FAKULTA STROJNÍ TUL

Bakalářská práce

Stanovení změny mechanických vlastností materiálu při průchodu přes brzdící lištu tažného nástroje

Studijní program: B0715A270008 Strojírenství
Autor práce: **Tomáš Kubíček**
Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce: Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Liberec 2022

FAKULTA STROJNÍ TUL

Zadání bakalářské práce

Stanovení změny mechanických vlastností materiálu při průchodu přes brzdící lištu tažného nástroje

Jméno a příjmení:	**Tomáš Kubíček**
Osobní číslo:	S20000057
Studijní program:	B0715A270008 Strojírenství
Zadávající katedra:	Katedra strojírenské technologie
Akademický rok:	2022/2023

Zásady pro vypracování:

1. Základní technologie plošného tváření. Materiály používané pro hluboké tažení.
2. Základní přehled zkoušek pro stanovení mechanických vlastností kovových materiálů.
3. Pro zvolený materiál provést experimentální zjištění vlivu technologických parametrů (rychlost posuvu, velikost uzavírací síly).
4. Vyhodnocení a závěr.

Rozsah grafických prací:	obrázky, tabulky, grafy, výkresová dokumentace
Rozsah pracovní zprávy:	cca 30 stran
Forma zpracování práce:	tištěná/elektronická
Jazyk práce:	čeština

Seznam odborné literatury:

[1] DAVIES, Geoffrey. Materials for Automobile Bodies. B.m.:Butterworth-Heinemann, 2012. ISBN 978-0-08-096979-4.

[2] ASHBY, M. F. Materials selection in mechanical design. 3rd ed. Amsterdam ; Boston: Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 978-0-7506-6168-3.

[3] MARQUARD, Elizabeth a Heather LAMPMAN. ASM Handbook, Volume 14B: Metalworking: Sheet Forming. B.m.: ASM International, 2006. ISBN 0-87170-710-1.

[4] ČSN EN ISO 6892-1 (420310) Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.

[5] ČSN EN ISO 7438 (420401) Kovové materiály – Zkouška ohybem. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.

[6] NEUBAUER, Jiří, Marek SEDLAČÍK a Oldřich KŘÍŽ. Základy statistiky: aplikace v technických a ekonomických oborech. Praha: Grada, 2016. ISBN 978-80-247-5786-5. {Sem vložte seznam navržené literatury z IS STAG}

Vedoucí práce:	doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D. Katedra strojírenské technologie
Konzultant práce:	Ing. Jiří Sobotka, Ph.D. Katedra strojírenské technologie
Datum zadání práce:	30. listopadu 2022
Předpokládaný termín odevzdání:	30. května 2023

L.S.

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
děkan

doc. Ing. Iva Nováková, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci 30. listopadu 2022

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval/a samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom/a toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuj zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom/a povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. O vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom/a následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

10. ledna 2024 Tomáš Kubíček

Stanovení změny mechanických vlastností materiálu při průchodu přes brzdící lištu tažného nástroje

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá stanovením změny mechanických vlastností plechu při průchodu přes brzdící lištu tažného nástroje. V teoretické části jsou uvedeny základní technologie plošného tváření, přehled materiálů používaných pro hluboké tažení a charakteristika zkoušek pro hodnocení mechanických vlastností testovaných materiálů. V experimentální části je stanoven vliv rychlosti posuvu a velikost kontaktního tlaku na změnu mechanických vlastností plechu při průchodu přes brzdící lištu tažného nástroje. Závěry práce jsou formulovány na základě naměřených výsledků a jejich statistického vyhodnocení.

Klíčová slova

brzdící lišta, změna mechanických vlastností, hluboké tažení

Determination of change in the material mechanical properties as passing through the draw-beads of the drawing tool

Abstract

The bachelor thesis deals with the determination of the change in sheet mechanical properties as passing through the draw-beads of the drawing tool. In the theoretical part, the basic technologies of the sheet metal forming, an overview of materials used for deep-drawing and characteristics of material tests that are used to evaluate the mechanical properties of tested materials are presented. In the experimental part is determined influence of the feed rate and the magnitude of the contact pressure on the change of sheet mechanical properties as passing through the draw-beads of the drawing tool. Finally, conclusions of the submitted thesis are formulated on the basis of measured results and statistical evaluation.

Keywords

Draw-beads, Mechanical Properties, Deep-drawing

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat vedoucímu své bakalářské práce doc. Ing. Pavlovi Solfronkovi, Ph.D. za pomoc, trpělivost, ochotu a připomínky při zpracování mé práce. Dále si můj vděk zaslouží moje rodina, která mě vždy během studia bez přestání podporovala a dodávala potřebnou motivaci.

