlastnosti a je přetvořen do konečné podoby výrobku bez porušení jeho soudržnosti. Nástroje pro tváření bývají většinou ekonomicky nákladné a jejich hospodárné využití má význam až v sériové či hromadné výrobě, kdy je pořizovací cena nástroje vykompenzována velkou produktivitou výroby a nízkými provozními náklady.

Tažení je proces, kde je využito tažníku k vytvarování rovinného plechu tokem materiálu mezi povrchem tažníku a tažnice. Přístřih je formován do válcového, kuželovitého, obdélníkového či jiného obecného tvaru. Touto technologií je možné produkovat konečné výtažky s použitím minimálního počtu operací, tvorbou minimálního odpadu, většinou bez dalších přídavných operací. Rozvoj specifických metod hlubokého tažení je úzce spjat s technologickým vývojem obzvláště v automobilovém a leteckém průmyslu. Lze vyrábět díly různých tvarů a rozměrů pro rozmanité výrobky od velmi malých dílů v elektronickém průmyslu až po rozměry několika metrů v jiných průmyslových odvětvích. Životnost tažných nástrojů je velmi vysoká, což se pozitivně promítá do ceny výrobku.

Tématem mé bakalářské práce je navrhnout levnější variantu výroby kalíšku. Výrobce vyrábí kalíšek z oceli 17 240 a náklady na materiál jsou příliš vysoké vzhledem k tomu, že na součástku nejsou kladeny vysoké požadavky na materiálové vlastnosti, geometrickou přesnost. Výtažek nebude vystaven velkému mechanickému namáhání.



Obr. 1 Příklady součástí vyráběných technologií tváření [14]

1. SOUČASNÝ STAV

V rámci zadání bakalářské práce je na základě výsledků vybraných technologických zkoušek zvolen vhodný materiál pro výrobu zadané součásti a navržen technologický postup výroby dané součásti. Součást má tvar kalíšku (viz. obr. 2) a původním záměrem bylo vyrábět tuto součást z oceli 17 240.



Obr. 2 3D model výtažku

Vzhledem k budoucímu využití této součásti je původní materiál nevhodný, a to jak z hlediska ceny, tak i uplatnění. Kalíšek nebude vystaven žádnému mechanickému namáhání a bude pracovat v “mastném” prostředí, proto je možné pro výrobu zadané součásti užít materiály s nižšími mechanickými vlastnostmi.

Byly navrženy tyto oceli: 11 321.21 a 11 300 (více viz. kap. 4). Jejich vhodnost pro výrobu zadané součásti technologií hlubokého tažení bude ověřena v rámci vypracování cílů předkládané bakalářské práce. Na základě porovnání výsledků vybraných technologických zkoušek u navržených materiálů bude posléze vybrán vhodný materiál, ze kterého bude vyráběna zadaná součást. Pro tuto součást bude navržen technologický postup výroby, dále vhodný nástroj a stroj. Vše bude doplněno výkresovou dokumentací.

1.1 Přehled cen ocelí [6], [11]

Vzhledem k cíli bakalářské práce, nalézt levnější možnost výroby zadané součásti volbou vhodnějšího materiálu, jsou pro srovnání níže uvedeny ceny původního a nově navržených materiálů.

Původní materiál:

Ocel 17 240 2 x 1000 x 2000 - 2758 Kč/tab
- 86,2 Kč/kg

Nově navržené materiály:

Ocel 11 321.21 2 x 1000 x 2000 - 960 Kč/tab
- 27,46 Kč/kg

Ocel 11 300 2 x 1000 x 2000 - 1924 Kč/tab
- 54,96 Kč/kg

2. TVAŘITELNOST V PLOŠNÉM TVÁŘENÍ [7]

Vlastnost, při které se u kovu trvale mění tvar bez porušení tvářeného tělesa v konkrétních technologických podmínkách, se nazývá tvařitelnost. Důležitou vlastností tvářeného materiálu je plasticita, která je definována velikostí klasického přetvoření do porušení tělesa v konkrétních termomechanických podmínkách.

2.1 Chemické složení, mikrostruktura, mechanické a technologické vlastnosti [1], [4]

Mezi základní materiálové vlastnosti, které ovlivňují tvařitelnost plechu patří chemické složení, mikrostruktura, mechanické a technologické vlastnosti.

Nízkolegované hlubokotažné oceli ovlivňují vedle uhlíku (C) také mangan (Mn), který zvyšuje tvrdost a pevnost a naopak snižuje houževnatost plechů. Jeho přítomnost je ale nutná z důvodu, že váže síru za vzniku dobře tvařitelných sulfidů. Obsah manganu by měl být max. 0,40 %. Dalším prvkem je malé množství křemíku (Si), který obsahují pouze uklidněné oceli. Křemík patří k prvkům, které materiál zpevňují a tím zhoršují plastické vlastnosti. Doporučený obsah Si je max. 0,03%. Jako nežádoucí prvky jsou v hlubokotažných ocelích obsaženy fosfor (P) a síra (S). Jejich obsah by měl být minimální max. 0,025%. Plyny, jako dusík (N) a kyslík (O), tvoří kovové vměstky (oxidy a nitridy) a působí na stárnutí oceli a snížení plastických vlastností u hlubokotažných plechů. Dalšími doprovodnými prvky jsou chrom (Cr), měď (Cu), nikl (Ni), cín (Sn) a molybden (Mo). Tyto prvky se do oceli dostávají ze surového železa a ocelového odpadu. Většina těchto prvků zpevňuje materiál a jejich obsah je snahou minimalizovat.

Na tvařitelnost a mechanické vlastnosti hlubokotažné oceli má podstatný vliv mikrostruktura. Základní složku nízkolegovaných hlubokotažných plechů tvoří ferit a cementit. U feritu je zásadní velikost a tvar feritického zrna a u cementitu množství, tvar a rozložení. Nejvýhodnější tvar feritických zrn je zploštělý. Velikost těchto zrn má vliv na kvalitu povrchu výtažku. Plechy s velikostí zrna 5 a 6 dle ČSN 42 0463 dávají po tvářecí operaci povrch drsnější, než v případě zrn 7 a 8. Rovněž nerovnoměrná velikost zrn způsobuje různou deformaci tvářeného plechu především při tažení, což se projevuje nebezpečím vzniku prasklin. U zvláště hlubokotažných plechů se připouští rozdíl ve velikosti jednotlivých zrn maximálně v rozsahu dvou čísel. Nejprůzračnější tvar cementitu je jeho vyloučení v tzv. globulích v pravidelném rozložení na základní feritické fázi. Naopak uspořádání cementitu ve tvaru lamel nebo v řádcích není pro tažení výhodné.

Na základě provedených mechanických a technologických zkoušek lze usuzovat chování plechu při tváření v praxi. Při tom se nejčastěji sledují parametry jako jsou: mez kluzu (R_e), mez pevnosti (R_m), tažnost (A_{80}), kontrakce (Z), tvrdost (HV), hloubka vtisku podle Erichsena (h), exponent zpevnění (n), hodnoty plošné (A) a normálové anizotropie (R), poměr R_e/R_m , minimální poloměr ohybu (R_{min}) a součinitel tažení (m). Hodnoty meze kluzu, meze pevnosti, plošnou anizotropii, poměr R_e/R_m se zjišťují tahovou zkouškou. U tenkých hlubokotažných plechů se k dosažení dobré tvařitelnosti doporučují hodnoty: $R_e \leq 190$ MPa, $R_m \geq 270$ MPa, $A_{80} \geq 36$ % a poměr $R_e/R_m \leq 0,7$. Jsou-li výtažky obtížnějšího tvaru měl by poměr R_e/R_m být menší a naopak materiály

s poměrem R_e/R_m vyšším jsou hůře tvařitelné. Průběh tahové zkoušky by měl být plynulý, bez výrazné horní a dolní meze kluzu a bez Ludersovy deformace (zdrsnění povrchu výlisku). V případě jejího výskytu je nutno u dílců, kde se požaduje hladký povrch, zařadit dodatečnou operaci. Hodnoty tvrdosti plechu určených k tažení mají být co nejmenší.

2.2 Kvalita a rozměrová přesnost plechů [1], [4]

Na kvalitu a rozměrovou přesnost plechů má výrazný vliv výrobní historie tj. způsob zkujňování ocelí, odlévání, válcování a tepelné zpracování.

Při válcování za tepla se na výsledné struktuře plechu a její rozměrové přesnosti projevují teplota materiálu při zpracování, velikost úběru na jednotlivých válcovacích stolicích, teplota při doválcování apod. .

Válcováním za studena se zhotovují tenké plechy. Před vlastním válcováním je nutno odstranit okuje z povrchu plechu. Toto se provádí například mořením v roztoku kyseliny sírové při teplotě 100° C. Stupeň deformace plechu při válcování za studena na spojitých válcovacích tratích je až 70 %, což má za následek výrazné zpevnění materiálu a vzniká tím struktura s orientací ve směru válcování. Vytvoření vhodné mikrostruktury plechu a tím odstranění deformační textury i zpevnění se dosáhne rekrytalizačním žíháním. Podmínky válcování za studena a žíhání mají výrazný vliv na konečné vlastnosti plechu. K odstranění výrazné meze kluzu u žíhaných plechů se používá hladící válcování s úběrem o 2 % tloušťky plechu. Lze též použít rovnání plechu na válcové rovnačce nebo provést deformaci tahem.

Jakost povrchu plechu je předepsána v ČSN - technické dodací předpisy. U plechů určených ke zpracování tvářením by měl být povrch čistý, rovný ve stavu lesklém nebo matném, na povrchu nesmí být trhliny, šupiny, dutiny, zaválcované okuje, přeložky ani žádné zaválcované vměstky. U kvalitnějších plechů se dokonce vylučuje i zabarvení povrchu od tepleného zpracování.

Tenké plechy určené ke zpracování tvářením mají z hlediska mikrogeometrie povrchu povrch hladký $R_a \leq 0,63 \mu\text{m}$, povrch matný $R_a = 0,63 \mu\text{m}$ nebo zdrsněný $R_a > 2 \mu\text{m}$. Na tvářením plechu má vliv vedle hodnoty R_a také tvar profilu výstupků a jejich orientace. Současné poznatky ukazují, že z hlediska tvaru profilu výstupků je vhodnější mikrogeometrie s dostatečně velkým nosným povrchem a s méně ostrými vrcholky výstupků, které vytvářejí dostatečně velký prostor pro mazivo.

Plech se dělí podle jejich tloušťky na velmi tenké (jemné) do tloušťky 0,4 mm, tenké 0,4 až 3,99 mm a tlusté s tloušťkou přesahující 4 mm. Konkrétní tloušťky vyráběných plechů jsou uvedeny v příslušné rozměrové normě. Tolerance tloušťky tenkostěnných plechů se dá zobecnit do rozmezí 7 až 10 % jmenovitého rozměru a u tlustých plechů od 3 do 6,5 % jmenovitého rozměru. Plechu se dodávají v pásech, svitcích nebo tabulích plechů.

2.3 Zkoušky tvařitelnosti [1], [4], [7]

Na základě provedení zkoušek mechanických vlastností materiálu nebo provedení technologických zkoušek, u kterých se simulují podmínky jako během tvářecího procesu lze stanovit tvařitelnost materiálu.

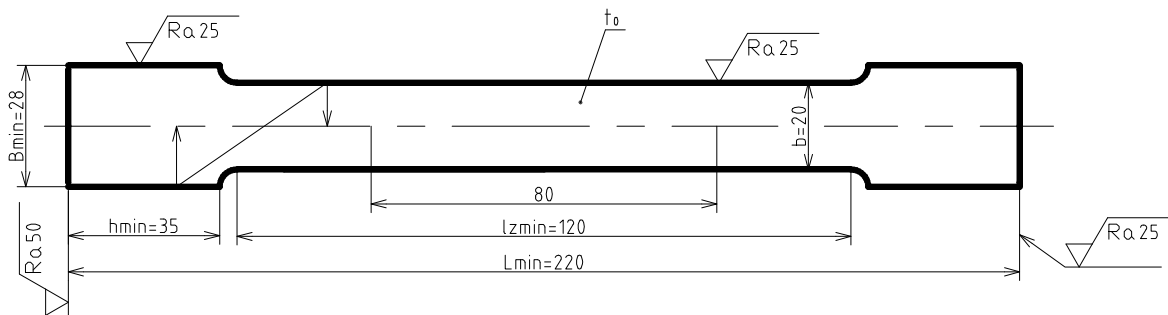
2.3.1 Zkoušky mechanických vlastností plechů

S ohledem na stále větší požadavky na tvařitelnost plechů stoupá význam predikce a posouzení vhodnosti plechu ke tváření danou technologií. Mezi zkoušky mechanických vlastností plechů lze zařadit zkoušku tahem a zkoušku tvrdosti. Zkoušku chemického složení provádí výrobce plechu, případně zpracovatel plechu při reklamaci. Z hlediska tvařitelnosti se sleduje přítomnost chemických prvků, které ji významným způsobem ovlivňují. Velikost, tvar a rovnoměrnost feritických zrn, tvar a způsob vyloučení křehkých strukturních složek, především cementitu, řádkovitost strukturních složek a vměstky se zjišťují metalografickými zkouškami.

A. Zkouška tahem

U tenkých plechů se provádí na plochých zkušebních tyčích podle ČSN EN 10002-1 (obr. 3). Z tahové zkoušky se u plechů získávají údaje pro určení:

- meze kluzu (resp. smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$)
- meze pevnosti (R_m)
- poměru (R_e/R_m)
- tažnosti (A_{80})
- kontrakce (Z)
- hodnoty plošné anizotropie mechanických vlastností pro různé směry v rovině plechu ($A_{Re(\alpha)}$)
- hodnoty normálové anizotropie (R_α)
- exponent deformačního zpevnění (n)
- zásoby plasticity (Z_p) $Z_p = k \cdot (R_m - R_{p0,2}) \cdot \epsilon_{\max}$, kde $k = 3/4$ pro materiály s nevýraznou mezí kluzu a $k = 2/3$ pro materiály s výraznou mezí kluzu.



Obr. 3 Plochá zkušební tyč dle ČSN 10002-3 [4]

Pro hrubé hodnocení plechu základní hodnoty R_e , R_m , A , Z zjištěné tahovou zkouškou jsou dostačující. Tyto hodnoty však neumožňují přesnější rozlišení rozdílů v mechanických vlastnostech, které mnohdy výrazně ovlivňují tvařitelnost plechu, zejména jeho hlubokotažnost. K dalším kritériím tvařitelnosti patří hodnoty normálové anizotropie, exponentu zpevnění, příp. zásoba plasticity jako informativní charakteristika. Uvedená kritéria lze zjistit s využitím tahové zkoušky příp. speciálně upravených zkušebních vzorků.

Mez pevnosti v tahu R_m je smluvní hodnota napětí daného poměrem maximální síly F_{max} , kterou snese zkušební tyč před deformováním, a počátečního průřezu S_0 .

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (2.1)$$

kde: R_m - mez pevnosti materiálu plechu [MPa]
 F_{max} - maximální zatěžovací síla [N]
 S_0 - výchozí průřez zkušební tyče [mm²]

Mez kluzu R_e je hodnota napětí, při které začíná vznikat plastická deformace. Existuje výrazná mez kluzu, která se skládá z horní R_{eH} a dolní R_{eL} meze kluzu a nevýrazná, která je stanovena jako smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ (deformace o velikosti $\epsilon_p = 0,002$).

Tažnost
$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (2.2)$$

kde: A - tažnost [%]
 L_u - konečná délka po přetržení zkušební tyče [mm]
 L_0 - výchozí délka zkušební tyče [mm]

U hlubokotažných plechů má být co nejvyšší. Čím vyšší je tažnost A a současně nižší poměr R_e/R_m , tím je materiál vhodnější pro hluboké tažení.

Kontrakce (zúžení)
$$Z = \frac{S_u - S_0}{S_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (2.3)$$

kde: Z - kontrakce [%]
 S_u - konečná průřez po přetržení zkušební tyče [mm²]
 S_0 - výchozí průřez zkušební tyče [mm²]

Vhodnost materiálu pro hluboké tažení se zvyšuje s hodnotou kontrakce. U materiálů velmi vhodných pro hluboké tažení je $Z = 20$ až 22% .

Poměr R_e/R_m
$$\frac{R_e}{R_m} \leq 0,65 \text{ [-]} \quad (2.4)$$

kde: R_e - mez kluzu [MPa]

Poměr R_e/R_m pro materiály velmi vhodné pro hluboké tažení má mít hodnotu do 0,65. Se zvyšující se hodnotou vhodnost klesá.

Poměrné prodloužení
$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} [-] \quad (2.5)$$

kde: ε - poměrné prodloužení [-]
 ΔL - rozdíl délek po a před přetržením zkušební tyče [mm]
 L_0 - výchozí délka zkušební tyče [mm]

Pro přesnější rozlišení rozdílů v mechanických vlastnostech, jež výrazně ovlivňují tvařitelnost (hlubokotažnost) materiálu, se využívá mj. hodnot plošné a normálové anizotropie.

Plošná anizotropie

Jedná se o směrovou závislost mechanických i fyzikálních vlastností v rovině plechu vzhledem ke směru válcování. Vzniká jako důsledek strukturní a krystalografické textury, které jsou spojeny především metalurgickými podmínkami výroby plechů. Ke zjištění plošné anizotropie jsou nutné výsledky hodnot získané tahovou zkouškou plochých zkušebních tyčí podle ČSN 42 0321 odebraných z plechových tabulí pod úhly 0°, 45°, 90° vzhledem ke směru válcování plechu.

Umístění zkušebních plochých tyčí na plechové tabuli je třeba zvolit v souladu s ČSN 42 0305, zkoušku provést podle ČSN 25 0251.

Hodnota plošné anizotropie mechanických vlastností se zjišťuje dle následujícího vztahu:

$$A_{Rp0,2} = \frac{R_{p0,2}(\alpha^\circ) - R_{p0,2}(0^\circ)}{R_{p0,2}(0^\circ)} [-] \quad (2.6)$$

kde: α - je úhel zvoleného směru v rovině plechu vzhledem ke směru válcování [°]
 0° - je úhel odpovídající směru válcování [°]
 $A_{Rp0,2}$ - anizotropie smluvní meze kluzu [-]
 $R_{p0,2}$ - smluvní mez kluzu [MPa]

Při hlubokém tažení symetrických výtažků způsobuje plošná anizotropie na vnějším okraji nebo na přírubě vznik cípů (až 20 % střední výšky kalíšku). Zvětšuje rovněž rozměrové odchylky hlubokých výtažků. Při tažení nepravidelných tvarů výtažků je třeba směr s nejlepšími plastickými vlastnostmi plechu orientovat do míst předpokládaných nejtěžších podmínek deformace na výtažku. V tom případě plošná anizotropie má do jisté míry pozitivní vliv při procesu tažení.