Obsah

1 Úvod **10**
2 Teoretická část **11**
2.1 Charakteristika technologii plošného tváření 11
2.1.1 Ohýbání 11
2.1.2 Stříhání 15
2.1.3 Tažení 20
2.2 Materiály používané pro hluboké tažení 29
2.2.1 Nízkouhlíkové oceli 29
2.2.2 Hliník a jeho slitiny 30
2.2.3 Slitiny mědi 30
2.2.4 Nerezové oceli 31
2.3 Zkoušky mechanických vlastností 31
2.3.1 Přehled mechanických zkoušek 31
2.3.2 Statické mechanické zkoušky 31
2.3.3 Dynamické mechanické zkoušky 35
3 Experimentální část **37**
2.4 Pracovní postup 38
2.4.1 Rozbor materiálu 38
2.4.2 Měření mechanických vlastností základního materiálu 39
2.4.3 Příprava vzorků 40
2.4.4 Zkouška protahování pásku 40
2.4.5 Příprava vzorků 42
2.4.6 Měření vzorků 42
2.4.7 Statická zkouška tahem 43
2.5 Vyhodnocení dat ze zkoušky tahem 44
2.5.1 Statistické vyhodnocení dat 44
2.5.2 Analýza rozptylu (ANOVA) 52
4 Diskuse výsledků **55**
5 Závěr **57**
Seznam obrázků **58**
Použitá literatura **60**
Seznam příloh **61**

Seznam zkratek

ΔL	celkové prodloužení	[mm]
A_{80mm}	celková tažnost zkušební tyče délky 80 mm	[%]
C	součinitel zaplnění diagramu	[-]
d	průměr tažníku	[mm]
D	průměr přístřihu	[mm]
d	průměr výtažku	[mm]
F	testovací kritérium pro F-test	[-]
Fc	maximální velikost tažné síly	[N]
F_{krit}	kritická hodnota pro F-test	[-]
F_S	velikost střižné síly	[N]
h	výška výtažku	[mm]
H_0	nulová hypotéza	[-]
H_1	alternativní hypotéza	[-]
K	stupeň tažení	[-]
L	délka obvodu polovýrobku	[mm]
L_0	počáteční měřená délka	[mm]
l_s	délka střihu	[mm]
m	součinitel tažení	[-]
p	specifický tlak přidržovače	[MPa]
R	poloměr ohybu (tj. ohybníku)	[mm]
R_m	mez pevnosti materiálu	[MPa]
R_n	poloměr neutrální osy	[mm]
$R_{p0.2}$	Smluvní mez kluzu	[MPa]
S	plocha materiálu	[mm^2]
s	tloušťka plechu	[mm]
S_0	počáteční průřezová plocha zkoušené délky	[mm^2]
s_0	počáteční tloušťka stříhaného materiálu	[mm]
S_p	plocha přidržovače	[mm^2]
S_u	minimální průřezová plocha po lomu	[mm^2]
t	tloušťka ohýbané součásti	[mm]
x	míra posunutí neutrální osy	[mm]
Z	kontrakce v procentech	[%]
α	úhel ohybu	[°]
α_h	hladina významnosti	[%]
γ	úhel odpružení	[°]

1 Úvod

V průmyslové výrobě je technologie tažení často využívána, protože při ní vzniká minimum odpadu, což je v současnosti důležitý faktor. Velké využití této technologie je právě v automobilovém průmyslu, kde se využívá k výrobě dílů karoserie. Další možností využití tažení je pro výrobu symetrických hlubokých výtažků. Rozdíl mezi těmito dvěma způsoby je takový, že při výrobě karosářských (velkoplošných dílů) je plocha pod přidržovačem mnohem menší než plocha vlastního výlisku. Proto se používají brzdící lišty, které zpomalují tok materiálu a vytvářejí potřebný stav napjatosti.

Při průchodu materiálu přes brzdící lištu tažného nástroje dochází ke změně mechanických vlastností. Cílem této bakalářské práce je zjistit změnu mechanických vlastností při průchodu materiálu přes brzdící lištu a tažnou hranu nástroje. Dále bude zjišťován vliv technologických parametrů tažení na změnu mechanických vlastností materiálu. Technologické parametry (velikost přidržovacího tlaku a rychlost posuvu) budou voleny s ohledem na skutečně používané hodnoty v automobilovém průmyslu. Velikost kontaktního tlaku bude zvolena 2 MPa, 4 MPa a 6 MPa. Rychlost posuvu plechu při testu bude volena 10 mm/s a 50 mm/s. Po protažení testovaných vzorků přes brzdící lištu a tažnou hranu budou vzorky podrobeny statické zkoušce tahem a na základě výsledků určeny změny mechanické vlastností. Vliv jednotlivých technologických parametrů na změnu mechanických vlastností bude následně testován statistickými metodami.

2 Teoretická část

Teoretická část této bakalářské práce se bude zabývat základními technologiemi plošného tváření a to ohýbáním, stříháním a tažením. Bude také popisovat materiály používané pro hluboké tažení. Dalším tématem bude přehled a rozdělení zkoušek pro stanovení mechanických vlastností kovových materiálů.

2.1 Charakteristika technologii plošného tváření

Při tváření kovů dochází ke vzniku plastických deformací, díky nimž se mění tvar a rozměry polotovaru. Zároveň většinou dochází ke zlepšení mechanických vlastností. Konkrétně při plošném tváření v tělese převládá rovinný stav napjatosti. Výchozí těleso se deformuje bez značné změny tloušťky [1].

2.1.1 Ohýbání

Ohýbání je způsob tváření, během něhož je polotovar (nejčastěji plech nebo profil) trvale deformován do různých úhlů. Moment vnějších sil zde způsobuje pružné plastické deformace. Působí na malou část materiálu, čímž zásadně mění velikost a směr napětí a deformace. Vrstvy materiálu na vnější straně ohybu jsou namáhány na tah. Jelikož se zde jedná o rovinnou napjatost, materiál musí nějakým způsobem kompenzovat své deformace, což má za důsledek, že se vlákna prodlužují v podélném směru a v příčném stlačují. Naopak na vnitřní straně ohybu jsou namáhána na tlak, kde se v podélném směru zkracují a v příčném roztahují. Mezi těmito vrstvami je vrstva okolo neutrální osy, u které se během ohýbání nemění délka a ani nevznikají deformace [2].

Neutrální osa

Rovina, která prochází neutrální osou, se před tvářením nachází ve středu průřezu, ale během ohýbání se posouvá směrem k vnitřní straně ohybu, viz Obr. 1. Osa těžiště ohýbaného materiálu tedy neleží v této rovině. Přesněji se poloha této roviny (neutrální vrstvy) určuje z rovnice (1) [3].

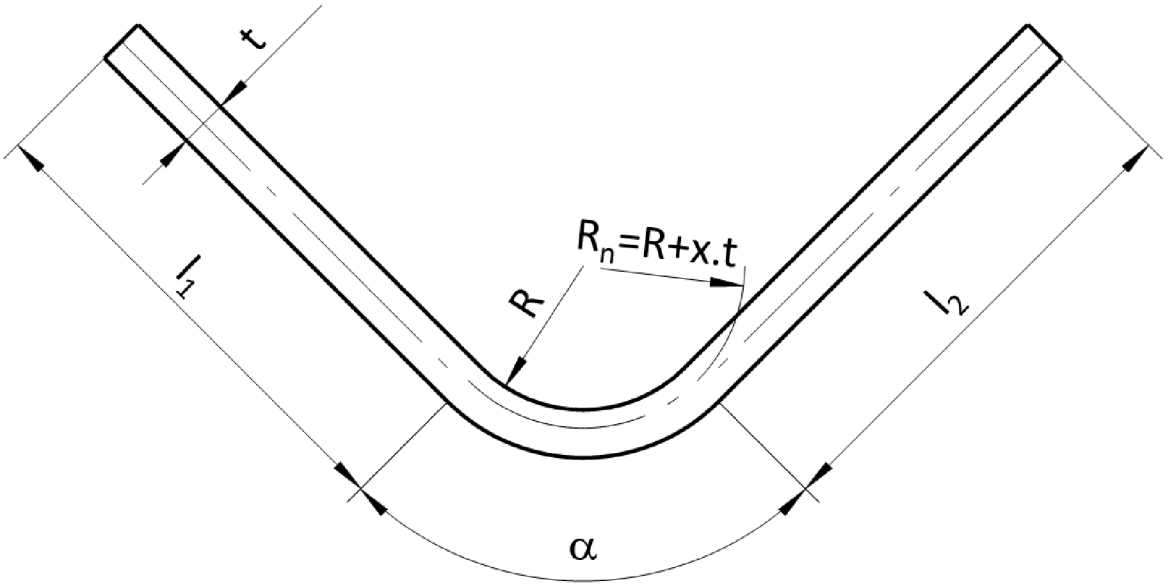
$$R_n = R + x \times t \quad (1)$$

Kde R_n … poloměr neutrální osy [mm]

R … poloměr ohybu (tj. ohybníku) [mm]

x … míra posunutí neutrální osy $x=f_{(Rp0,2,\ s,\ Rm\ atd.)}$[mm]

t … tloušťka ohýbané součásti [mm]



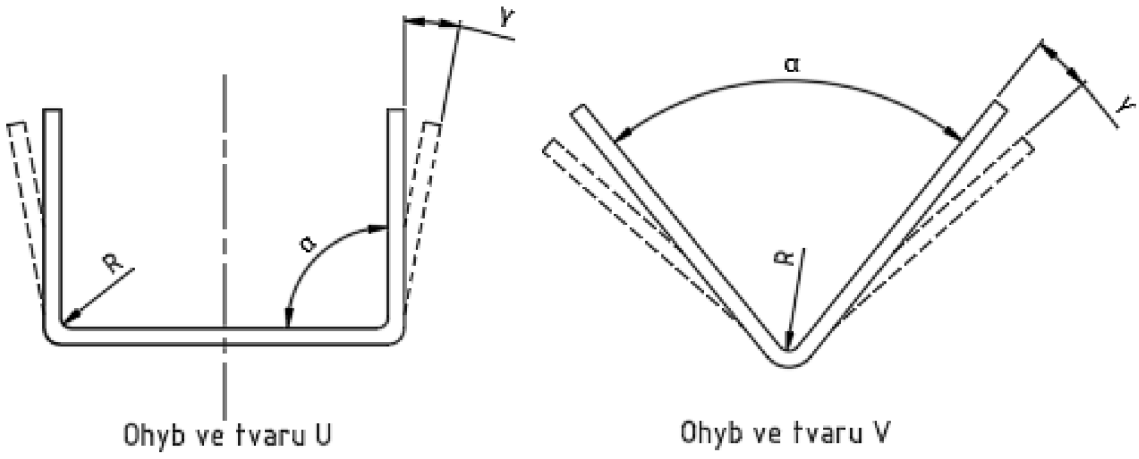
Obr. 1 Poloha neutrální osy [4]

Tab. 1 Míra posunutí neutrální osy v závislosti R/t [4]

R/t	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1	1,5	2	3	4	5
x	0,23	0,29	0,32	0,35	0,37	0,38	0,39	0,40	0,41	0,44	0,45	0,46	0,47	0,5

Odpružení

Po uvolnění sil, které působily na deformované těleso, se rozměry tělesa částečně vrátí do původních, vzniká tzv. odpružení Obr. 2. Má formu úhlové odchylky γ a její význam roste s délkou ramen. Za zpětné odpružení součásti může pružná deformace materiálu, která vzniká kolem neutrální osy [3].