Normálová anizotropie

Vyjadřuje nerovnoměrnosti mechanických vlastností zjištěných v rovině plechu vzhledem k mechanickým vlastnostem ve směru tloušťky plechu. Velikost hodnoty normálové anizotropie ukazuje na odolnost plechu vůči jeho ztenčení při tažení. Čím je hodnota normálové anizotropie vyšší, tím je plech vhodnější k hlubokému tažení. Zjišťuje se pro směry tažení 0°, 45°, 90°.

Matematicky lze vypočítat velikost normálové anizotropie jako podíl skutečné (logaritmické) deformace ve směru šířky (ϕ_b) a tloušťky (ϕ_t).

Potom:

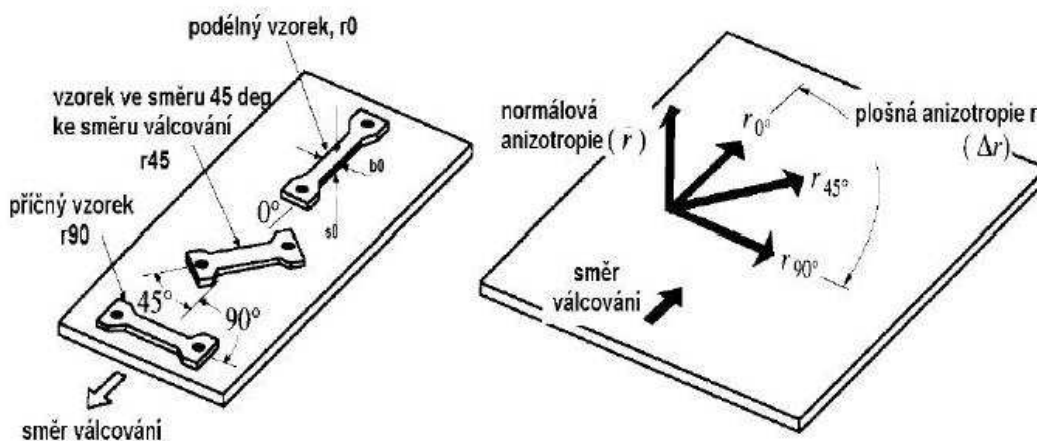
$$r = \frac{\phi_b}{\phi_t} = \frac{\ln \frac{b_0}{b_{20}}}{\ln \frac{t_0}{t_{20}}} \quad [-] \quad (2.7)$$

kde: ϕ_b - logaritmická deformace ve směru šířky vzorku [-]
 ϕ_t - logaritmická deformace ve směru tloušťky vzorku [-]
 b_0 - výchozí šířka zkušební tyče [mm]
 b_{20} - šířka zkušební tyče po 20 % plastické deformace v tahu [mm]
 t_0 - výchozí tloušťka zkušební tyče [mm]
 t_{20} - tloušťka zkušební tyče po 20 % plastické deformaci v tahu [mm]

Jako kritérium tvažitelnosti plechu se používá střední hodnota normálové anizotropie zjištěné podle vztahu:

$$r_s = \frac{1}{4} (r_0 + 2r_{45} + r_{90}) \quad [-] \quad (2.8)$$

kde: r_s - střední hodnota součinitele normálové anizotropie [-]
 r_0 - hodnota anizotropie zjištěné ve směru 0° ke směru válcování plechu [-]
 r_{45} - hodnota anizotropie zjištěné ve směru 45° ke směru válcování plechu [-]
 r_{90} - hodnota anizotropie zjištěné ve směru 90° ke směru válcování plechu [-]



Obr. 4 Rozmístění vzorků na tabuli plechu, zobrazení plošné anizotropie a součinitele plastické anizotropie [9]

Určení zásoby plasticity

Hodnotit tvařitelnost za studena u plechů je možné také podle zásoby plasticity. Je definována jako množství práce v [N · mm] potřebné k plastické deformaci 1 mm³ materiálu v oblasti rovnoměrné deformace.

Čím více práce potřebuje materiál na svoji rovnoměrnou plastickou deformaci při tahové zkoušce, tím lepší má tvařitelnost při jiných druzích deformací.

Zásoba plasticity se určí z velikosti práce potřebné pro plastické přetvoření zkušební tyče během zkoušky tahem. Práce se počítá od okamžiku dosažení R_e až po maximální rovnoměrnou deformaci.

Výpočet plasticity:

$$z_p = \frac{A_p}{V_0} = k \cdot (R_m - R_k) \cdot \frac{A_H}{100} \left[\frac{\text{N} \cdot \text{mm}}{\text{mm}^3} \right] \quad (2.9)$$

kde: A_H - rovnoměrná (homogenní) tažnost: $A_H = \frac{\Delta L_H}{L_0} \cdot 100$ [-] (2.10)

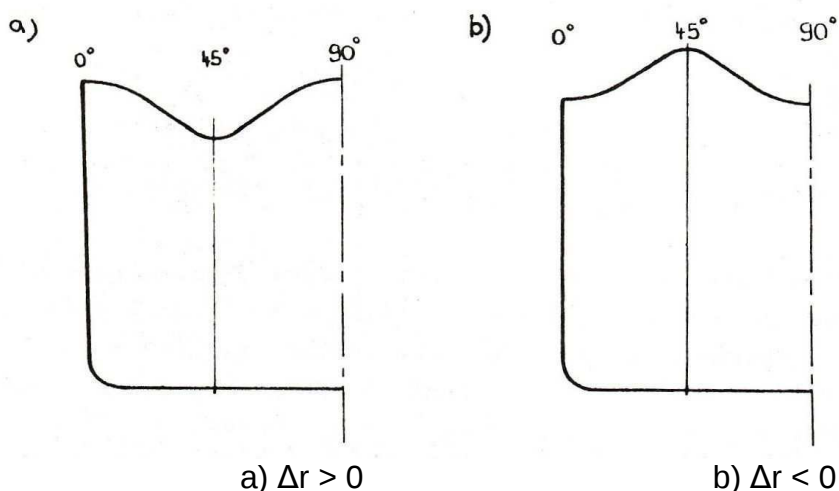
A_p - práce na vyčerpání zásoby plasticity [J]

k - stupeň tažení [-]

R_k - poloměr zaoblení přístřihu v rozích [mm]

Cípovitost výtažků se hodnotí podle stupně plošné anizotropie a hodnoty normálové anizotropie. Velikost cípů závisí na velikosti hodnoty Δr v přímé úměře.

$$\Delta r = \frac{1}{2}(r_0 - 2r_{45} + r_{90}) \quad (2.11)$$



Obr. 5 Místa tvorby cípů na výtažku [9]

Pokud $\Delta r > 0$, cípů se tvoří ve směrech 0° a 90° vzhledem ke směru válcování plechu.

Pokud $\Delta r < 0$, cípy se tvoří ve směrech $+ 45^\circ$ a $- 45^\circ$ vzhledem ke směru válcování plechu

Pokud $\Delta r = 0$, cípy se netvoří.

Čím je nižší hodnota Δr a vyšší hodnota r_s , je plech odolnější proti ztenčování tloušťky a tedy vhodnější k hlubokému tažení. Podle Shawkiho mají vynikající hlubokotažnost plechy s $r_s > 1,60$; dobrou hlubokotažnost s r_s v rozmezí 1,25 až 1,60 a nízkou hlubokotažnost při hodnotách $r_s < 1,25$.

Exponent deformačního zpevnění vyjadřuje schopnost materiálu ke zpevňování při plastické deformaci. Zjišťuje se tahovou zkouškou. Pracovní diagram z trhací zkoušky plně nevystihuje průběh závislosti skutečného napětí na deformaci. Proto závislost mezi skutečným napětím (σ) a skutečnou deformací (φ) při namáhání v tahu pro oblasti plastické deformace se aproximuje parabolou. Pro praktické využití lze uplatnit tzv. Ludwikův exponenciální vztah $\sigma = C_k \cdot \varphi^n$, kde C je materiálová konstanta a n - exponent deformačního zpevnění. Zlogaritmováním uvedené rovnice se dostane lineární závislost:

$$\log \sigma = \log C_k + n \cdot \log \varphi \quad [-] \quad (2.12)$$

Konstanta C_k je daná hodnotou napětí při $\varphi = 1$, exponent (n) představuje směrnici přímky: $n = \tan \beta$

B. Zkoušky tvrdosti

Zkoušky tvrdosti slouží k rychlé a hrubé orientaci v posouzení mechanických vlastností materiálu, především jeho pevnosti (R_m). K měření pevnosti tenkých hlubokotažných ocelových plechů se nejčastěji používá Vickersova metoda. Lze použít i metodu Rockwellovu. U tlustých plechů je možné použít metodu měření tvrdosti podle Brinella. Při volbě zatížení při měření tvrdosti je třeba mít na zřeteli, že tloušťka měřeného plechu musí být minimálně 8x větší než je hloubka vpichu. V praxi se osvědčilo měření pomocí tvrdoměrů HPO 250.

Z naměřených hodnot tvrdosti lze pomocí přepočítaných koeficientů získat přibližnou pevnost materiálu. Zkouška tvrdosti poskytuje představu o pevnosti či tvrdosti použitého plechu, je třeba ji doplnit o zkoušky hloubením příp. jiné speciální zkoušky tvařitelnosti, které spolehlivěji prověří tvárné vlastnosti plechu. Zkoušky tvrdosti jsou normalizovány.

2.4 Zjišťování a hodnocení tvařitelnosti plechů pomocí technologických zkoušek [4], [13]

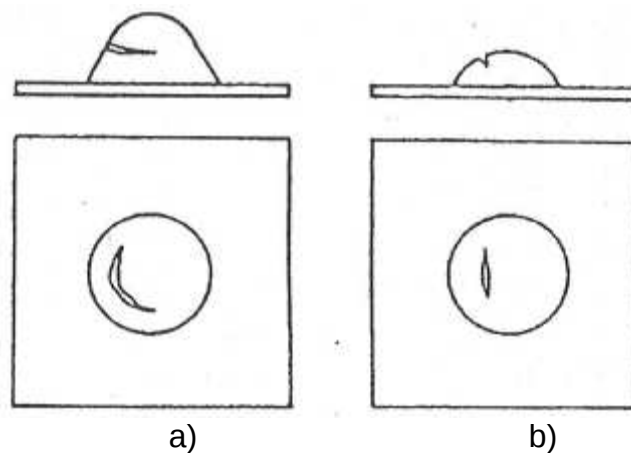
Zkoušky tahem, tvrdosti příp. metalografické a chemické složení, neposkytují komplexní představu o vhodnosti plechu k určité technologii tváření. Především při výše uvedených zkouškách není plech vystavený napětí - deformačním stavům, jaké probíhají při reálném procesu tváření, např. při hlubokém tažení a technologii ohýbání. Z uvedeného důvodu byly vyvinuté technologické (napodobující) zkoušky tvařitelnosti plechů, např. zkouška hloubením podle Erichsena, zkouška kalíškovací, zkouška podle Engelhardta -

2.4.1 Zkouška hloubením podle Erichsena

Technical drawing of a mechanical part showing a cross-section with dimensions. The part has a total width of 90 mm. The top section has a diameter of $\text{Ø}55 \pm 0.1$ and a central hole of $\text{Ø}27 \pm 0.05$. The bottom section has a diameter of $\text{Ø}55 \pm 0.1$ and a central hole of $\text{Ø}20 \pm 0.05$. The thickness of the part is 20 mm. The drawing includes various tolerances and a scale of 1:1.

Ukazatel vhodnosti plechu k hlubokému tažení se určuje podle velikosti prohloubení plechu h' , při němž vznikne na plechu první trhlina v celé tloušťce zkoušeného plechu, kterou lze dále hodnotit. Po zkoušce se hodnotí také směr a hrubost povrchu důlků

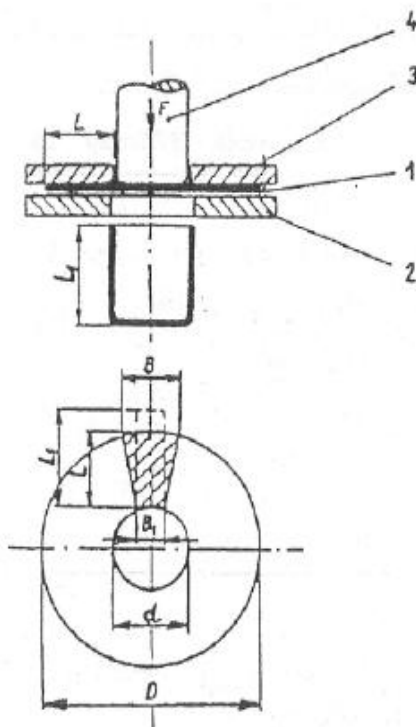
- 21 -



Obr. 7 Tvar trhliny při Erichsenově zkoušce hloubením [4]
 a) trhlina na plechu, která je typická pro hluboké tažení
 b) trhlina na plechu nevhodném pro hluboké tažení

2.4.2 Zkouška kalíškovací

Kalíškovací zkouška se používá zejména pro hodnocení hlubokotažnosti tenkých plechů. Zkouška je vhodná pro rotačně symetrické tvary výtažků. Je poměrně zdlouhavá, neboť se musí několikrát opakovat při postupném zvyšování rondelu D . Zkušební rondel o průměru $D = d + 2L$ se průměrem tažníku táhne na kalíšek jehož délka je $L_1 > L$. Výhodou této zkoušky je, že simuluje podobné poměry jaké vznikají při tažení válcového výtažku. Zkouška není normalizovaná. Princip kalíškovací zkoušky je zobrazen na obr. 8.



Obr. 8 Princip kalíškové zkoušky [4]
 1 - rondel, 2 - tažnice, 3 - přidržovač, 4 - tažník

Mírou hlubokotažnosti plechu je hodnota součinitele:

$$m = \frac{d}{D} \quad [-] \quad (2.13)$$

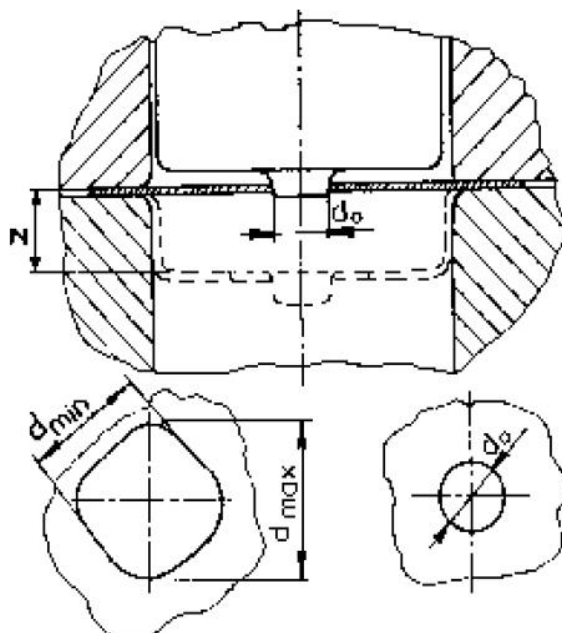
kde: d - průměr tažníku [mm]

D - experimentálně zjištěný maximální průměr kruhového přístřihu [mm]

m - míra hlubokotažnosti kalíškovací zkoušky [-]

2.4.3 Zkouška rozšiřováním otvoru podle Siebela a Pompa

Princip zkoušky rozšiřováním otvoru je zřejmý z obr. 9. Ke zkoušce se připraví čtvercový přístřih s otvorem o průměru d_0 , kde $d_0 = d/3$ [mm]. Přístřih je přidržován přidržovačem a tažen válcovým tažníkem s rovným čelem. Při tažení se rozšiřuje původní otvor v přístřihu. Kvalita zkoušeného plechu se posuzuje v okamžiku, kdy se v okolí otvoru vytvoří první radiální trhliny. Zkouška není normalizována.



Obr. 9 Princip zkoušky podle Siebela a Pompa [4]

Vyhodnocuje se:

- hloubka prohloubení z
- rozšíření otvoru $d' = (d'_{\max} + d'_{\min}) / 2$
- nerovnoměrnost deformace otvoru v důsledku anizotropie mechanických vlastností plechu vyjádřené vztahem $(d'_{\max} - d'_{\min}) / d'$

K souhrnnému vyjádření kvality plechu k hlubokému tažení se použije vztah:

$$q = \frac{t_0 \cdot (d'_{\max} + d'_{\min})^2}{4 \cdot d_0 \cdot (d'_{\max} - d'_{\min})} \quad [-] \quad (2.17)$$

kde: q - míra vhodnosti plechu k hlubokému tažení podle Siebela a Pompa [-]

z - hloubka prohloubení [mm]

$d'_{\max}$ - maximální rozšíření otvoru [mm]

$d'_{\min}$ - minimální rozšíření otvoru [mm]

d_0 - průměr předstřiženého otvoru v přístřihu [mm]

Z výsledku zkoušky lze vyvodit závěr: čím větší je prohloubení (z) a rozšíření otvoru (d') a čím je menší plošná anizotropie, tím je plech z hlediska hlubokotažnosti kvalitnější.

2.4.4 Zkouška tažením v kuželové tažnici (Fukuiho zkouška)

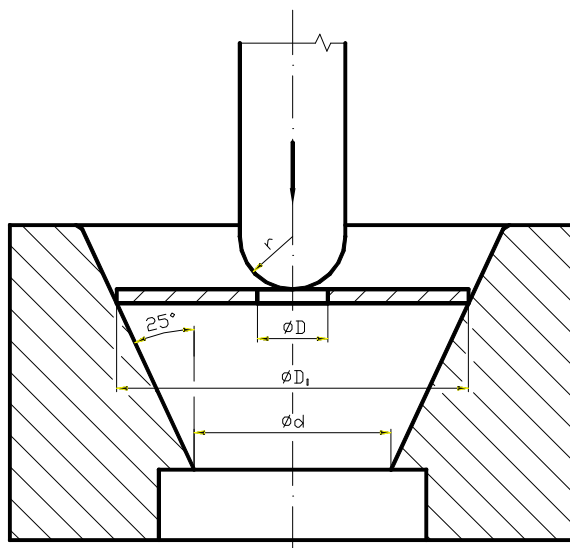
Princip Fukuiho zkoušky spočívá v tažení kruhového rondelu s vyvrtaným otvorem, případně bez otvoru, v kuželové tažnici do okamžiku vzniku trhliny v otvoru, případně na dně kuželového výtažku (obr. 11). Tažení rondelu je bez užití přidržovače, což odstraňuje vliv přidržovací síly na proces tažení plechu. Poměr rozměrů má být přibližně $d_0/D_0 = 1/6$.