Obr. 2 Úhlová odchylka odpružení

Kde α … úhel ohybu [°]

γ … úhel odpružení [°]

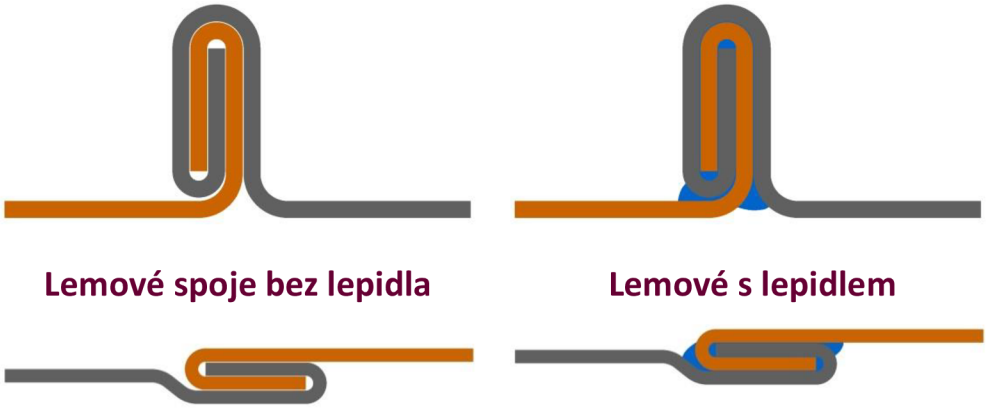
Odpružení se dá zabránit pomocí kalibrace, tj. v dolní úvrati zdvihu se zvětší přítlačná síla lisu. Vzniká plastická deformace v místě ohybu a odpružení se sníží nebo zcela zmizí. Další možností, jak pracovat s úhlovou odchylkou, je zvětšit ohyb o hodnotu odpružení, která se určí z empirických vztahů nebo z tabulek [3].

Ohraňování plechů

Ohraňováním se provádí ohýbání plechu do různých úhlů. Může se vykonávat ručně nebo na ohraňovacích lisech. Rozlišuje se volné ohraňování plechů, kde poloměr ohybu závisí na hloubce průniku ohybníku do ohybnice (není dosaženo dolní úvrati) a ohyb nekopíruje geometrii nástroje. Při tomto způsobu nedochází ke kalibraci a každá menší změna polohy mezi ohybníkem a ohybnicí vytváří jiné úhly ohybu. Naopak u klasického ohraňování plechů je dán úhel ohybu geometrií nástroje. Zdvih lisu je až do dolní úvrati, kde dochází ke kalibraci plechu a vzniká tak daleko menší odpružení. Tato metoda se často využívá při tváření pásů plechu do tvaru profilů. Využívají se různé kombinace ohybů ve tvaru geometrie U a V [4].

Lemování

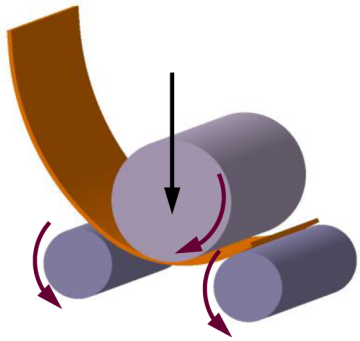
Při lemování vzniká výrazná plastická deformace, protože materiál je ohýbán o 180° (viz Obr. 3). Rádius ohybu je takřka polovina tloušťky materiálu. Je proto nutné lemovat jenom materiály s velkou deformační schopností a nízkou tloušťkou. Pevnost spoje lze zvýšit pomocí lepidla nebo tmele, zvýší se tak i odolnost vůči korozi. Tento druh ohýbání je využíván při spojování tenkých plechů nebo pro jejich vyztužení v krajích [4].



Obr. 3 Lemované spoje [4]

Zakružování

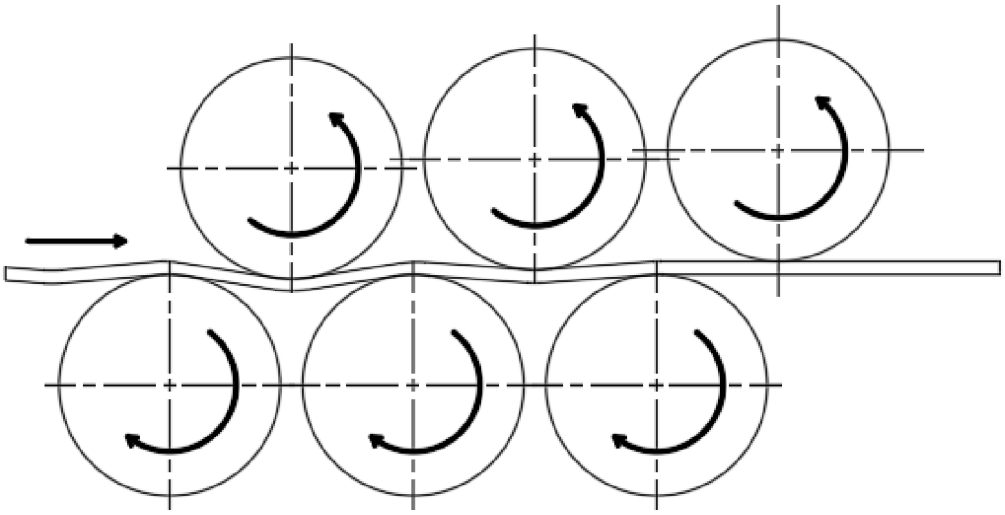
Materiál je deformovaný na principu volného ohybu Obr. 4. Při zakružování profilů může nastat zborcení profilu, proto je potřeba fixovat průřez. Proces se provádí na ručních nebo strojních zakružovacích strojích s různým provedením. Tenké plechy jsou zakružovány za studena a tlusté plechy ($t \geq 40$ mm) se zakružují za tepla i za studena. Výsledkem tohoto druhu tváření jsou výrobky, které jsou v příčných řezech kruhového tvaru s velkým poloměrem [4].