Jako kritérium hlubokotažnosti plechů je součinitel tažení:

$$m_F = \frac{d_1}{D_0} \quad [-] \quad (2.18)$$

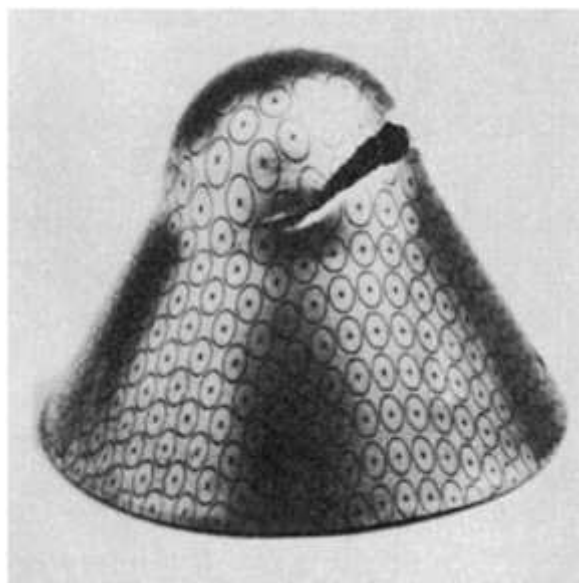
kde: D_0 - průměr přístřihu [mm]

d_1 - největší průměr kuželového výtažku v okamžiku vzniku trhliny [mm]



Obr. 10 Princip Fukuiho zkoušky [4]

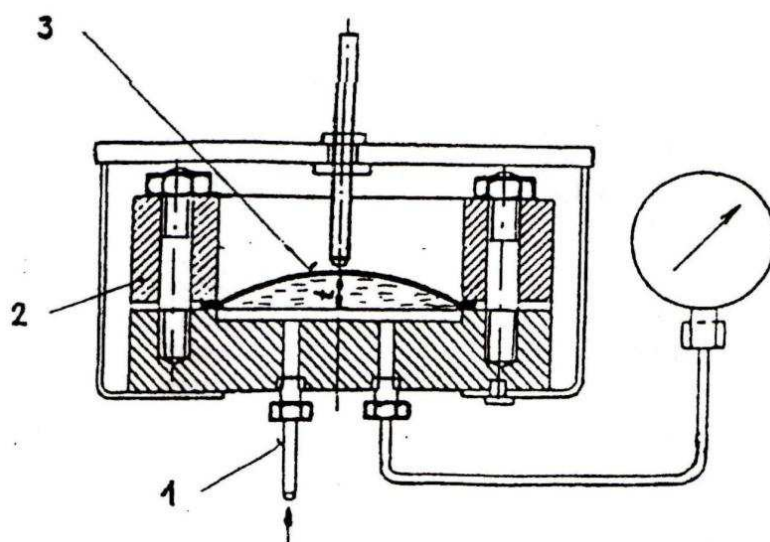
Z výsledků zkoušky tažením v kuželové tažnici vyplývá, že čím je hodnota m_F nižší, tím je zkoumaný plech vhodnější k hlubokému tažení.



Obr. 11 Tvar trhliny při Fukuiho zkoušce [2]

2.4.5 Zkouška hydraulická (Tomlenova)

Princip hydraulické zkoušky je zřejmý u obr. 12. Zkušební vzorek plechu je upnut svým okrajem přidržovačem, který současně zajišťuje nepropustnost pro tlakovou kapalinu. Zvyšováním tlaku kapaliny dochází k vyboulování vzorku plechu. Kvalita plechu je posuzována podle hodnoty prohloubení t' , při které dochází k porušení celistvosti a vzniku trhliny. Současně se posuzuje tvar trhliny i celkový vzhled povrchu prohloubeného vzorku plechu.



Obr. 12 Schéma zařízení pro hydraulickou zkoušku [4]

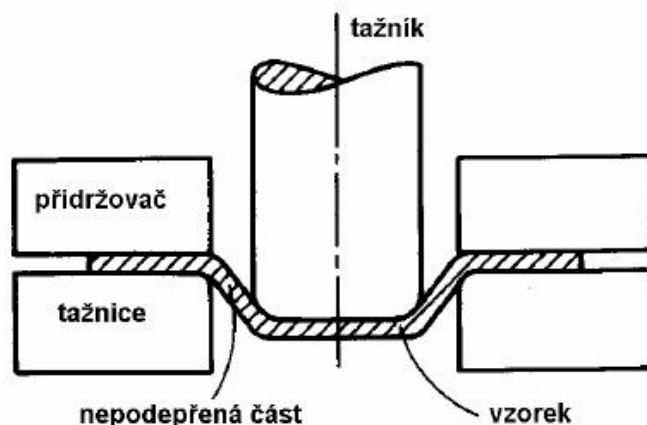
1 - přívod tlakové kapaliny, 2 - přidržovač, 3 - zkušební vzorek plechu

V porovnání s Erichsenovou zkouškou je hydraulická zkouška objektivnější a rychlejší. Jistou nevýhodou je složitější zařízení v případě hydraulické zkoušky.

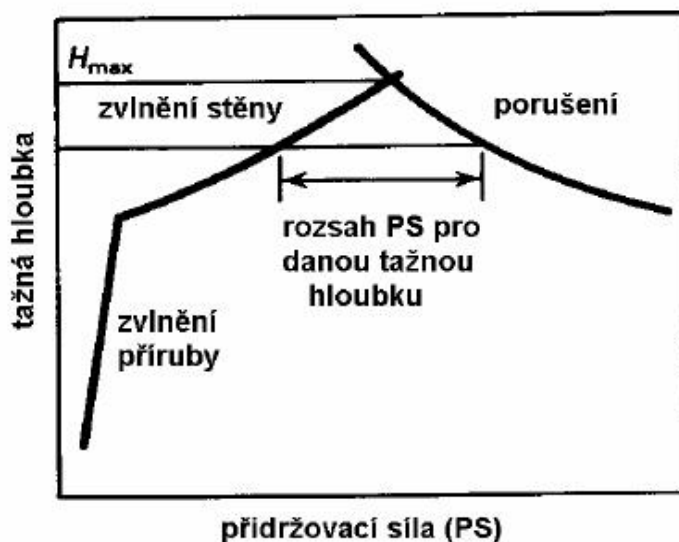
2.4.6 Zkouška zvlňením (Conical Cup Wrinkling Test)

Zkouška je podobná kalíškovací zkoušce s tím rozdílem, že tažník má asi 75% průměru tažnice, tedy je užší než při klasickém tažení (viz. obr 13.).

Za nízkých hodnot přidržovací síly vznikají vlny na přírubě, při vyšších hodnotách přidržovací síly je zvlňení příruby potlačeno, začínají vznikat vlny ve stěně výtažku. Limitní diagram je uveden na obr. 14.



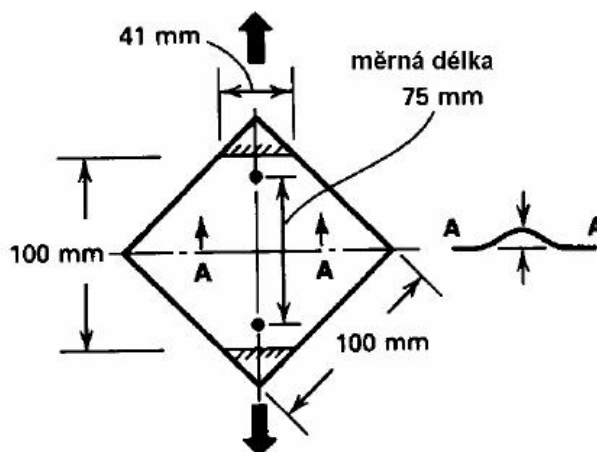
Obr. 13 Schéma zkoušky zvlňení (CCWT) [13]



Obr. 14 Limitní diagram zvlňení HAVRANEK [13]

2.4.7 Zkouška vyboulením (Yoshida Buckling Test)

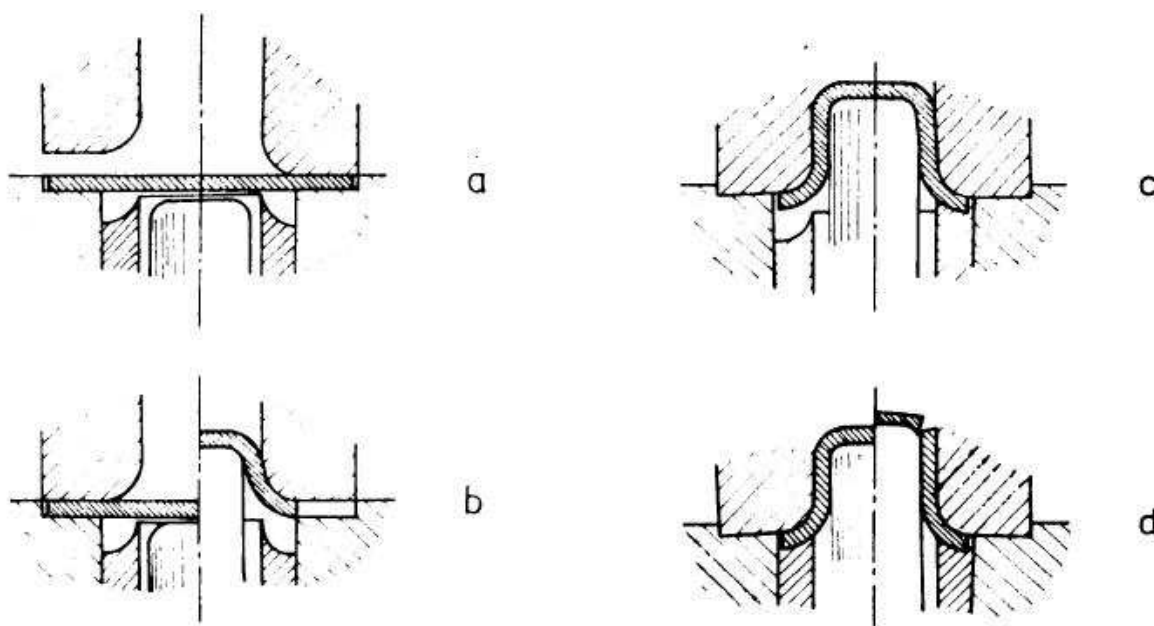
Při zkoušce je čtvercový vzorek sevřen v protilehlých rozích čelistmi a natahován v úhlopříčce. Vyboulení je měřeno v ose vzorku.



Obr. 15 Zkouška vyboulením [13]

2.4.8 Zkouška kombinovaná - hluboké tažení a hloubení (Engelhartova - Grossova)

Princip zkoušky spočívá v hlubokém tažení a následujícím vypínání, při vzorku sevřeném přidržovačem až do jeho prasknutí.



Obr. 16 Schéma kombinované zkoušky [13]

a) schéma přidržení plechu, b) tažení, c) sevření příruby d) porušení

Při zkoušce je zaznamenávána tažná síla a výsledkem tvařitelnosti je tzv. "Přirozený stupeň hlubokotažnosti"

$$T' = \frac{F_v}{F_{v_{p \text{ in } / r u}}} \cdot \frac{s - F_{t_{a \text{ z s } x}}}{F_{v_{y p / p o r u}}} [-] \quad (2.19)$$

Pro dobře tvařitelný hlubokotažný plech musí být $T > 0,4$.

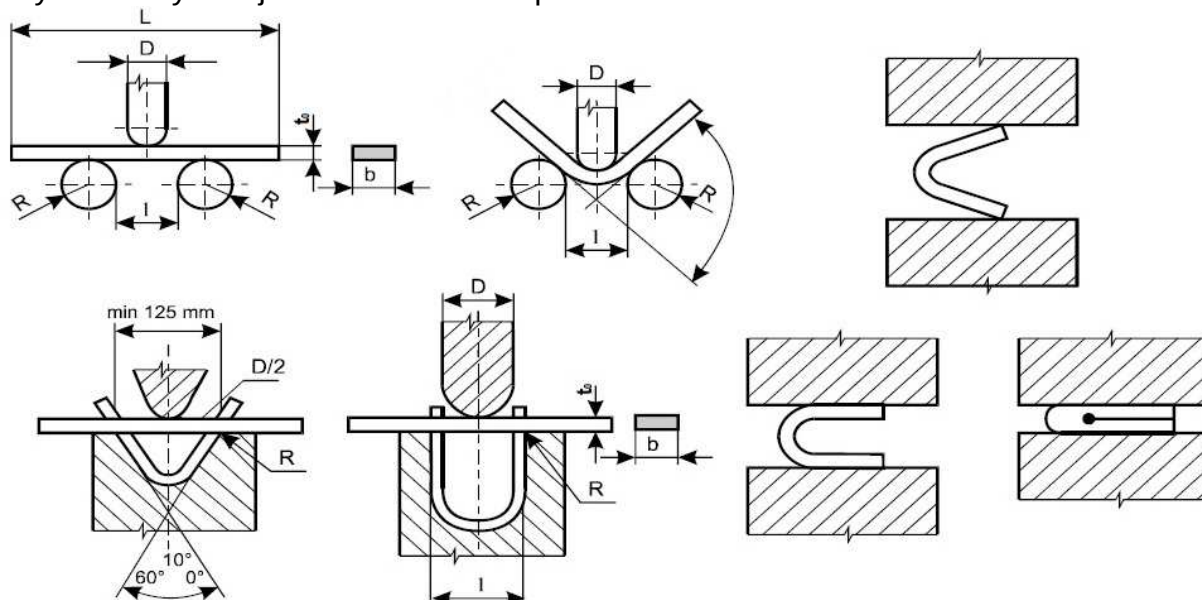
2.5 Zkoušky ohybatelnosti plechů [1], [13]

Patří rovněž do skupiny technologický zkoušek plechů. K vybraným zkouškám ohybatelnosti plechů lze zařadit: zkoušku lámavosti, zkoušku dvojitým ohybem, zkoušku střídavým ohybem a případně i zkoušku podle Gütha. Uvedené zkoušky se provádí za studena.

2.5.1 Zkouška lámavosti

Uvedená zkouška je normalizována v ČSN 42 0401. Pro zkoušku lámavosti se hodí jakýkoliv lis nebo zkušební stroj na tlak, umožňující vyvodit dostatečně velkou sílu. Dále je třeba vhodného úhloměru k proměření úhlu α pod zatížením.

Zkušební plochá tyč z tlustého plechu se ohýbá podle obr. 17 přibližně $L = d + 3 \cdot t_0$ [mm] dlouhá. Zkušební plochá tyč má délku od 200 do 400 mm a šířku v rozmezí 25 až 50 mm. Je odebraná z tabule plechu v souladu s ČSN 42 0305. Je třeba vzít v úvahu, že nejpříznivější hodnoty jsou v případě, když osa ohýbání je ve směru vláken plechu.

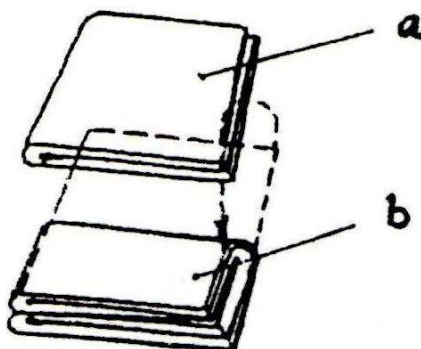


Obr. 17 Princip zkoušky lámavosti [13]

Jako kritérium výsledku zkoušky lámavosti prováděné za účelem zjištění vlastností plechu ke tváření ohýbáním je úhel α , resp. poloměr ohybu r ($d = 2 \cdot r$), při kterém nevznikne v místě ohybu trhlina. Za trhlinu se nepovažuje rozevření vzniklé rozšířením drsného nebo zvrásněného povrchu zkušebního vzorku v ohýbaném místě. Uvedenou zkoušku lze využít i ke kontrole svarů. Mimo zkoušky lámavosti na ohyb do předepsaného úhlu α lze provádět i ohyb na dolehnutí rámem a ohyb do rovnoběžnosti ramen s využitím podložky mezi rameny plechu.

2.5.2 Zkouška dvojitém ohybem

Princip zkoušky plechu dvojitém ohybem je zřejmý z obr. 18. Ke zkoušce plechu dvojitém ohybem se použije plech ve tvaru čtverce o straně 200 mm s odjehlenými hranami. U kvalitního plechu vhodného ke tváření ohybem nedojde při této zkoušce ke vzniku trhlin v nejvíce namáhaných místech.

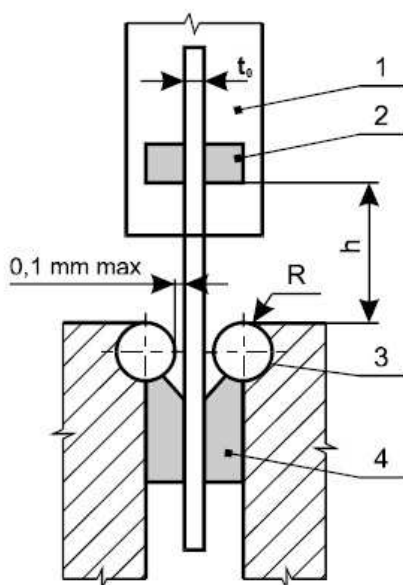


Obr. 18 Zkouška dvojitém ohybem [4]

a - první ohyb
b - druhý ohyb

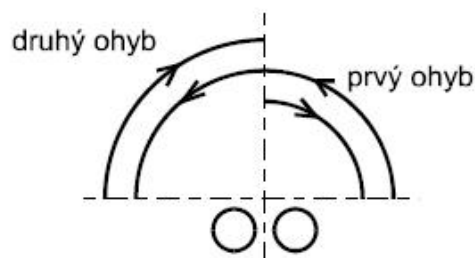
2.5.3 Zkouška střídavým ohybem

Princip zkoušky je zřejmý z obr. 19. Schéma zkušebního zařízení obsahuje upínací část (1) s plochými čelistmi (2) a ohýbacími válcovými plochami (3). Dále unašeč (4) zkoušeného vzorku plechu spojený s ohýbací pákou. Cílem zkoušky je určení odolnosti zkoušeného plechu proti porušení střídavým ohýbáním o 90° kolem válcových ploch o předepsaném poloměru R (viz Tab. 1). Postup zkoušky je uveden v ČSN 42 0405. Zkušební vzorky jsou pásy plechu o šířce 20 mm a délce 100 mm. Užší vzorky se zkouší v celé šířce. Zkouší se ocelové plechy do tloušťky 3 mm a pásy plechu z neželezných kovů a slitin od 1 mm do 6 mm. Rychlost ohýbání je do 60 ohybů za minutu. Schéma pro sčítání ohybů je ukázáno na obr. 20.