Obr. 4 Zakružování [4]

Rovnání plechů

Rovnání se provádí pro plechy skladované ve svitcích nebo pro součásti deformované dřívější manipulací či předchozím zpracováním. Pokud je materiál zkřiven v celé délce rovnoměrně, rovná se v jedné rovině pomocí lisu jednoduchým ohybem. Je-li deformace nepravidelná, materiál se nejdříve zkřiví v obou směrech v celém rozsahu více, než činí jeho náhodné nerovnosti, a až poté se provádí rovnání. Technologie rovnání pomocí válců je zobrazena na Obr. 5[5].

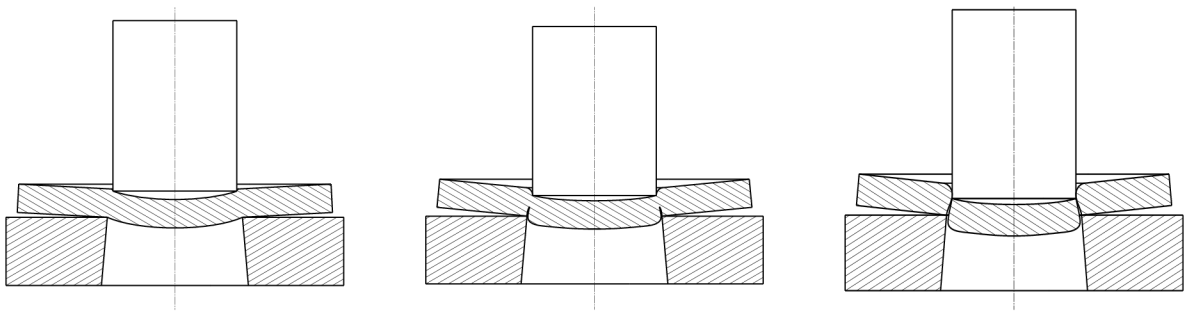


Obr. 5 Technologie rovnání pomocí válců

2.1.2 Stříhání

Při stříhání dochází k oddělování části materiálu pomocí dvou protilehlých střižných hran, což má za důsledek vznik smykového napětí v řezné rovině. Tento proces se dá rozdělit do tří fází, viz Obr. 6. V první fázi se materiál vtlačuje do střižnice. Polotovar se stlačuje a ohýbá, vznikají tak pružné deformace. Po zvětšení střižné síly následuje druhá fáze, ve které nastávají plastické deformace. Napětí roste, převyšuje mez kluzu a na hranách obrobku se blíží k mezi pevnosti. Ve třetí fázi začínají vznikat trhlinky na obvodu budoucího výstřižku. Ty se rozšiřují, až dojde k ustřižení materiálu [3].

Ze všech tvářecích procesů je stříhání jediné, při němž je nutné porušení soudržnosti materiálu. Proto je důležité při všech výpočtech pracovat s mezí pevnosti místo meze kluzu [3].



1.fáze 2.fáze 3.fáze

Obr. 6 Fáze při stříhání [6]

Stříhání patří mezi nejrozšířenější operace plošného tváření, protože má hned několik typů technologii. Rozdělení podle charakteru technologie je na konvenční a nekonvenční dělení. U konvenčního dělení se rozeznávají technologie vystřihování, děrování, ostřihování, přistřihování a další. Pro nekonvenční metody to jsou technologie dělení materiálu pomocí laserového, plasmového, vodního paprsku a stříhání pryží. Další dělení se rozlišuje podle teploty, a to stříhání za studena a za tepla [6].

Stříhání rovnoběžnými noži

U stříhání rovnoběžnými noži se používají jako střižné nástroje střižník a střižnice, mezi kterými musí být střižná vůle. Bez ní by hrozilo nebezpečí havárie. Optimální střižná vůle bývá od 3 do 10 % tloušťky plechu [3].

Například se zde využívají technologie děrování a vystřihování. U děrování je odpad to, co propadne střižnicí, zbytek materiálu je výrobek. Při vystřihování je tomu naopak, část materiálu, která propadne střižnicí, se nazývá výrobek a zbytek zůstává jako odpad (viz Obr. 7).