Obr. 19 Schéma zařízení ke zkoušce plechů střídavým ohybem [13]

Při zkoušce se určuje počet ohybů do úplného zlomení vzorku zkoušeného plechu, přičemž se nezapočítává ohyb, při kterém došlo k poškození vzorku.



Obr. 20 Schéma pro počítání ohybů [13]

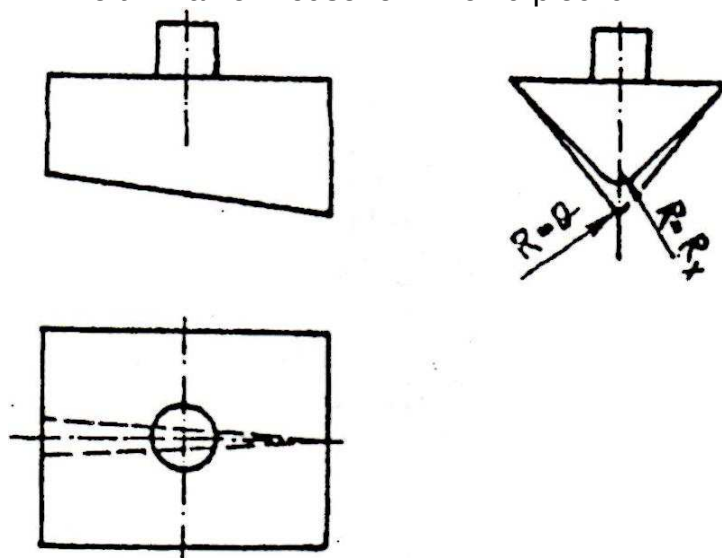
U tenkých plechů je možné použít zkušební vzorek plechu s předpětím, které však nesmí překročit hodnotu 2 % z jmenovité pevnosti materiálu plechu.

Tab. 1 Rozměry funkčních částí zařízení ke zkoušce střídavým ohybem s ohledem na tloušťku plechu. [4]

R [mm]	1	2,5	5	7,5	10
h [mm]	15	15	20	25	35
h ₁ [mm]	1		5		
tloušťka plechu t ₀ [mm]	-	do 0,5	0,5 až 1	1,05 až 1,5	nad 1,5

2.5.4 Zkouška podle Gütha

Používá se k určení minimálního poloměru ohybu plechu. Princip zkoušky spočívá v ohýbání vzorku plechu ve zkušební nástroji s proměnným poloměrem ohybu, obr. 21. Ohybník je konstrukčně řešen s poloměrem ohybu R od nuly po určitý poloměr R_x. Po provedené zkoušce je minimální poloměr, při kterém nevznikne trhlina ve zkoušeném vzorku plechu.



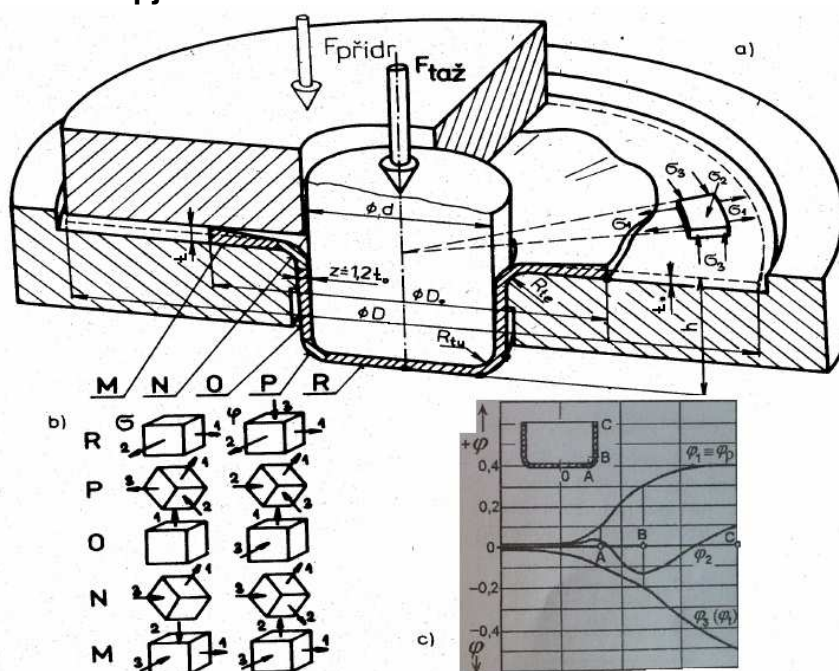
Obr. 21 Tvar ohybníku pro Güthovu zkoušku [4]

3. TECHNOLOGIE TAŽENÍ [1], [3], [4], [7], [15]

Tažení je technologický proces, při kterém se z rovinného plechu (přístříhu) v jedné nebo více operacích (tzv. hluboké tažení plechu) vyrobí duté těleso. Je to velmi rozšířený způsob zpracování plechu, pomocí něhož lze vcelku jednoduchým způsobem zhotovit různé prostorové součásti z plechu např. válcové nebo hranaté výtažky bez podstatné změny tloušťky výchozího materiálu.

Pro technologii tažení se z tvářecích strojů používají nejčastěji mechanické lisy dvojčinné i vícečinné, lisy postupové a v některých případech i lisy hydraulické a speciální zařízení.

3.1 Schémata napjatostí a deformací



Obr. 22 Schéma tažení válcového výtažku s přidržovačem
a) řez nástroje během tažení s přidržovačem
b) hlavní napětí v jednotlivých místech výtažku $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$
c) průběh deformací ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3

Hlavní napětí: σ_1 - radiální tahové napětí
 σ_2 - osová tlakové napětí
 σ_3 - tangenciální tlakové napětí (tečné)

Hlavní deformace: $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$

Logaritmické deformace: ϕ_1 - deformace v radiálním směru
 ϕ_2 - deformace v axiálním směru
 ϕ_3 - deformace v tangenciálním směru

Tažení je velmi složitý proces, během kterého se mění schéma a současně i velikost napětí a deformace. Závislost mezi hlavními deformacemi $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ (deformacemi v hlavních rovinách) se stanoví z podmínky stálosti

objemu, tj. objem tělesa se v tváření nemění. V důsledku měnících se mechanických schémat a různé tloušťky výtažku dochází během tažení ke vzniku různých skutečných (logaritmických) deformací φ_1 , φ_2 , φ_3 , jak je schématicky zaznačeno v obr. 22.

Při sestavování průběhu logaritmických deformací se vychází z rovnice:

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad [-] \quad (3.1)$$

Stanovení jednotlivých deformací:

$$\varphi_1 = \ln \frac{R}{R_0} \quad [-] \quad (3.2)$$

$$\varphi_2 = \ln \frac{t}{t_0} \quad [-] \quad (3.3)$$

$$\varphi_3 = \ln \frac{D_0}{D} \quad [-] \quad (3.4)$$

„V přírubě polotovaru (oblast M) vzniká v důsledku tlaku přidržovače prostorová napjatost i deformace. V ploše příruby vznikají radiální tahová napětí σ_1 a tečná tlaková napětí σ_3 a k nim v kolmém směru osová tlaková napětí σ_2 .“

„Na poloměru tažnice R_{te} (oblast N) vzniká složitá deformace způsobená prostorovým ohybem ze současného působení největšího napětí σ_1 a malého napětí σ_3 .“

V plášti výtažku (oblast O) působí jednoosá tahová napjatost σ_1 a rovinná deformace.

Nejkritičtějším místem při procesu tažení je zaoblení mezi dnem a pláštěm výtažku (oblast P). V této oblasti se jednoosá napjatost σ_1 , působící v plášti výtažku, mění na prostorovou nestejnorodou napjatost. Dochází k ohýbání a současnému posouvání po zaoblené hraně tažníku R_{tu} , materiál se značně prodlužuje a ztenčuje. V této oblasti dochází nejčastěji k utržení dna.

„Ve dně výtažku (oblast R) vzniká během tažení rovinná tahová napjatost a prostorová deformace.“

3.2 Základní postup výroby výtažku

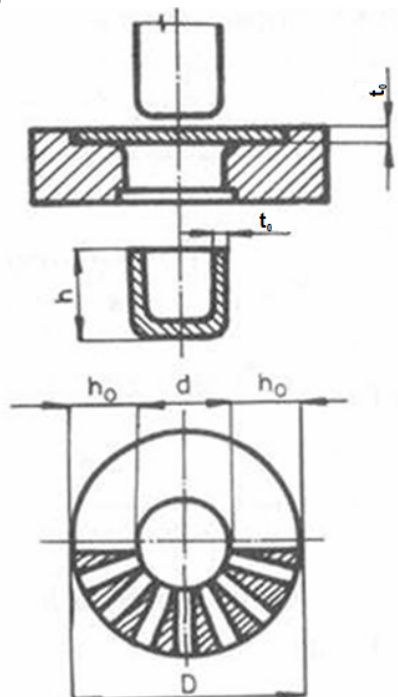
Výchozí polotovar ve tvaru přístřihu se položí na tažnici a vystředí. Ve většině případů je nástroj vybaven tzv. přidržovačem, aby se zabránilo zvlnění, které vzniká v důsledku pětování okraje materiálu při tažení. Vyvodí se tlak přidržovače na přístřih a následně se přístřih působením tlaku tažníku vytáhne do otvoru tažnice, a tak se zhotoví požadovaný tvar výrobku.

Zpravidla platí, že jednodušší a mělčí tvary výtažků jsou taženy v jedné operaci a tvarově složitější a hlubší výtažky ve dvou a více tažných operacích.

3.3 Princip tažení rotačních výtažků

Tažení se provádí z rovinného přístřihu o průměru D_0 a tloušťky t_0 . Vznikne výtažek o průměru d a výšce h .

Výška pláště výtažku $h > \frac{(D_0 - d)}{2}$ dokazuje, že při tažení muselo dojít k přesunu materiálu z mezikruží $\frac{(D - d)}{2}$. Vytlačování materiálu je způsobeno tangenciálním tlakovým napětím σ_3 . Materiál se vytlačuje při tažení směrem k obvodu a zvětšuje výšku h výtažku. Tento přesunutý objem je znázorněn na obr. 23 v podobě vyšrafovaných trojúhelníků. Vytlačení materiálu je způsobeno tangenciálním napětím σ_3 .



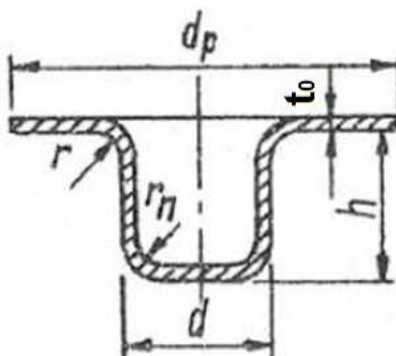
Obr. 23 Princip tažení plechu[16]

Přesunutý objem:
$$V_{pr} = t_0 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D - d)^2 \quad [\text{mm}^3] \quad (3.5)$$

kde: d – průměr výtažku [mm]
 t_0 – výchozí tloušťka plechu [mm]
 D_0 – průměr přístřihu [mm]

3.4 Tažení válcových součástí s přírubou

Princip nejčastějšího způsobu tažení rotačních symetrických výtažků se širokou přírubou (viz. obr. 24) spočívá v tom, že je třeba v prvním tahu vytvořit požadovaný průměr příruby d_p , který zůstane v dalších operacích již zachován. Deformace při tažení v dalších operacích probíhá pouze na úkor zmenšování průměru válcové části a zvětšování šířky příruby a výšky výtažku. Při tažení součástí se širokou přírubou se pro první tah součinitel tažení $m = d/D_0$ volí většinou nižší, než součinitel tažení válcových výtažků bez příruby. Pro druhý a další tah, kdy již probíhá změna vytaženého průměru beze změny vnějšího průměru příruby d_p , je možno použít hodnoty m doporučené pro válcové výtažky bez příruby.



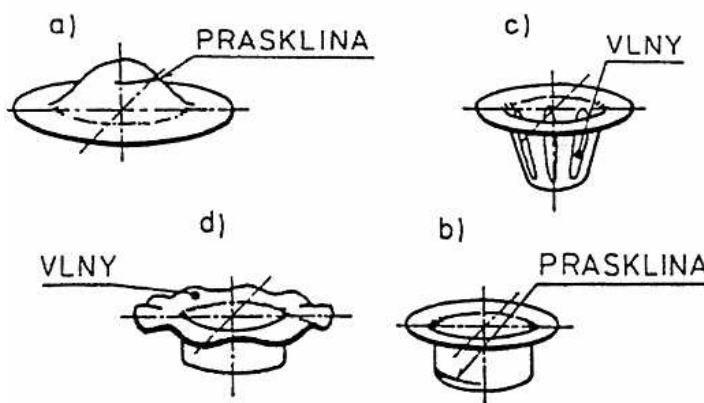
Obr. 24 Výtažek s širokou přírubou [1]

Tyto výtažky lze zhotovit na jednu operaci, když při poměrech rozměrů výtažků $\frac{d_p}{d}, \frac{r}{t_0}, \frac{t_0}{d}$ bude poměrná hloubka $\frac{h}{d}$ odpovídat nebo bude menší než jsou hodnoty uvedené v tabulce 15. (viz. Příloha 1). V případě, že poměrná hloubka bude větší, musí se výtažek zhotovit na více operací.

U výtažků s menšími přírubami, u kterých platí $\frac{d_p}{t_0} < 1,2$ a $\frac{h}{d} > 1$ se první operací táhnou výtažky bez příruby a ta se vytváří až v dalších operacích. Koeficient tažení M se pro první tah určí podle tabulky 16 (viz. Příloha 1) a pro další tahy podle tabulky 17 (viz. Příloha 1).

3.5 Vady výtažků

Při tažení může dojít ke vzniku vad jakou jsou vlny, trhliny nebo zadírání materiálu nástroje a plechu. Vlny na plášti lze vyrovnat například kalibrováním, vlny na přírubě lze odstranit použitím přidržovače, případně ostřížením příruby. Ke vzniku trhlin může dojít buď vyčerpáním zásoby plasticity v místě největší deformace nebo překročením meze pevnosti v tahu v tzv., přenosovém průřezu.



Obr.25 Vady výtažků [4]

- a) trhlina s charakterem tvárného lomu v nejvíce deformované oblasti výtažku
- b) trhlina vzniklá překročením meze pevnosti v tahu
- c) zvlnění na plášti – vlny II. druhu
- d) zvlnění příruby – vlny I. druhu

3.6 Procesní parametry tažení

Při konstrukci tažného nástroje je nutné znát funkci vyráběné součásti, její tvar, rozměry, množství, druh materiálu a jeho mechanické vlastnosti, kvalitu povrchu, tloušťku plechu, stroj a jeho mechanizační zařízení atd. Mezi základní parametry, které se musí stanovit patří:

- tvar a velikost přístřihu
- použití přidržovače, vyhazovače nebo stěrače
- přitlačná síla přidržovače
- počet tažných operací a jejich odstupňování
- poloměry zaoblení tažné hrany tažníku a tažnice, příp. přidržovače
- tažná mezera
- tažná síla a práce
- druh lisu a jeho velikost

3.6.1 Tvar a velikost přístřihu

Stanovování velikosti přístřihu plechu je založeno na rovnosti povrchu, objemu i hmotnosti přístřihu a výtažku. U tenkých plechů se počítá s vnějšími rozměry výtažku, u tlustých plechů je třeba uvažovat střední rozměr tloušťky plechu. S ohledem na cípatost výtažku se teoreticky vypočtený průměr zvětšuje při jednooperačním tažení o 3 % a při každé další operaci o 1 % z důvodu ostříhnutí okraje po tažení.

Vychází se ze vztahů:

$$\text{Pro plochu: } S_p = S_v \text{ [mm}^2\text{]} \quad S_p = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (3.6)$$

kde: S_p - plocha výstřižku [mm²]
 S_v - plocha výtažku [mm²]

Výpočet plochy přístřihu: S_o

$$S_o = S_d + S_p + S_{př} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (3.7)$$

kde: S_d - plocha dna [mm²]
 S_p - plocha pláště [mm²]
 $S_{př}$ - plocha příruby [mm²]

$$\text{Pro objem:} \quad V_p = V_v \text{ [mm}^3\text{]} \quad (3.8)$$

$$\frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \cdot t_0 = \left(\frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot t_0 \right) + (\pi \cdot d \cdot h \cdot t_0) \text{ [mm}^3\text{]} \quad (3.9)$$

Úpravou vztahu (3.9) vyplyne vztah pro výpočet průměru přístřihu pro válcový výtažek bez příruby:

$$D_0 = \sqrt{d^2 + 4 \cdot d \cdot h} \quad [\text{mm}] \quad (3.10)$$

kde: D_0 - průměr přístřihu plechu [mm]
 d - průměr výtažku [mm]
 h - minimální výška výtažku [mm]

Vztah pro válcový výtažek s přírubou:

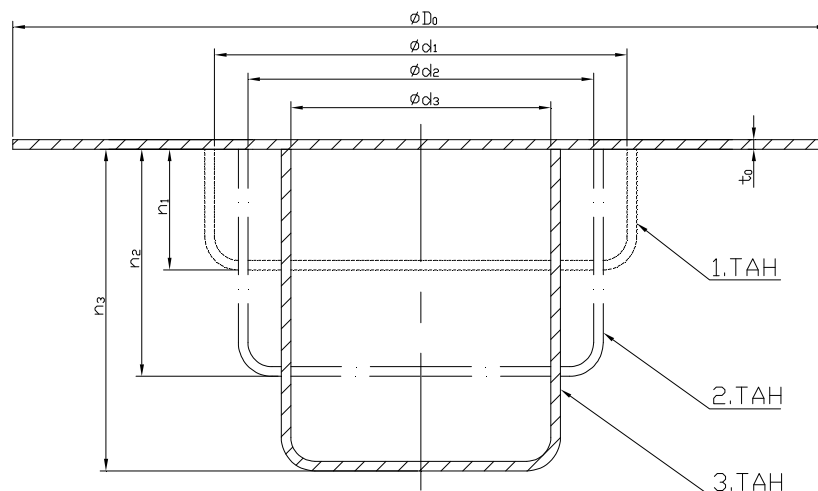
$$D_0 = \sqrt{d_p^2 + 4 \cdot d \cdot h - 3,44 \cdot d \cdot r} \quad [\text{mm}] \quad (3.11)$$

kde: d_p - průměr příruby výtažku [mm]
 r - poloměr zaoblení přechodu stěny do příruby a dna výtažku [mm]

3.6.2 Počet tažných operací

Z přístřihu plechu o určitém průměru lze v jedné tažné operaci zhotovit pouze výtažek o určitém minimálním průměru. Je-li třeba zhotovit finální výtažek s průměrem menším, je třeba víceoperační tažení (obr. 25). Počet tažných operací se určuje dle tzv. součinitele tažení m , který je dán poměrem průměru výtažku dosaženého v 1. tahu ku průměru rondelu. Pokud není dosaženo požadovaného finálního průměru výtažku, je zapotřebí další tažné operace. Po třetí operaci tažení je nutno zařadit rekrytalizační žíhání kvůli ztrátě plastických vlastností materiálu.