Velikost střižné síly

$$F_S = (1{,}2 \div 1{,}25) \times l_s \times s_0 \times (1 - \frac{t}{s_0}) \times R_m \quad (2)$$

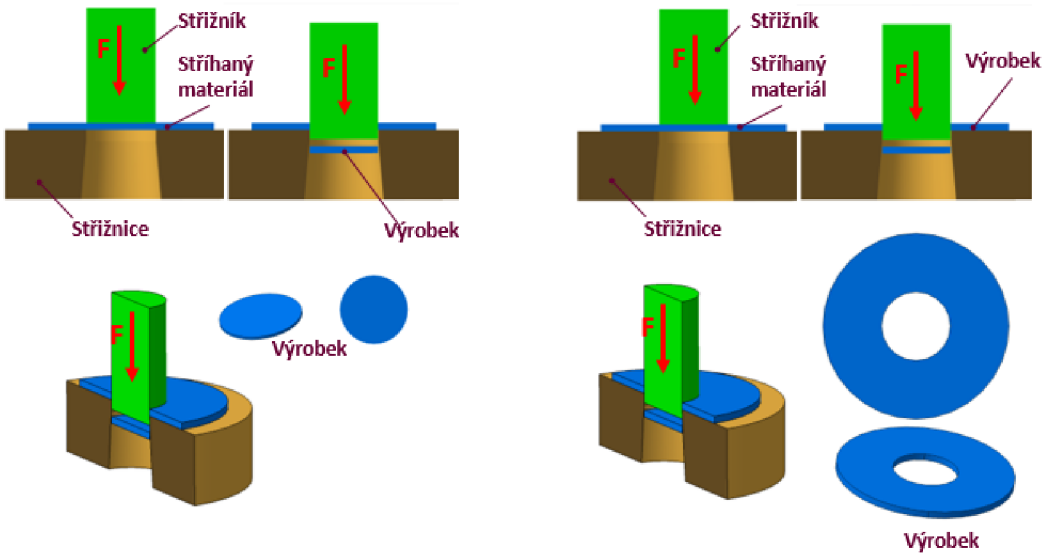
Kde F_S … velikost střižné síly [N]

l_s … délka střihu [mm]

s_0 … počáteční tloušťka stříhaného materiálu [mm]

t … hloubka průniku střižníku do materiálu při vzniku trhliny [mm]

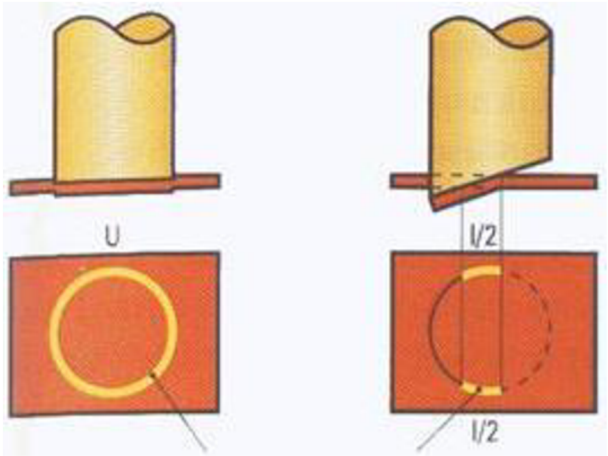
R_m … mez pevnosti v tahu stříhaného materiálu [MPa]



Obr. 7 Technologie stříhání (vlevo) a děrování (vpravo)[6]

Stříhání šikmými noži

Stříhání pomocí šikmých nožů má za účel snížit potřebnou střižnou sílu na zhotovení výstřižku, ale velikost celkové práce se nemění. Střižná síla se vypočítá podle rovnice (2). Nože totiž svírají určitý úhel s polotovarem, a tím zapříčiňují, že se materiál stříhá postupně Obr. 8. Síla požadovaná od lisu tedy není tak vysoká jako u stříhání s rovnoběžnými noži. Délka střihu je totiž v daný okamžik menší než u stříhání s rovnoběžnými noži, kde se stříhá celý obvod naráz [3].



Obr. 8 Porovnání délky střihu s rovnými noži(vlevo) a šikmými noži(vpravo)[3]

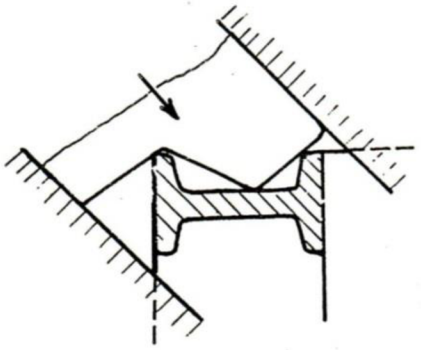
Stříhání kruhovými noži

Střižným nástrojem jsou zde kotoučové nebo kruhové odvalující se nože, jejichž činnost má za následek prodloužení času střihu, ale snížení rázů při stříhání. Využití je pro podélné stříhání dlouhých pásů (viz. Obr. 9)[3].

Obr. 9 Dělení svitků na pásy plechu [6]

Stříhání profilů, tyčí a trubek

Při tomto tváření je nutné, aby přestřihovaná tloušťka polotovaru byla téměř stejná v každém okamžiku. Pro dodržení tohoto pravidla se upravuje obrys pohyblivého nože. Pro lepší průběh střižné síly se volí šikmý posuv pohyblivé části nástroje (Obr. 10) [3].