V případě, že vypočítaná hodnota součinitele tažení je menší než doporučená hodnota pro první tah, je zapotřebí tažení rozložit do více operací tak ,aby se v první operaci táhlo s co nejnižším součinitel tažení m .



Obr. 26 Schéma víceoperačního tažení [4]

Součinitel tažení: $m = \frac{d}{D_0} \quad [-] \quad (3.12)$

$$\text{Součinitel tažení pro první tah: } m_1 = \frac{d_1}{D_0} [-] \quad (3.13)$$

$$\text{Součinitel tažení pro další tahy: } m_n = \frac{d_n}{d_{n-1}} [-] \quad (3.14)$$

Celkový součinitel tažení:

Je dán součinem součinitelů tažení v jednotlivých operacích.

$$m_c = m_1 \cdot m_2 \cdot \dots \cdot m_n [-] \quad (3.15)$$

Hodnota součinitele tažení je v mezích $1 > m > 0$. Menší součinitel tažení odpovídá většímu stupni deformace a naopak.

Na velikost součinitele tažení má vliv celé řada faktorů, především druh a kvalita plechu, jeho tloušťka a poměrná tloušťka $\frac{t_0}{D_0}$, geometrie funkčních částí tažníku a tažnice, podmínky tažení, druh technologie apod.

$$\text{Počet tahů lze určit pomocí vztahu: } n_1 = 1 + \frac{\log d_n - \log(m_1 \cdot D_0)}{\log m_s} [-] \quad (3.16)$$

kde: m_s - střední hodnota součinitele tažení mezi prvním a posledním tahem [-]

Stupeň tažení:

Je to převrácená hodnota koeficientu tažení m .

$$K = \frac{1}{m} [-] \quad (3.17)$$

3.6.3 Tažná síla a práce

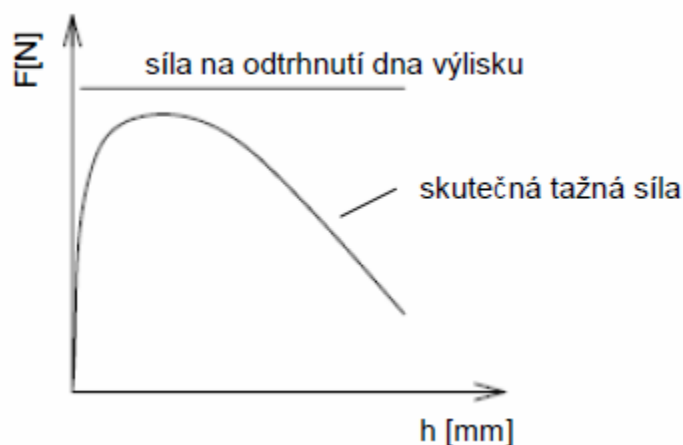
Pro určení tažné síly se používá řada vzorců. V zásadě se jedná o teoretické, které jsou sestaveny na základě rozboru napjatostí a deformací a praktické, které vychází z přípustného napětí ve výtažku.

V praxi se výpočet tažné síly vykonává za účelem rychlého určení jmenovité síly lisu a také jako kontrolní výpočet. Celková síla se skládá ze síly přidržovače a tažné síly. Skutečná tažná síla nesmí překročit sílu potřebnou na utržení dna, jinak by došlo k porušení materiálu. Pro návrh stroje se s dostatečnou přesností počítá se silou na utržení dna.

Síla na utržení dna výtažku:

$$F_{\text{krit}} = \pi \cdot d \cdot t_0 \cdot R_m [\text{N}] \quad (3.18)$$

Skutečná tažná síla je oproti kritické nižší, závisí na redukci průměru přístřihu a zahrnuje součinitel tažení c (vybrané hodnoty uvedené v Tab. 2) v závislosti na součiniteli tažení m_1 .



Obr.27 Průběh tažné síly [2]

$$F_{\text{taž}} = \pi \cdot d \cdot t_0 \cdot R_m \cdot c \quad [\text{N}] \quad (3.19)$$

kde: c - součinitel vyjadřující vliv součinitele tažení vzhledem k poměru $\frac{d}{D_0}$ [-]

Tab. 2 Vybrané hodnoty součinitele c [4]

$m = d/D_0$	0,55	0,60	0,65	0,70	0,80
c	1,00	0,86	0,72	0,60	0,40

Síla přidržovače:

$$F_p = S \cdot p_p \quad [\text{N}] \quad (3.20)$$

kde: S - plocha příruby pod přidržovačem [mm^2]
 p_p - tlak přidržovače [MPa] – např. pro hlubokotažnou ocel:
 $p = 2$ až 3 MPa

Síla přidržovače pro válcové výtažky:

$$F_p = S \cdot p_p = \frac{\pi}{4} \cdot (D_0^2 - d^2) \cdot p \quad [\text{N}] \quad (3.21)$$

Celková síla:

$$F_C = F_{\text{taž}} + F_p \quad [\text{N}] \quad (3.22)$$

Výpočet tažné práce:

$$A_t = \frac{C \cdot F_c \cdot h}{1000} \text{ [J]} \quad (3.23)$$

kde: h - hloubka výtažku [mm]

C - koeficient charakterizující poměr mezi plochou diagramu ($F_{\max} \cdot h$) a skutečným průběhem:

- při tažení bez kalibrace dna $C = 0,66$

- při tažení s kalibrací $C = 0,8$

3.6.4 Použití přidržovače

Jedním ze způsobů, jak zabránit tvoření vln na výtažku při procesu tažení, je použití přidržovače. Přidržovač je součástí tažného nástroje pro hluboké tažení plechu a vyvozuje sílu (tlak). Pokud je přidržovací síla (tlak) malá, vzniká na přírubě zvlnění. Při nepřipustné přidržovací síle dochází k porušení výtažku. Použití přidržovače není nutné u nízkých výtažků tažených z tlustého plechu za podmínky, že redukce při tažení je poměrně malá, jinak by mohlo dojít ke zvlnění okraje přístřihu.

Nízké výtažky z relativně tlustého materiálu se většinou táhnou bez přidržovače za podmínky, že redukce při tažení je poměrně malá, jinak by mohlo dojít ke zvlnění okraje přístřihu. Hlubokotažné plechy tloušťky do 0,5 mm se táhnou vždy s přidržovačem.

$$u = 50 \cdot \left(z - \frac{\sqrt{t_0}}{\sqrt[3]{D_0}} \right) [-] \quad (3.24)$$

kde: z - materiálová konstanta [-] - pro ocel: $z = 1,9$

Pokud platí podmínka:

$$u \geq \frac{100 \cdot d}{D_0} \text{ - není nutné použít přidržovač} \quad (3.25)$$

$$u < \frac{100 \cdot d}{D_0} \text{ - je nutné použít přidržovač} \quad (3.26)$$

V případě, že je použit přidržovač, je přístřih při tažení svírán mezi přidržovačem a tažnicí přidržovací silou, jejíž velikost musí být tak velká, aby zabránila zvlnění rondelu, nesmí však zabránit vtahování plechu do tažnice tlakem tažníku. Při tažení mělkých výtažků s vypuklým dnem nebo při tažení nerotačních tvarů je nutno přidržovat polotovar velmi pevně, aby se vůbec umožnilo tažení, případně i částečné zeslabení stěny. Toho se dosáhne použitím tzv. brzdících lišt. Brzdící lišty mohou být umístěny u kruhových výtažků přímo v tažnici či přidržovači. Plech se tažením přes brzdící lišty značně zpevňuje.

3.6.5 Tažná mezera

Vůle mezi tažníkem a tažnicí je závislá především na tloušťce materiálu (plechu). Tloušťka materiálu (plechu) během procesu tažení není konstantní, úměrně k redukci průměru se vlivem pěchování materiálu částečně zvětšuje. Změna tloušťky materiálu je ovlivněna celou řadou činitelů, např. druhem taženého materiálu, tažným poloměrem, přidržovacím tlakem, rychlostí tažení, mazáním atd.

Tažná mezera je rovna 1/2 tažné vůle. Při tažení bez zeslabení stěny, což je v praxi nejčastější způsob tažení, volí větší než je tloušťka plechu s ohledem na snížení tažné síly i s přihlédnutím k tolerancím tloušťky plechu.

Dle normy ČSN 22 73 01

pro první operaci tažení: $z_{m1} = (1,2 \text{ až } 1,3) \cdot t_0 [\text{mm}]$ (3.27)

pro další tažné operace: $z_{m2} = (1,1 \text{ až } 1,2) \cdot t_0 [\text{mm}]$ (3.28)

Při kalibraci (posledním tahu) je tažná mezera rovna tloušťce plechu.

Při příliš velké tažné mezeře se může výtažek zvlnit a zhorší se jakost povrchu, a naopak, při malé tažné mezeře se výtažek může porušit (utržení dna).

3.6.6 Tažná rychlost

Jedná se o rychlost průběhu tažné operace. Tažná rychlost musí být takové hodnoty, aby nedošlo k porušení výtažku. Největší je v okamžiku dosednutí tažníku na tažený materiál a nejnižší v momentě skončení tažné operace.

Při výpočtu se počítá s největší rychlostí tažení:

$$v \cong 0,006 \cdot 3n_l \cdot \sqrt{z_d \cdot p_t - p_t^2} [\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (3.29)$$

kde: n_l - počet otáček lisu [$\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$]
 z_d - celkový zdvih beranu lisu [mm]
 p_t - pracovní pohyb tažníku [mm]

U klasického tažení se doporučují pro různé materiály různé hodnoty tažné rychlosti.

3.6.7 Poloměry zaoblení tažné hrany tažníku a tažnice

Zásadní vliv na kvalitu tažení má poloměr zaoblení tažnice (R_{te}), tažníku (R_{tu}) a velikost tažné mezery (z).

Poloměr zaoblení tažnice (R_{te})

Zvětší-li se R_{te} , usnadní se tažení a tím je možné zvětšit hloubku i stupeň tažení na jednu operaci. Současně se však zmenší nebezpečí porušení podmínky stability a vznik defektů v podobě zvlnění.

Při tažení tlustých plechů není nutný zpravidla přidržovač, avšak je nutno vhodně upravit funkční plochu tažnice (obr. 27). Důvodem uvedené úpravy je dosažení větší deformace a tím nižší hodnoty součinitele tažení při zjištění stability procesu tažení.

$$\text{Pro první tah platí: } R_{te} = (8 \div 10) \cdot t_0 \text{ [mm]} \quad (3.30)$$

$$\text{Pro další tahy: } R_{te} = (6 \div 8) \cdot t_0 \text{ [mm]} \quad (3.31)$$

Velikost poloměru zaoblení tažnice R_{te} pro 1.tah lze určit i pomocí vztahu:

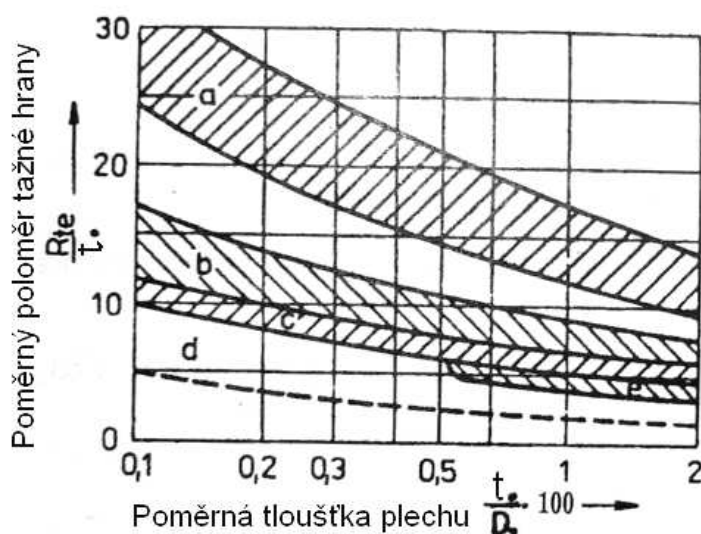
$$R_{te} = 0,8 \cdot \sqrt{(D_0 - d) \cdot t_0} \text{ [mm]} \quad (3.32)$$

kde: t_0 - výchozí tloušťka materiálu [mm]

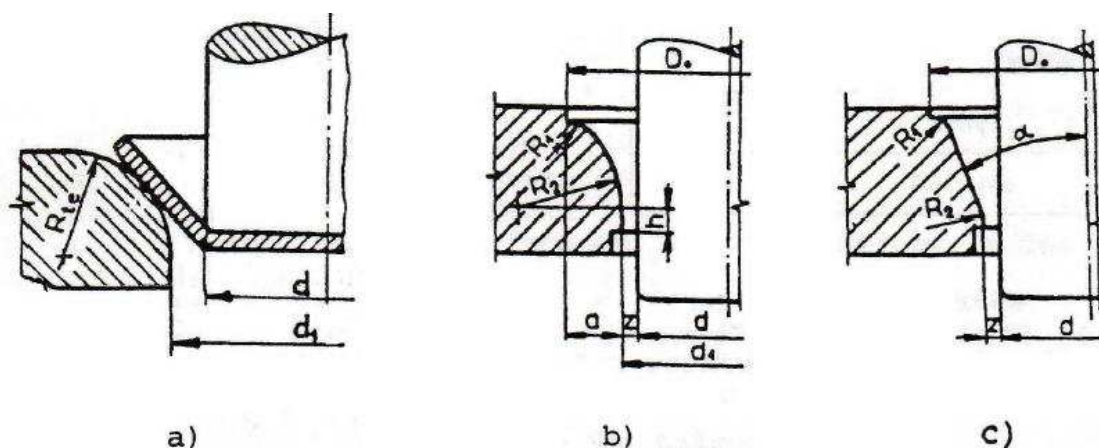
d - průměr výtažku [mm]

D_0 - průměr přístřihu [mm]

Ke stanovení poloměru zaoblení tažnice pro různé typy výtažků je možné použít také diagram (viz obr. 28)



Obr. 28 Stanovení poloměru tažné hrany tažnice R_{te} [4]



Obr. 29 Možné úpravy funkční plochy tažnice pro tažení tlustých plechů bez přidržovače [2]
a) velký poloměr zaoblení R_{te} , b) TRAKTRIX křivka, c) kuželová plocha

Poloměr zaoblení tažníku (R_{tu})

Poloměr zaoblení tažníku se volí v závislosti $\frac{t_0}{D_0}$ pro první tah. Je-li na výtažku požadován menší poloměr, je nutno zařadit další operaci kalibrování, kdy se upravuje pouze poloměr zaoblení tažníku a průměr výtažku se již nemění.

Tab. 3 Poloměry zaoblení tažných hran tažníku [4]

průměry výtažku [mm]	R_{tu} [mm]
10 ÷ 100	$R_{tu} = (3 \div 4) \cdot t_0$
100 ÷ 200	$R_{tu} = (4 \div 5) \cdot t_0$
nad 200	$R_{tu} = (5 \div 7) \cdot t_0$

4. ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Byly provedeny dva typy zkoušek mechanických vlastností, a to zkouška tahem a zkouška hloubením podle Erichsena. Tyto zkoušky byly zvoleny z důvodu dostupnosti zařízení na pracovišti odboru tváření.

4.1 Navržené materiály [11]

Pro výrobu zadané součásti byly navrženy dva níže uvedené materiály o jmenovité tloušťce $t = 2 \text{ mm}$:

Ocel 11 321.21

Ocel nelegovaná, jakostní, vhodná k tváření (válcování) za studena, k středně hlubokému tažení, lakování, pokovování v tavenině, potisku a smaltování - jen u neuklidněné oceli. Svařitelnost zaručená v závislosti na rozměrech polotovaru.

Tab. 4 Chemické složení [%]

C	Mn	P	S	Si
max. 0,1	max. 0,45	max 0,030	max. 0,030	-

Tab. 5 Mechanické vlastnosti

R_e [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]	r_{90}	n_{90}
max. 235	280 - 380	min. 29	-	-

Ocel 11 300

Ocel nelegovaná, obvyklých jakostí. Vhodná pro tváření za studena, zejména na lisování a hluboké tažení. Na náročné výlisky, plechy, tlusté plechy a dráty za tepla válcované, pásy a pruhy za studena válcované, hřebíky. Odolnost proti korozi běžná. Svařitelnost zaručená, pro tlusté plechy nad 13 mm zaručená podmíněná.

Tab. 6 Chemické složení [%]

C	Mn	P	S	Si
max. 0,09	max. 0,45	-	max. 0,040	-

Tab. 7 Mechanické vlastnosti

R_e [MPa]	R_m [MPa]	A_{10} [%]	r_{90}	n_{90}
$0,7 \cdot R_{m \text{ skut.}}$	270 - 370	min. 32	-	-

4.2 Zkouška tahem dle ČSN EN 10002 - 1

Zkouška tahem byla provedena na Fakultě strojního inženýrství VUT Brno, Ústav strojírenské technologie, laboratoř mechanických vlastností materiálů.

Postup průběhu zkoušky je podrobně popsán v literární studii (viz. kap. 2.3.1).

Pro ocel 11 321.21 byly zkušební tyče vyfrézovány z tabule plechu pod úhly 0°, 45° a 90° vzhledem ke směru válcování plechu. U oceli 11 300 byly zkušební vzorky zhotoveny pouze pro směr 0°, a to z důvodu nedostatku dodaného polotovaru potřebného pro provedení naplánovaných zkoušek v rámci řešené bakalářské práce. Potřebné závěry budou proto vyvozovány pro oba materiály pouze pro vzorky vyfrézované pod úhlem 0° vzhledem ke směru válcování plechů.