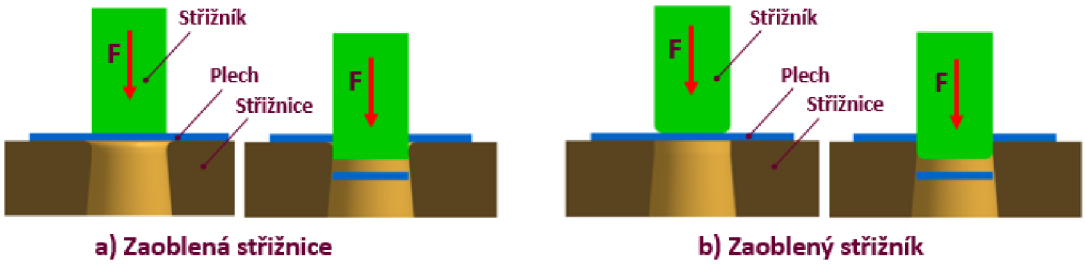
Obr. 10 Stříhání profilu I pomocí šikmého posuvu [6]

Přesné stříhání

Tato metoda se využívá pro dobrou jakost střižné plochy kolmé k rovině plechu. Přesnost střižných rozměrů je daleko lepší než u klasického stříhání. Materiály využívané pro tento druh stříhání by měly mít minimální mez kluzu, nízký obsah příměsí a dobrou tvárnost za studena (např. nízkolegované oceli) [7].

Stříhání bez vůle

Střižník nebo střižnice je vyrobena bez ostré hrany se zaoblením, viz Obr. 11. Druhá část je nabroušena. Střižná mezera je rovna nule [6].

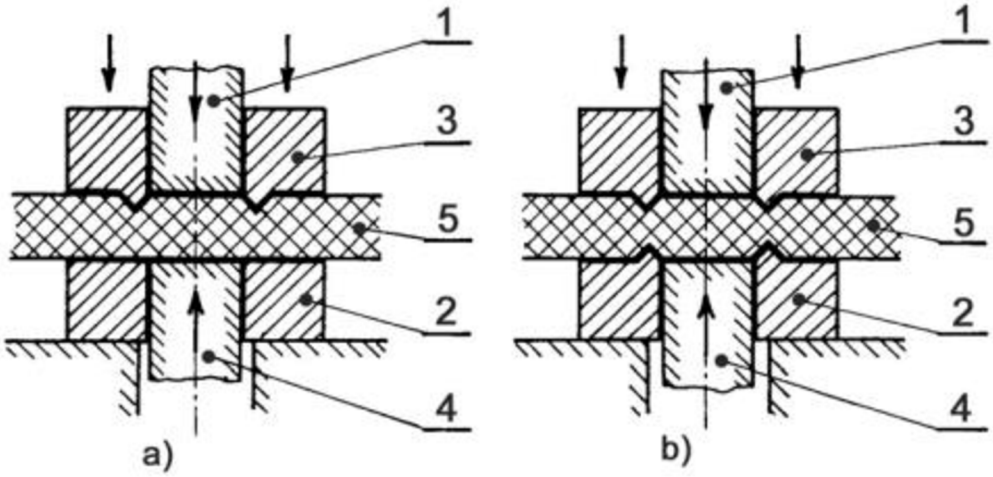


Obr. 11 Speciální způsoby stříhání [6]

Zaoblená střižnice se používá pro kvalitní povrch díry. Zaoblený střižník se využívá pro kvalitní výstřižek [3].

Stříhání s nátlačnou hranou

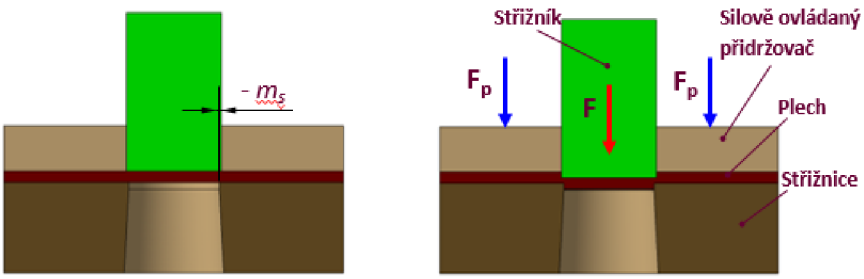
Před samotnou operací stříhání se do materiálu nalisuje nátlačná hrana Obr. 12, díky které vznikne v polotovaru víceosá napjatost. To má za důsledek rozšíření pásma plastického střihu na celou tloušťku materiálu. Pro tlusté materiály (větší než 5 mm) se používají nátlačné hrany po celém obvodu z obou stran [7].



Obr. 12 Stříhání s nátlačnou hranou [7]
a) – nátlačná hrana na přidržovači; b) – nátlačná hrana na přidržovači i na střižnici; 1– střižník; 2 – střižnice; 3 – tlačná deska (přidržovač); 4 – vyhazovač; 5 – stříhaný materál