Parametry zkoušky:

zkušební stroj: ZD 40

napěťová rychlost: $5 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$

silový rozsah stroje: 400 kN

zkušební tyče ploché rozměr: 2 x 20 - 230 mm

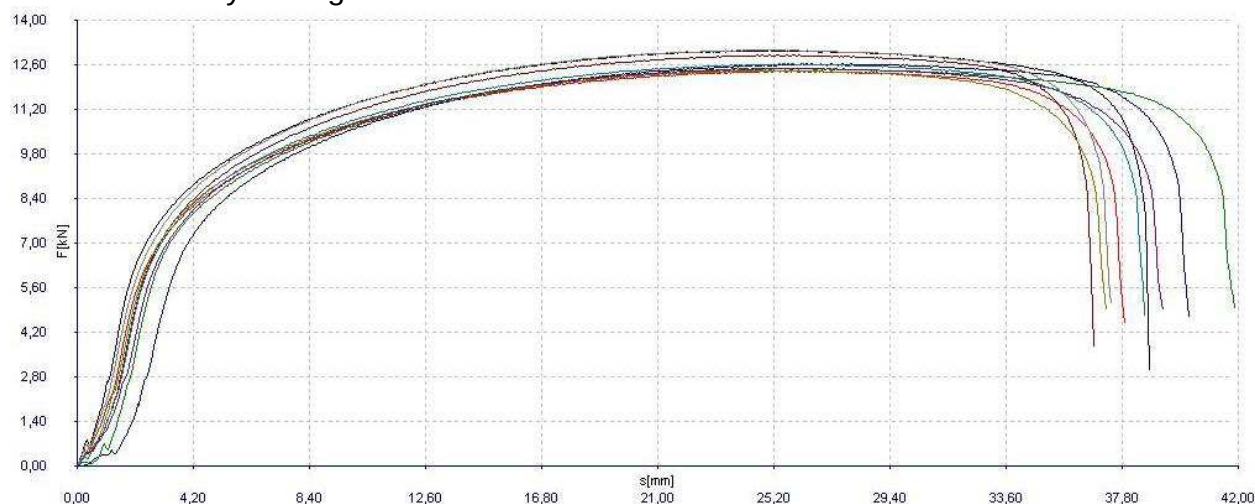
Zkušební tyč po přetržení:



Obr. 30 Zkušební tyč po přetržení

Ocel 11 321.21

Srovnání tahových diagramů materiálu 11 321.21:



Obr. 31 Tahové diagramy tyčí materiálu 11 321.21 odebraných z tabule plechu pod úhly 0°, 45°, 90° vzhledem ke směru válcování

Tab. 8 Výsledky zkoušky tahem materiálu 11 321.21

číslo zk.	a [mm]	b [mm]	S ₀ [mm ²]	F _m [N]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	L ₀ [mm]	L _u [mm]
1 (3/1 0°)	2,0	19,95	39,90	12396,00	170,293	313,030	80,0	111,0
2 (3/2 0°)	2,0	20,15	40,30	12621,60	181,212	318,727	80,0	111,0
3 (3/3 0°)	2,0	19,95	39,90	12480,40	182,162	315,162	80,0	113,0
4 (3/1 45°)	2,0	20,35	40,70	13054,40	174,566	329,657	80,0	110,0
5 (3/2 45°)	2,0	20,00	40,00	12913,20	178,131	326,091	80,0	108,0
6 (3/3 45°)	2,0	20,20	40,40	13082,40	187,626	330,364	80,0	110,0
7 (3/1 90°)	2,0	19,91	39,82	12414,80	185,495	313,505	80,0	110,0
8 (3/2 90°)	2,0	20,10	40,20	12490,00	179,788	315,404	80,0	112,0
9 (3/3 90°)	2,0	19,80	39,60	12621,60	180,030	318,727	80,0	111,0

A [%]	V _t [m·min ⁻¹]	T [s]	V _{t1} [MPa·s ⁻¹]
38,75	2,969	67,14	4,967
38,75	3,268	67,84	4,821
41,25	3,078	68,68	4,953
37,50	2,302	69,64	4,699
35,00	2,711	69,16	4,746
37,50	3,730	69,72	5,112
37,50	3,199	67,22	4,956
40,00	3,054	67,60	4,944
38,75	2,890	68,86	4,848

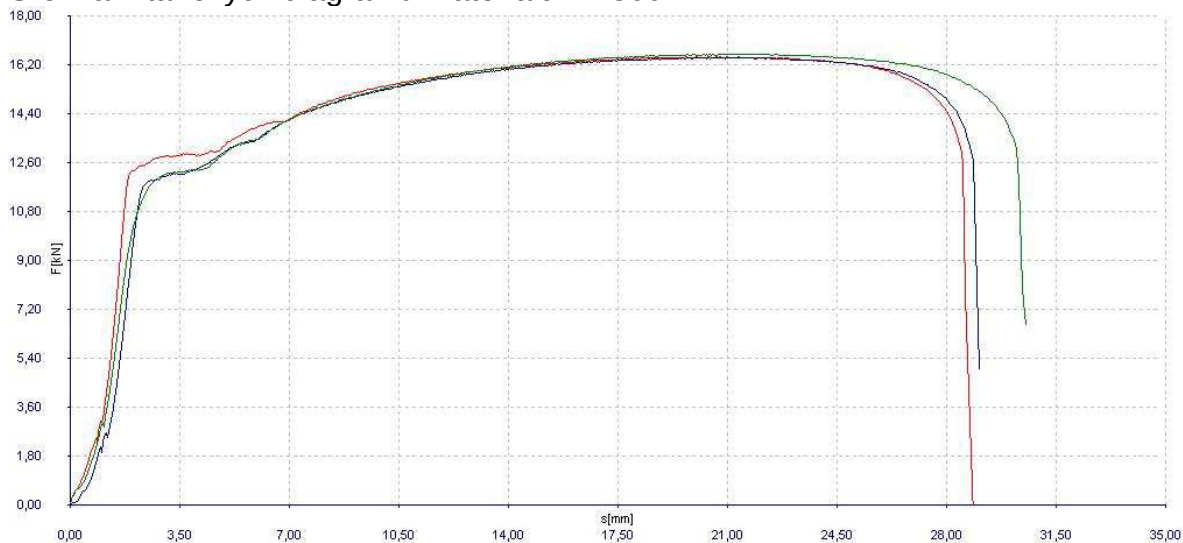
kde: a - tloušťka zkušební tyče [mm]
b - šířka zkušební tyče [mm]
S₀ - počáteční průřez zkušebního tělesa [mm²]
F_m - maximální síla, kterou snese zkušební tyč [N]
R_{p0,2} - smluvní mez kluzu [MPa]
R_m - mez pevnosti materiálu [MPa]
L₀ - výchozí délka zkušební tyče [mm]
L_u - konečná délka po přetržení [mm]
A - tažnost [%]
V_t - tažná rychlost [m·min⁻¹]
T - doba po přetržení zkušební vzorku [s]
V_{t1} - napěťová rychlost [MPa·s⁻¹]

Tab. 9 Statistické vyhodnocení výsledků zkoušky tahem

	a [mm]	b [mm]	S ₀ [mm ²]	F _m [N]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	L ₀ [mm]
střední průměrná hodnota	2,0	20,046	40,091	12674,93	179,923	320,074	80,0
směrodatná odchylka	0,0	0,160	0,319	256,039	4,964	6,466	0,0
proměnný koeficient	0,0	0,008	0,008	0,0202	0,028	0,0202	0,0
maximální hodnota	2,0	20,35	40,700	13082,40	187,626	330,364	80,0
minimální hodnota	2,0	19,800	39,600	12396,0	170,293	313,030	80,0

L _u [mm]	A [%]	V _t [m·min ⁻¹]	T [s]	V _{t1} [MPa·s ⁻¹]
110,667	38,333	3,022	68,430	4,894
1,333	1,667	0,370	0,950	0,120
0,012	0,043	0,122	0,014	0,025
113,0	41,25	3,730	69,72	5,112
108,0	35,0	2,301	67,140	4,699

Srovnání tahových diagramů materiálu 11 300:



Obr. 32 Tahové diagramy tyčí materiálu 11 300 odebraných z tabule plechu pod úhlem 0° vzhledem ke směru válcování

Tab. 10 Výsledky zkoušky tahem materiálu 11 300

číslo zk.	a [mm]	b [mm]	S_0 [mm ²]	F_m [N]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	L_0 [mm]	L_u [mm]
1 (1/1 0°)	2,0	20,20	40,40	16496,40	306,418	405,317	80,0	104,0
2 (1/2 0°)	2,0	20,35	40,70	16458,80	293,710	404,393	80,0	104,0
3 (1/3 0°)	2,0	20,35	40,70	16590,40	290,005	407,627	80,0	106,0

A [%]	V_t [m·min ⁻¹]	T [s]	V_{tt} [MPa·s ⁻¹]
30,00	0,997	85,38	4,950
30,00	1,191	84,58	4,994
32,50	1,473	85,56	4,979

Tab. 11 Statistické vyhodnocení výsledků zkoušky tahem

	a [mm]	b [mm]	S_0 [mm ²]	F_m [N]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	L_0 [mm]
střední průměrná hodnota	2,0	20,30	40,60	16515,20	296,711	405,779	80,0
směrodatná odchylka	0,0	0,071	0,141	55,346	7,028	1,360	0,0
proměnný koeficient	0,0	0,003	0,004	0,003	0,024	0,003	0,0
maximální hodnota	2,0	20,35	40,70	16590,40	306,418	407,627	80,0
minimální hodnota	2,0	20,20	40,40	16458,80	290,005	404,393	80,0

L_u [mm]	A [%]	V_t [m·min ⁻¹]	T [s]	V_{tt} [MPa·s ⁻¹]
104,667	30,833	1,220	85,173	4,975
0,943	1,179	0,196	0,426	0,018
0,009	0,038	0,161	0,005	0,004
106,0	32,5,0	1,474	85,560	4,994
104,0	30,0	0,997	84,580	4,951

Vyhodnocené tahových zkoušek:

Vzhledem k nižším hodnotám rozdílu mezi mezí pevnosti a mezí kluzu je z tahové zkoušky patrné, že pro tažení zadané součásti je vhodnější materiál 11 321.21, který během procesu tváření méně zpevňuje. To dokazují i hodnoty tažnosti "A" v tab. 8 a 10, kde pro vzorky zhotovené pod úhlem 0° (vzhledem ke

směru válcování plechu) dosahuje průměrná hodnota tažnosti 39,58 % pro ocel 11 321.21 a 30,83 % pro materiál 11 300.

Na první pohled, bez jakýchkoliv výpočtů, je to patrné i z proměřené konečné měrné délky L_u , kdy u materiálu 11 321.21 se zkušební vzorek protáhl z výchozí měrné délky $L_0 = 80$ mm na konečnou L_u 111 mm, kdežto v materiálu 11 300 bylo prodloužení z $L_0 = 80$ mm na L_u 104 mm.

4.3 Zkouška hloubením podle Erichsena ČSN EN ISO 20482

Zkušební vzorek byl zhotoven v souladu s ČSN EN ISO 20 482 o jmenovité šířce 90 mm x 90 mm, tloušťka plechu 2 mm. Střed vtisku byl zvolen 45 mm od každé strany. Zkouška byla provedena na třech rozměrově stejných vzorcích.

Zkouška byla provedena na Fakultě strojního inženýrství VUT Brno, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů, místnost A1/1631.

Parametry zkoušky:

zkušební stroj: Typ F-4

výrobce : ZAP Ostrow WLKP

kalibrační list: č. 8011 - KL -E004 - 07 z roku 2007

rozměr zkušební vzorku: 2x90x90 mm



Obr. 33 Zkušební vzorek

Tab. 12 Výsledky zkoušky hloubením podle Erichsena oceli 11 321.21

vzorek	IE [mm]
č.1	13,40
č.2	13,45
č.3	13,40

Tab. 13 Výsledky zkoušky hloubením podle Erichsen oceli 11 300

vzorek	IE [mm]
č.1	12,50
č.2	12,48
č.3	12,52

Vyhodnocení zkoušky:

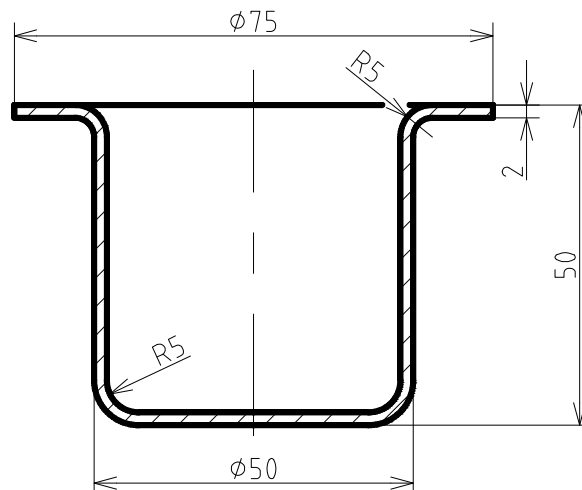
Z porovnání výsledků zkoušek vyplývá, že větší hodnoty prohloubení dosáhla ocel 11 321.21 a je tudíž vhodnější k výrobě zadané součásti.

Dle tvaru trhliny je materiál vhodný pro hluboké tažení. Trhlina se nachází v přechodu kuželové plochy do kulového vrchlíku. Je bez viditelných otřepů.

5. NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY SOUČÁSTI

5.1 Určení základních parametrů [5], [16]

Základní tvar výtažku:

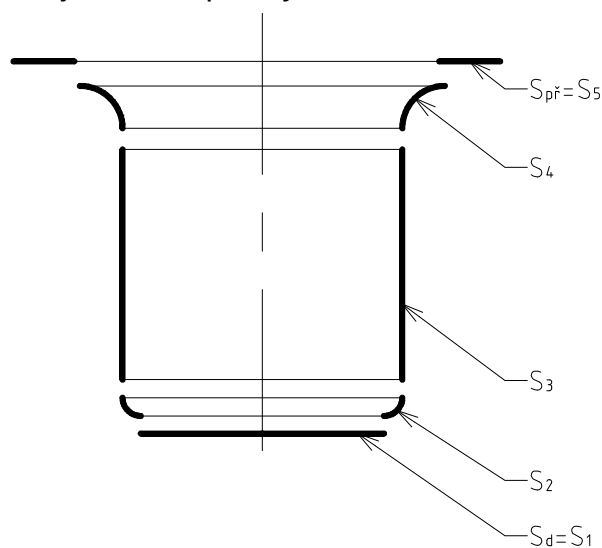


Obr. 34 Základní tvar výtažku

5.1.1 Stanovení velikosti výchozího polotovaru

Vychází se ze zákona zachování objemu před a po a po tváření: $V_0 = V_1$ [mm^3]. Za předpokladu, že se průběhu tažení nemění tloušťka taženého materiálu (tažení bez ztenčení stěny), platí rovnost ploch tj. plocha výtažku (bez ostřížení okrajů) je stejná, jako plocha výchozího přístřihu plechu (polotovaru - kruhový výstřížek): $S_0 = S_1$ [mm^2].

Rozdělení výtažku na jednotlivé plochy:



Obr. 35 Rozdělení výtažku na jednotlivé plochy

$$S_d = S_1 = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 40^2}{4} = 1256,63 \text{ mm}^2 \quad (5.1)$$

$$S_2 = \frac{\pi}{2} \cdot (\pi \cdot D \cdot R + 4 \cdot R^2) = \frac{\pi}{2} \cdot (\pi \cdot 40 \cdot 5 + 4 \cdot 5^2) = 1144,04 \text{ mm}^2 \quad (5.2)$$

$$S_3 = \pi \cdot D \cdot h = \pi \cdot 46 \cdot 38 = 5491,5 \text{ mm}^2 \quad (5.3)$$

$$S_4 = \frac{\pi}{2} \cdot (\pi \cdot D \cdot R + 4 \cdot R^2) = \frac{\pi}{2} \cdot (\pi \cdot 60 \cdot 5 + 4 \cdot 5^2) = 1637,52 \text{ mm}^2 \quad (5.4)$$

$$S_{pr} = S_5 = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{pr}^2 - D^2) = \frac{\pi}{4} \cdot (75^2 - 60^2) = 1590,43 \text{ mm}^2 \quad (5.5)$$

$$S_0 = S_d + S_p + S_{pr} = 1256,63 + 1144,04 + 5491,5 + 1637,52 + 2199,11 = 11\,120,12 \text{ mm}^2 \quad (5.6)$$

Výpočet průměru přístřihu:

$$D_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot S_0}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 11120,12}{\pi}} = 118,98 \approx 119 \text{ mm} \quad (5.7)$$

Přídavek na ostřížení:

1. tah => 3 % z $\varnothing D_0$

2. tah => 1 % z $\varnothing D_0$ => 4 % z $\varnothing D_0 = 0,04 \cdot 119 = 4,88 \approx 5 \text{ mm}$

pak $\varnothing D_0 = 119 + 5 = 124 \text{ mm}$

Při tažení rotačního výtažku s přírubou se po 1. tahu průměr příruby již nemění, proto se volí ještě přídavek na ostřížení okraje příruby dle tloušťky taženého materiálu ($1 \text{ až } 1,5$) t_0 , který se přičte k průměru přístřihu (rondelu) pro 1. tah, aby byla zaručená dostatečná šířka příruby.

Pak $\varnothing D_0 = 124 + 2 = 126 \text{ mm}$

(Volím $1 \cdot t_0 = 1 \cdot 2$)

5.1.2 Nástřihový plán

Při stříhání je velmi důležité výstřižky rozmístit na tabuli nebo pásu plechu tak, aby odpad byl co nejmenší.

Velikost můstku E a velikost okraje F/2 byly stanoveny z monogramu (viz. Příloha 2). Šířka přístřihu (průměr přístřihu) je přes 100 mm, platí tedy E₄, F₄.

Dodávaná tabule plechu je o rozměrech 1000 x 2000.

Stanovené hodnoty:

$$E_4 = 3,5 \text{ mm}$$

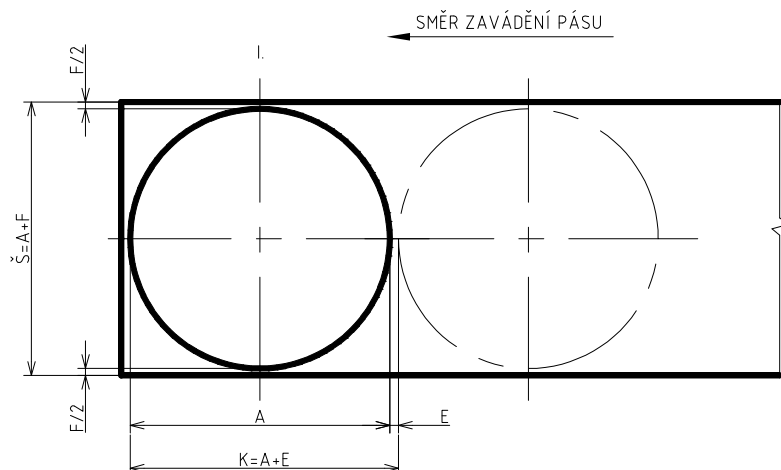
$$F_4 = 9 \text{ mm}$$

Velikost kroku:

$$K = A + E = 126 + 3,5 = 129,5 \text{ mm}$$

Šířka kroku:

$$\check{S} = A + F = 126 + 9 = 135 \text{ mm}$$



Obr. 36 Nástřihový plán

Varianta č.1

V první variantě jsou pásy z tabule nastříhány podélně.

Počet pásů z 1 tabule:

$$P_{\text{pásů}} = \frac{\text{šíř. tabule}}{\text{šíř. pásu}} = \frac{1000}{135} = 7,4 \approx 7 \text{ celých pásů} \quad (5.8)$$

Počet výstřižků z 1 pásu:

$$P_{\text{výstř.}} = \frac{\text{délka pásu}}{\text{délka kroku}} = \frac{2000}{129,5} = 15,44 \approx 15 \text{ celých výstřižků} \quad (5.9)$$

Počet výstřižků z 1 tabule:

$$P_{\text{výstř. / tab.}} = P_{\text{pásů}} \cdot P_{\text{výstř.}} = 7 \cdot 15 = 105 \text{ ks} \quad (5.10)$$

Využití polotovaru plechu v %

Plocha 1 výstřižku:

$$S_{\text{výstř.}} = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,126^2}{4} = 0,0124 \text{ m}^2 \quad (5.11)$$

Plocha všech výstřížků:

$$S_{\text{všech}} = P_{\text{výstř.}} \cdot S_{\text{výstř.}} = 105 \cdot 0,0124 = 1,309 \text{ m}^2 \quad (5.12)$$

Využití tabule:

$$\text{Využití} = \frac{S_{\text{všech}}}{S_{\text{tabule}}} \cdot 100 = \frac{1,309}{2} \cdot 100 = 65,46 \% \quad (5.13)$$

Varianta č.2

V druhé variantě byly pásy z tabule nastříhány příčně.

Počet pásů z 1 tabule:

$$P_{\text{pásů}} = \frac{\text{šíř. tabule}}{\text{šíř. pásu}} = \frac{2000}{135} = 14,81 \approx 14 \text{ celých pásů} \quad (5.14)$$

Počet výstřížků z 1 pásu:

$$P_{\text{výstř.}} = \frac{\text{délka pásu}}{\text{délka kroku}} = \frac{1000}{129,5} = 7,72 \approx 7 \text{ celých výstřížků} \quad (5.15)$$

Počet výstřížků z 1 tabule:

$$P_{\text{výstř. / tab.}} = P_{\text{pásů}} \cdot P_{\text{výstř.}} = 7 \cdot 14 = 98 \text{ ks} \quad (5.16)$$

Využití polotovaru plechu v %

Plocha 1 výstřížku:

$$S_{\text{výstř.}} = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,126^2}{4} = 0,0124 \text{ m}^2 \quad (5.17)$$

Plocha všech výstřížků:

$$S_{\text{všech}} = P_{\text{výstř.}} \cdot S_{\text{výstř.}} = 98 \cdot 0,0124 = 1,215 \text{ m}^2 \quad (5.18)$$

Využití tabule:

$$\text{Využití} = \frac{S_{\text{všech}}}{S_{\text{tabule}}} \cdot 100 = \frac{1,215}{2} \cdot 100 = 60,76 \% \quad (5.19)$$

Zvolené varianta nástřihového plánu

Využití materiálu je u první varianty nástřihového plánu větší. Při podélném stříhu u první varianty je pás delší, tím pádem bude stříhání rychlejší, z jednoho pásu založeného do nástroje bude vystřiženo více přístřihů.

Tab. 14 Vyhodnocení jednotlivých variant

	Var.1	Var. 2
Počet pásů z tabule	7	14
Počet výstřížků v pásu	15	7
Celkem z 1 tabule	105	98
Využití polotovaru	65,46%	60,76%

5.1.3 Určení počtu tažných operací

$$n_1 = 1 + \frac{\log d_n - \log(m_1 \cdot D_0)}{\log m_s} = 1 + \frac{\log(46) - \log(0,49 \cdot 126)}{\log(0,74)} = 1,98 \Rightarrow 2 \text{ tažné operace}$$

Součinitele tažení $m_1 = 0,49$ a $m_s = 0,74$ jsou vybrány z Tab. 15 a Tab. 16. viz. Příloha 1.

5.1.4 Součinitele tažení

Celkový součinitel tažení:

$$m_c = \frac{d_2}{D_0} = \frac{46}{126} = 0,365$$

Součinitel tažení pro první tah z Tab. 15 viz Příloha 1.

$$m_1 = 0,49$$

Součinitel tažení pro druhý tah ze vzorce:

$$m_c = m_1 \cdot m_2 \Rightarrow m_2 = \frac{m_c}{m_1} = \frac{0,365}{0,49} = 0,744$$

5.1.5 Poloměr zaoblení hran nástroje

Pro 1.tah:

$$r_{te1} = 6 \cdot t_0 = 6 \cdot 2 = 12 \text{ mm}$$

Pro 2.tah:

$$r_{te2} = 5 \text{ mm} - \text{konečný poloměr výtažku má být 5 mm}$$

5.1.6 Velikost tažné mezery

Pro 1.tah:

$$z_{m1} = (1,2 \div 1,3) \cdot t_0 = 1,3 \cdot 2 = 2,6 \text{ mm}$$

Pro 2.tah:

$$z_{m2} = (1,1 \div 1,2) \cdot t_0 = 1,1 \cdot 2 = 2,2 \text{ mm}$$

Nejsou požadavky na přesnost součásti, nemusí se kalibrovat proto volím 1,1.

5.1.7 Průměr tažníku a tažnice

Pro 1. tah:

$$d_1 = m_1 \cdot D_0 = 0,49 \cdot 126 = 61,74 \Rightarrow \text{průměr tažníku pro 1. operaci} = 62 \text{ mm}$$

Pro 2. tah:

$$d_2 = m_2 \cdot d_1 = 0,73 \cdot 62 = 45,26 \Rightarrow \text{průměr tažníku pro 2. operaci} = 46 \text{ mm}$$

Pro zadanou součást stačí 2. operace, kdy v 1. operaci se vytáhne výtažek o vnitřním průměru 62 mm a v 2. operaci se vytáhne konečný vnitřní průměr 46 mm.

Průměr otvoru v tažnici pro 1. operaci:

$$d_{te1} = d_{tu1} + 2 \cdot z_{m1} = 62 + 2 \cdot 2,6 = 67,2 \text{ mm}$$

Průměr otvoru v tažnici pro 2. operaci:

$$d_{te2} = d_{tu2} + 2 \cdot z_{m1} = 46 + 2 \cdot 2,2 = 50,4 \text{ mm}$$

5.1.8 Určení potřeby přidržovače

Parametr k_p dle ČSN 227301 určují nutnost použití přidržovače:

$$k_p = 50 \cdot \left(z - \frac{\sqrt{t_0}}{\sqrt[3]{D_0}} \right) = 50 \cdot \left(19 - \frac{\sqrt{2}}{\sqrt[3]{126}} \right) = 80,89$$

$$k_p \geq \frac{100 \cdot d_1}{D_0} \text{ je nutno použít přidržovač}$$

$$k_p < \frac{100 \cdot d_1}{D_0} \text{ není nutno použít přidržovač}$$

$$\frac{100 \cdot 62}{126} = 49,20 \Rightarrow 80,89 \geq 49,20 \Rightarrow \text{je nutné použít přidržovač}$$

5.1.9 Zdvih tažného beranu a vyhazovače [4]

Zdvih tažného beranu pro 1. tah:

Velikost zdvihu tažného beranu je odvozena od výšky výtažku, poloměru zaoblené tažné hrany tažnice a prostoru určeného pro manipulaci. Prostor určený pro manipulaci byl zvolen 30 mm.

$$h_1 = \frac{D_0^2 - d_p^2}{4 \cdot d_1} + 0,86 \cdot R_1 = \frac{126^2 - 75^2}{4 \cdot 62} + 0,86 \cdot 3 = 43,91 \approx 44 \text{ mm}$$

$$Z_{B1} = 2 \cdot h_1 + r_{te1} + 30 = 2 \cdot 44 + 12 + 30 = 130 \text{ mm}$$

Zdvih tažného beranu pro 2. tah:

Velikost zdvihu tažného beranu je odvozena stejně jako u předchozího případu. Prostor určený pro manipulaci byl zvolen 30 mm.

Konečná výška výtažku $h_2 = 50 \text{ mm}$.

$$Z_{B2} = 2 \cdot h_2 + r_{te2} + 30 = 2 \cdot 50 + 5 + 30 = 135 \text{ mm}$$

5.1.10 Síla přidržovače

Pro 1 tah:

$$F_{p1} = S_0 \cdot p_p = \frac{\pi}{4} \cdot (D_0^2 - d_1^2) \cdot p_p = \frac{\pi}{4} \cdot (126^2 - 62^2) \cdot 1,8 = 17009,82 \text{ N} = 17,0 \text{ kN}$$

Pro 2. tah:

$$F_{p2} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_1^2 - d_2^2) \cdot p_p = \frac{\pi}{4} \cdot (62^2 - 46^2) \cdot 1,8 = 2442,90 \text{ N} = 2,44 \text{ kN}$$

Měrný přidržovací tlak se pohybuje v praxi v intervalu $1,8 \div 2,3 \text{ MPa} \Rightarrow$ zvolen jako výchozí hodnota $1,8 \text{ MPa}$.

5.1.11 Tažná síla

Pro 1. tah:

$$F_{taž1} = \pi \cdot d_1 \cdot t_0 \cdot R_m \cdot c_1 = \pi \cdot 62 \cdot 2 \cdot 315 \cdot 1 = 122270,60 \text{ N} \Rightarrow 122,71 \text{ kN}$$

Součinitel $c_1 = 1$ byl vybrán z Tab. 3 pro $m_1 = 0,49$.

$$F_{C1} = F_{taž1} + F_{p1} = 122710,60 + 17009,82 = 139720,42 \text{ N} = 139,72 \text{ kN}$$

Pro 2.tah:

$$F_{\text{taž2}} = \pi \cdot d_2 \cdot t_0 \cdot R_m \cdot c_2 = \pi \cdot 46 \cdot 2 \cdot 315 \cdot 0,51 = 46432,11 \text{ N} \Rightarrow 46,43 \text{ kN}$$

Součinitel $c_2 = 1$ byl vybrán z Tab. 3 pro $m_2 = 0,74$.

$$F_{C2} = F_{\text{taž2}} + F_{p2} = 46432,11 + 2442,9 = 48\,875,01 \text{ N} = 48,87 \text{ kN}$$

Celková tažná síla:

$$F_{\text{celk}} = F_{C1} + F_{C2} = 122\,270,60 + 48\,875,01 = 171\,145,61 \text{ N} \Rightarrow 171,14 \text{ kN}$$

5.1.12 Tažná práce

Práce pro 1. operaci tažení

$$A_{t1} = \frac{k \cdot F_{c1} \cdot h}{1000} = \frac{\frac{2}{3} \cdot 122270,60 \cdot 44}{1000} = 3586,60 \text{ J} = 3,58 \text{ kJ}$$

Práce pro 2. operaci tažení

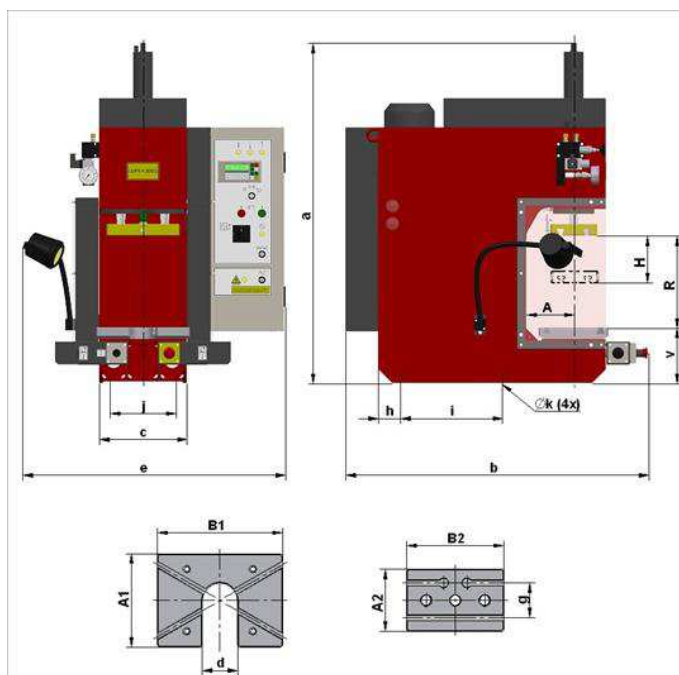
$$A_{t2} = \frac{k \cdot F_{c2} \cdot h}{1000} = \frac{\frac{2}{3} \cdot 48875,01 \cdot 50}{1000} = 1629,16 \text{ J} = 1,62 \text{ kJ}$$

5.2 Návrh stroje [3], [5], [8]

Nejčastěji používanými lisy pro plošné tváření jsou hydraulické a mechanické. U hydraulických lisů je oproti mechanickým počet zdvihů menší, rychlost beranu i síla se mohou nastavit dle potřeby a můžou se naprogramovat automaticky. Mechanické lisy mají větší počet zdvihů, jsou vhodné pro sériovou výrobu a výrobu jednodušších součástek.

Velikost lisu se volí podle maximální síly tažení a zvětšuje se cca o 30 %.

Vzhledem ke zmíněným požadavkům a tažné síle $F_{\text{celk}} = 171,14 \text{ kN}$ musí být jmenovitá síla lisu minimálně 223 kN. Na základě této hodnoty jsem zvolil hydraulický lis CUPS xx DEU, výrobce HŠV stroje a.s. s jmenovitou silou $F_j = 250 \text{ kN}$.



Obr. 37 Lis CUPS xx DEU [8]

Tab. 15 Technické parametry lisu CUPS xx DEU [8]

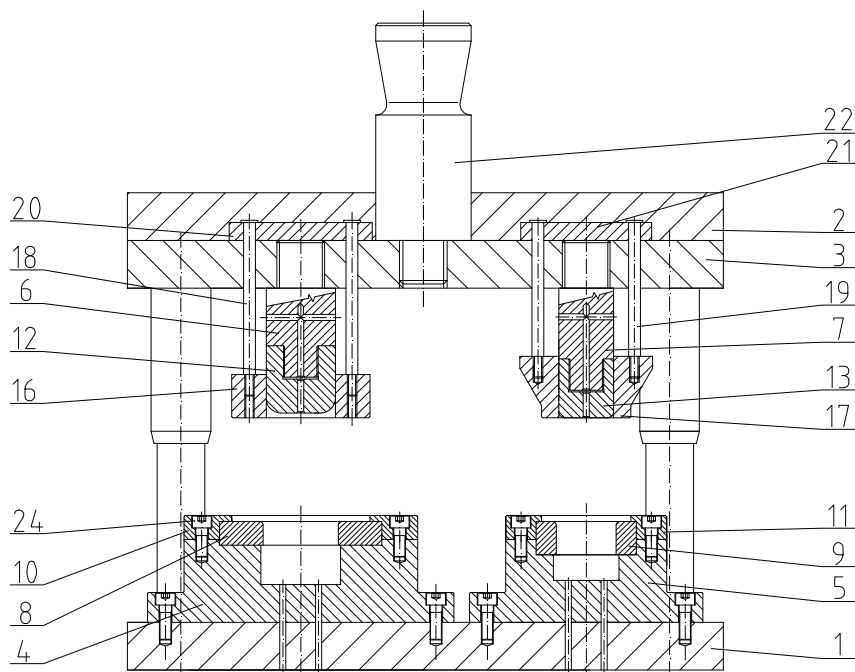
Jmenovitá síla		kN	250
Zdvih beranu		mm	250
Rychlost beranu pracovní		mm·s ⁻¹	27 / 18 / 8
Upínací plocha stolu	A1xB1	mm	400x500
Upínací plocha beranu	A2xB2	mm	250x350
Vyložení	A	mm	250
Rozevření	R	mm	400
Výška stolu	v	mm	260
Délka stroje	b	mm	1340
Šířka stroje	e	mm	940
Výška stroje	a	mm	1570
Celkový příkon		kW	6
Hmotnost		kg	940

5.3. NÁSTROJ

Popis nástroje

Tažný nástroj postupové konstrukce, který se skládá ze dvou základních částí – horní a dolní. Obě části jsou spojeny v jeden celek dvěma sloupky (14), které jsou nalisovány v základové desce (1) a zasouvají se do pouzder (15). Zajišťují vzájemnou polohu tažníků (12, 13) a tažnic (8, 9). Jsou navrženy tak, aby nezabraňovaly obsluze vkládání a vyjímání výlisků. Nástroj je upnut na základovou (1) a vodící (3) desku pomocí úpínek. Tažníky jsou upnuty ve vodící desce a jejich zdvih je ovládán pomocí horního beranu. Přidržovače (16, 17) jsou montážně spojeny s upínací deskou (2). Tažníky jsou s ohledem na rozměry řešeny jako dělené. Tažnice jsou přišroubovány k tělu tažnice (4, 5) a zároveň středěny pomocí kolíků. Těla tažnic jsou přišroubovány k základové

desce a vystředěny pomocí kolíků. Materiálem funkčních částí byla zvolena ocel 19 436.9. Výška tažného nástroje v rozevřeném stavu je 400 mm a v uzavřeném 315 mm. Vodící deska s tažníky koná zdvih o velikosti 135 mm, upínací deska s přidržovači zdvih o velikosti 85 mm. Všechny kinematické pohyby jsou řízeny strojem.



Obr. 38 Tažný nástroj

Funkce nástroje

Po spuštění lisu začne horní beran tlačit upínací a vodící desku společně s tažníky a přidržovači směrem dolů k tažnici, kde je v základacím rámečku založen přístřih a provede se první tah. Po dokončení zdvihu se první výtažek přesune do druhé pozice a do první se vloží nový přístřih. Po dokončení druhého zdvihu je z druhé pozice vyjmut konečný výtažek a uložen obsluhou na paletu nebo přesunut na dopravník.

Kontrola funkčních ploch

Kontrola na otlačení upínacích ploch tažníků

Pro upínací část tažníků byla zvolena ocel 11 500, $\sigma_{DOV} = 153 \text{ MPa}$.

Tažník pro 1. tah:

Průměr upínací části: $d_{ut1} = 62 \text{ mm}$

Jmenovitý průměr závitu: $d_{zt1} = 40 \text{ mm}$

$$P_{t1} = \frac{F_{taž1}}{\pi \cdot (d_{ut1}^2 - d_{zt1}^2)} = \frac{122710,60}{\pi \cdot (62^2 - 40^2)} = 7107 \text{ MPa} < \sigma_{DOV} \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (5.1)$$

Tažník pro 2. tah:

Průměr upínací části: $d_{ut2} = 46 \text{ mm}$

Jmenovitý průměr závitu: $d_{zt2} = 40 \text{ mm}$

$$P_{t1} = \frac{F_{taž2}}{\pi \cdot \frac{(d_{ut2}^2 - d_{zt2}^2)}{4}} = \frac{46432,11}{\pi \cdot \frac{(46^2 - 40^2)}{4}} = 114,57 \text{ MPa} < \sigma_{DOV} \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (5.2)$$

Kontrola na otlacení upínacích ploch kolíků přídržovače

Pro kolíky přídržovačů byla zvolena ocel 11 500, $\sigma_{DOV} = 153 \text{ MPa}$.

Přídržovač pro 1. tah:

Průměr upínací části: $d_{uk1} = 10 \text{ mm}$

Jmenovitý průměr závitu: $d_{zk1} = 8 \text{ mm}$

$$P_{p1} = \frac{F_{p1}}{6 \cdot \frac{\pi \cdot (d_{uk1}^2 - d_{zk1}^2)}{4}} = \frac{17009,82}{\frac{\pi \cdot (10^2 - 8^2)}{4}} = 100,26 \text{ MPa} < \sigma_{DOV} \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (5.3)$$

Přídržovač pro 2. tah:

Průměr upínací části: $d_{uk1} = 10 \text{ mm}$

Jmenovitý průměr závitu: $d_{zk1} = 8 \text{ mm}$

$$P_{p2} = \frac{F_{p2}}{6 \cdot \frac{\pi \cdot (d_{uk2}^2 - d_{zk2}^2)}{4}} = \frac{2442,90}{\frac{\pi \cdot (10^2 - 8^2)}{4}} = 14,39 \text{ MPa} < \sigma_{DOV} \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (5.4)$$

Kontrola kolíků přídržovačů na vzpěr

Přídržovač pro 1. tah:

Délka kolíku $l_{k1} = 73 \text{ mm}$

$$F_{krit1} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot \frac{\pi \cdot d_{uk1}^2}{4} \cdot 0,25 \cdot d_{uk1}}{(0,75 \cdot L_{k1})^2} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot \frac{\pi \cdot 10^2}{4} \cdot 0,25 \cdot 10}{(0,75 \cdot 73)^2} = 41156,79 \text{ N} \quad (5.5)$$

Podíl síly prvního přídržovače připadající na jeden kolík $< F_{krit1} \Rightarrow \text{vyhovuje}$

Přidržovač pro 2. tah:

Délka kolíku $l_{k2} = 57 \text{ mm}$

$$F_{\text{krit2}} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot \frac{\pi \cdot d_{uk2}^2}{4} \cdot 0,25 \cdot d_{uk2}}{(0,75 \cdot L_{k2})^2} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot \frac{\pi \cdot 10^2}{4} \cdot 0,25 \cdot 10}{(0,75 \cdot 57)^2} = 67505,24 \text{ N} \quad (5.6)$$

Podíl síly prvního přidržovače připadající na jeden kolík $< F_{\text{krit2}} \Rightarrow$ vyhovuje

6.ZÁVĚR

Bakalářská práce byla zpracována v rámci zadaných cílů. Cílem bylo nahradit stávající materiál (ocel 17 240) určený pro výrobu zadané součásti – kalíšku - materiálem levnějším a vhodnějším vzhledem k použití součásti v praxi a následně pro zadanou součást navrhnout postup výroby, nástroj a vhodný stroj.

V praktické části předkládané práce byly v souladu s vytyčenými cíli nejdříve provedeny dvě technologické zkoušky - tahová zkouška a zkouška hloubením dle Erichseny. Tyto zkoušky byly vybrány z důvodu dostupnosti potřebného zařízení na Odboru technologie tváření kovů a plastů (ÚST, FSI, VUT v Brně). Cílem zkoušek bylo určit vhodný materiál pro výrobu zadané součásti – kalíšku - technologií hlubokého tažení. Porovnány byly dva navržené materiály: ocel 11 321.21 a ocel 11 300. Z výsledků tahové i Erichsenovy zkoušky vyplynulo, že pro výrobu kalíšku je vhodnější ocel 11 321.21, a to z důvodu dosažení většího přetvoření do okamžiku vzniku trhliny.

Vhodnost daného materiálu také potvrdilo i porovnání cen jednotlivých materiálů. Ocel 11 321.21 z porovnání vyšla jako nejlevnější, z čehož plyne jasný závěr, že i samotná výroba zadané součásti bude v porovnání s ostatními výše jmenovanými materiály vycházet levněji.

V druhé části praktického řešení práce byl navržen postup výroby kalíšku z oceli 11 321.21 a dále výrobní nástroj a vhodný stroj. Kalíšek bude vyráběn v tažném nástroji na dvě operace. Zvolený lis CUPS xx DEU o jmenovité síle $F_j = 250 \text{ kN}$ je pro výrobu vyhovující.

Ekonomická bilance a výrobní výkresy částí nástroje nebyly v rámci práce provedeny, neboť tyto body nebyly zahrnuty do požadovaných cílů stanovených vedoucí bakalářské práce.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BAREŠ, K.; kolektiv autorů . *Lisování*. Praha: SNTL, 1971. ISBN 04-234-71.
2. CADDELL, Robert M. *Formability Tests*. [online]. [cit. 2012-05-24]. Dostupné z:<http://www.globalspec.com/reference/70327/203279/chapter-18-formability-tests>.
3. DVOŘÁK, Milan. *Technologie II*. 3. dopl. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 238 s. ISBN 80-214-2683-7.
4. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tvaření*. 2. vyd. Brno: PC-DIR Real, s.r.o., 1999, 178 s. ISBN 80-214-1481-2.
5. DVOŘÁK, Milan a Michaela MAREČKOVÁ. *TECHNOLOGIE TVÁŘENÍ* [online]. Studijní opory pro kombinované studium I. Stupeň, 2. Ročník. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, září 2006. Dostupný z WWW: <http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/technologie_tvareni/kapitol_a_4.htm> [cit. 2012-05-23].
6. FERONA, a.s. *Materiálové normy* [online]. [cit. 2012-05-24]. Dostupné z: <http://www.ferona.cz/>.
7. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
8. HŠV STROJE, a.s. *Hydraulické lis*y [online]. [cit. 2012-05-24]. Dostupné z: <http://www.hsvpolicka.cz/>.
9. KOTOUČ, Jiří. *Tvářecí nástroje*. 1. vyd. Praha: ČVUT Praha, 1993, 349 s. ISBN 80-010-1003-1.
10. MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT. *Erichsenova zkouška* [online]. [cit.2012-05-24].Dostupné z: <http://me.aut.ac.ir/staff/solidmechanics/alizadeh/Erichsen%20Cupping%20Test.htm>.
11. OČVED, s.r.o. *Hutní materiál* [online]. [cit. 2012-05-24]. Dostupné z: <http://www.a20.cz/>.
12. PETRUŤELKA, Jiří a Richard BŘEZINA. *Úvod do tváření II* [online]. Ostrava 2001. Dostupný z WWW: < http://www.345.vsb.cz/jiripetruzelka/Texty/Uvod_TV1.pdf> [cit. 2012-05-22].

13. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. 1. vyd. Brno: CERM, 2001, 505 s. SBN 80-720-4193-2.
14. STEVENS COMPANY INC. *Ukázky lisování* [online]. [cit. 2012-05 22]. Dostupné z: <http://www.stevenscompanyinc.com/>.
15. TIŠNOVSKÝ, Miroslav a Luděk MÁDLE. *Hluboké tažení plechu na lisech*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1990, 196 s. Knižnice techn. aktualit. ISBN 80-030-0221-4.
16. *TU v Liberci Fakulta strojní Katedra strojírenské technologie* [online]. [cit. 2012-05-24]. Dostupné z: <http://www.ksp.tul.cz/>.
17. *Ust.fme.vutbr.cz* [online]. 2012 [cit. 2012-05-23]. *Technologie tváření kovů*. Dostupné z WWW:
< http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/Technvyroby_I-tvareni.pdf >.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Popis	Jednotka
A	tažnost	[%]
A _H	rovnoměrná (homogenní) tažnost	[%]
A _p	práce na vyčerpání zásob plasticity	[J]
A _{Rp0,2}	anizotropie smluvní meze kluzu	[-]
A _t	tažná práce	[J]
A ₈₀	tažnost zkušební tyče délky 80 mm	[%]
a _{Re}	plošná anizotropie stanovená pro R _e	[-]
B	největší rozměr přístřihu	[mm]
b	šířka zkušební tyče	[mm]
b ₀	výchozí šířka zkušební tyče	[mm]
b _s	šířka svitku	[mm]
b ₂₀	šířka zkušební tyče po 20 % plastické deformace v tahu	[mm]
C	součinitel vyjadřující vliv součinitele tažení m	[-]
C _k	konstanta daná pro hodnotu napětí při $\varphi = 1$	[-]
C ₁ , C ₂	konstanty	[-]
C	součinitel vyjadřující vliv součinitele tažení vzhledem k poměru t ₀ /D ₀	[-]
D ₀	průměr přístřihu	[mm]
d	průměr výtažku	[mm]
d _p	průměr příruby výtažku	[mm]
d ₁ , d ₂	průměry následných výtažků	[mm]
d ₁	největší průměr kuželového výtažku	[mm]
d'	rozšíření otvoru	[mm]
d' _{min}	minimální rozšíření otvoru	[mm]
d' _{max}	maximální rozšíření otvoru	[mm]
E	velikost můstku	[mm]
e ^{u.a}	součinitel vyjadřující vliv tření	[-]
F	velikost okraje	[mm]
F _C	celková síla při tažení	[N]
F _{krit}	síla na utržení dna výtažku	[N]
F _{max}	maximální síla, kterou snese zkušební tyč	[N]
F _p	síla přidržovače	[N]
F _{taž}	skutečná tažná síla	[N]
h	výška výtažku	[mm]
h'	prohloubení plechu	[mm]
h _{min}	minimální výška výtažku	[mm]
h _{max}	maximální výška výtažku	[mm]
h ₀	šířka mezikruží	[mm]
h _v	výška válcové části tažnice	[mm]
h ₀ , h ₄₅ , h ₉₀	výška výtažku vzhledem ke směru válcování plechu pod úhly 0°, 45°, 90°	[-]
k	stupeň tažení	[-]
K _p	šířka přístřihu	[mm]

K	velikost kroku při stříhání	[mm]
L ₂₀	délka měrné části zkušební tyče po 20 % plastické deformace v tahu	[mm]
L	délka ohýbané stěny výtažku	[mm]
L _H	délka rovnoměrného prodloužení	[mm]
L ₀	výchozí délka zkušební tyče	[mm]
L _O	původní měrná délka	[mm]
L _p	délka přístřihu	[mm]
L _u	konečná délka po přetržení zkušební tyče	[mm]
ΔL	rozdíl délek po a před přetržením zkušební tyče	[mm]
l	délka střížné hrany	[mm]
l _s	délka svitku	[mm]
m	součinitel tažení	[-]
m _c	celkový součinitel tažení	[-]
m _F	míra hlubokotažnosti podle Fukui-ho	[-]
m _n	n součinitelů tažení	[-]
m _s	střední hodnota součinitele tažení	[-]
m ₁ , m ₂ , m ₃	součinitel tažení pro jednotlivé tahy	[-]
n	exponent deformačního zpevnění	[-]
n _l	počet otáček lisu	[ot min ⁻¹]
n _p	počet ks přístřihu z jednoho svitku	[-]
n _s	střední hodnota exponentu	[-]
n _t	počet tahů	[-]
O	obvod výtažku	[mm]
P _p	tlak přidržovače	[MPa]
p _t	pracovní pohyb tažníku	[mm]
q	míra vhodnosti plechu k hlubokému tažení podle Siebela a Pompa	[-]
R	poloměr přístřihu	[mm]
R _a	drsnot povrchu	[μm]
R _b	vnější poloměr zaoblení v rozích výtažku	[mm]
R _e	mez kluzu materiálu	[MPa]
R _k	poloměr zaoblení přístřihu v rozích	[mm]
R _m	mez pevnosti materiálu	[MPa]
R _o	poloměr zaoblení v rozích výtažku	[mm]
R _{p0,2}	smluvní mez kluzu	[MPa]
R _{te}	poloměr zaoblení hrany tažnice	[mm]
R _{tu}	poloměr zaoblení hrany tažníku	[mm]
r	normálová anizotropie	[-]
r _r	poloměr zaoblení přechodu stěny do příruby a dna výtažku	[mm]
r _s	střední hodnota normálové anizotropie	[-]
r ₀ , r ₄₅ , r ₉₀	hodnoty anizotropie plechu zjištěné ve ve směrech 0°, 45°, 90°	[-]
Δr	ukazatel cípovitosti výtažků	[-]
S	plocha příruby pod přidržovačem	[mm ²]
S _d	plocha dna	[mm ²]
S _o	plocha výstřihu[mm ²]	
S _p	plocha pláště	[mm ²]

$S_{př}$	plocha příruby	$[mm^2]$
S_u	průřez zkušební tyče po přetržení	$[mm^2]$
S_v	plocha výtažku	$[mm^2]$
S_0	výchozí průřez zkušební tyče	$[mm^2]$
S_1, S_2, S_3, S_4	jednotlivé plochy válcového výtažku	$[mm^2]$
T'	míra hlubokotažnosti podle Grosse a Engelhardta	$[-]$
T	doba po přetržení zkušební vzorku	$[s]$
t_0	výchozí tloušťka materiálu	$[mm]$
t_{20}	tloušťka zkušební tyče po 20 % plastické deformace v tahu	$[mm]$
u	ukazatel potřeby použití přidržovače	$[-]$
v	tažná rychlost	$[mm \cdot min^{-1}]$
Z	kontrakce	$[%]$
Z_B	zdvih beranu	$[mm]$
Z_p	zásoba plasticity	$[N \cdot mm \cdot mm^{-3}]$
z	materiálová konstanta	$[-]$
z_c	koeficient cípovitosti	$[%]$
z_m	tažná mezera	$[mm]$
z_d	celkový zdvih beranu lisu	$[mm]$
z_r	tažná mezera v rozích pro první a další tahy	$[mm]$
α	úhel zvoleného směru v rovině plechu vzhledem ke směru válcování	$[^\circ]$
a_{Re}	plošná anizotropie stanovená pro R_e	$[-]$
ε	poměrné prodloužení	$[-]$
ε_c	celková deformace	$[-]$
ε_p	plastická deformace	$[-]$
φ_b	logaritmická deformace ve směru šířky vzorku	$[-]$
φ_t	logaritmická deformace ve směru tloušťky vzorku	$[-]$
φ	logaritmický stupeň deformace	$[-]$
φ_1	deformace v radiálním směru	$[-]$
φ_2	deformace v axiálním směru	$[-]$
φ_3	deformace v tangenciálním směru	$[-]$
μ	součinitel tření	$[-]$
σ	skutečné napětí	$[MPa]$
σ_1	radiální tahové napětí	$[MPa]$
σ_2	osové tlakové napětí	$[MPa]$
σ_3	tangenciální tlakové napětí	$[MPa]$

Příloha 1 Koeficienty tažení

Tab.15 Koeficienty tažení válcových výtažků tažených z kruhových výstřižků [1]

Označení koeficientu tažení.	Poměrná tloušťka výstřižku $\frac{t_0}{D_0} \cdot 100 [\%]$				
	0,30 až 0,60	0,60 až 0,1	1,0 až 1,5	1,5 až 2,0	nad 2,0
M ₁	0,58 až 0,56	0,56 až 0,54	0,54 až 0,52	0,52 až 0,50	0,50 až 0,48
M ₂	0,81 až 0,80	0,80 až 0,79	0,79 až 0,78	0,78 až 0,77	0,77 až 0,76
M ₃	0,82 až 0,81	0,81 až 0,80	0,80 až 0,79	0,79 až 0,78	0,78 až 0,77
M ₄	0,84 až 0,83	0,83 až 0,82	0,82 až 0,81	0,81 až 0,80	0,80 až 0,79
M ₅ , M ₆	0,86 až 0,85	0,85 až 0,84	0,84 až 0,83	0,83 až 0,82	0,82 až 0,81
atd. při tažení s kalibrováním	0,97 až 0,96	0,96 až 0,95	0,95 až 0,94	0,94 až 0,93	0,93 až 0,92

Tab. 16 Koeficienty tažení pro válcové výtažky s přírubou [9]

Označení koeficientu tažení.	Poměrná tloušťka výstřižku $\frac{t_0}{D_0} \cdot 100 [\%]$				
	2,0 až 1,5	1,5 až 1,0	1,0 až 0,60	0,60 až 0,30	0,30 až 0,15
M ₂	0,73	0,75	0,76	0,78	0,80
M ₃	0,75	0,78	0,79	0,80	0,82
M ₄	0,78	0,80	0,82	0,83	0,84
M ₅	0,80	0,82	0,84	0,85	0,86

Tab. 17 Poměrné hodnoty $\frac{h}{d}$ pro válcové výtažky s přírubou [9]

Poměrný průměr příruby $\frac{d_p}{d}$.	Poměrná tloušťka výstřižku $\frac{t_0}{D_0} \cdot 100 [\%]$				
	2 až 1,5	1,5 až 1,0	1,0 až 0,60	0,60 až 0,30	0,30 až 0,10
Do 1,1	0,90 až 0,75	0,82 až 0,65	0,70 až 0,57	0,62 až 0,50	0,50 až 0,45
1,3	0,80 až 0,65	0,72 až 0,56	0,60 až 0,50	0,53 až 0,45	0,47 až 0,40
1,5	0,70 až 0,58	0,63 až 0,50	0,53 až 0,45	0,48 až 0,40	0,42 až 0,35
1,8	0,58 až 0,48	0,53 až 0,42	0,44 až 0,37	0,39 až 0,34	0,35 až 0,29
2,0	0,51 až 0,47	0,46 až 0,36	0,38 až 0,32	0,34 až 0,29	0,30 až 0,25
2,2	0,45 až 0,35	0,40 až 0,31	0,33 až 0,27	0,29 až 0,25	0,26 až 0,22
2,5	0,35 až 0,28	0,32 až 0,25	0,27 až 0,22	0,23 až 0,20	0,21 až 0,17
2,8	0,27 až 0,22	0,24 až 0,19	0,21 až 0,17	0,18 až 0,15	0,16 až 0,13
3,0	0,22 až 0,18	0,20 až 0,16	0,17 až 0,14	0,15 až 0,12	0,13 až 0,10

Příloha 2 Nomogram pro stanovení okrajů a přepážek nástřihového plánu [17]