Stříhání se zápornou střižnou mezerou

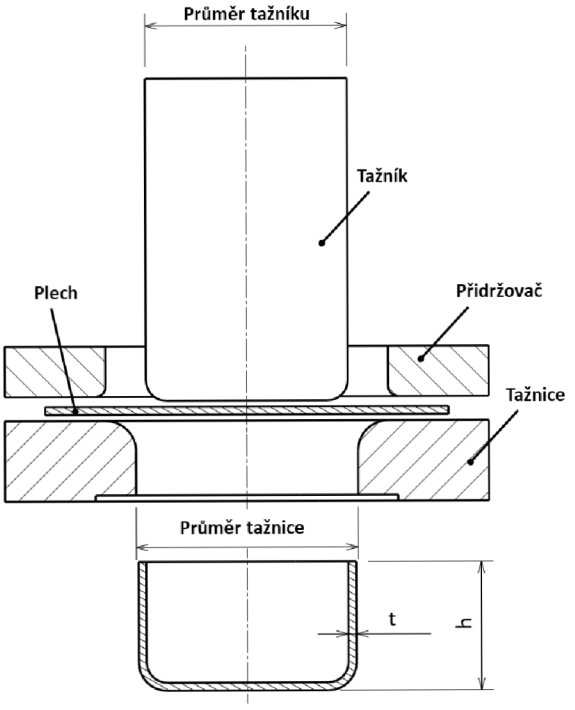
Průměr střižníku je větší než vnitřní průměr střižnice (o 0,1 až 0,2 % tloušťky plechu), takže do otvoru nepronikne, viz Obr. 13. Musí zůstat nad rovinou střižnice, aby nedošlo k poškození nástrojů. Tlakové napětí vyvolané tímto pohybem způsobí porušení materiálu [6].



Obr. 13 Stříhání se zápornou střižnou mezerou [6]

2.1.3 Tažení

Pomocí tažení plechů je zhotoven prostorový výlisek nerozvinutelného tvaru. Tento technologický postup tváření se skládá z jednoho nebo několika výrobních tahů, při kterém z rovného plechu vzniká dutá nádoba. Jako nástroj se používá tažidlo, které je tvořeno z tažnice, tažníku a dalších konstrukčních částí (např. přidržovač). Schéma nástroje je na Obr. 14. Tomuto procesu se také jinak říká hluboké tažení a výrobkem je výtažek [2].



Obr. 14 Schéma tažení [8]

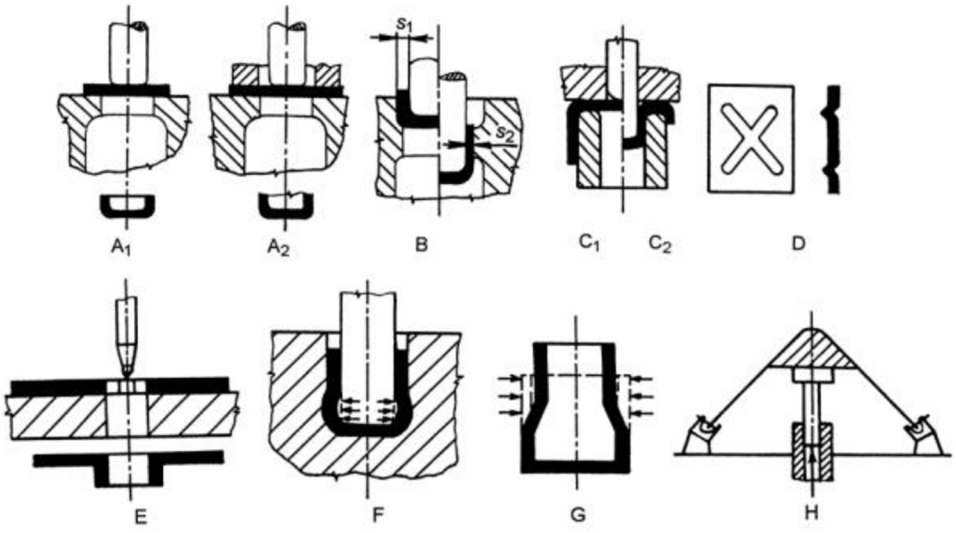
Rozdělení technologii tažení

Podle tvaru výtažku:

- Rotační
- Nerotační
- Nepravidelné (karosářské)

Podle použité metody:

- Mělké
- Hluboké
- S přidržovačem
- Bez přidržovače
- Se ztenčením stěny
- Bez ztenčení stěny
- Zužováním
- Rozšiřováním
- Protahování
- Přetahováním
- Zpětné tažení
- Žlábkování

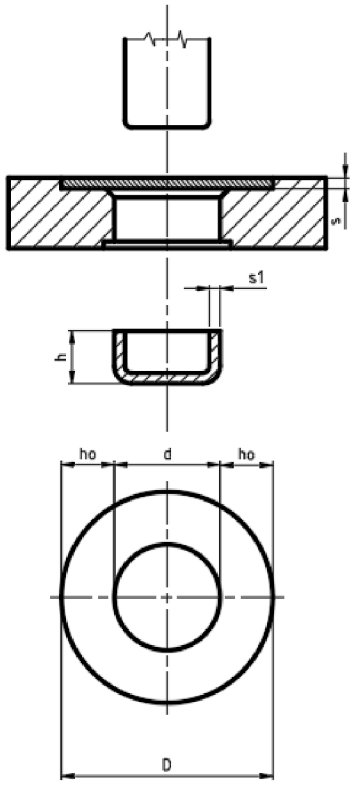
1. 

Obr. 15 Metody tažení[7]

A_1 – tažení prosté bez přidržovače; A_2 - tažení prosté s přidržovačem; B – tažení se ztenčením stěny; C_1 a C_2 - zpětné tažení; D – žlábkování; E – protahování; F – rozšiřování; G – zužování; H – přetahování

Princip tažení

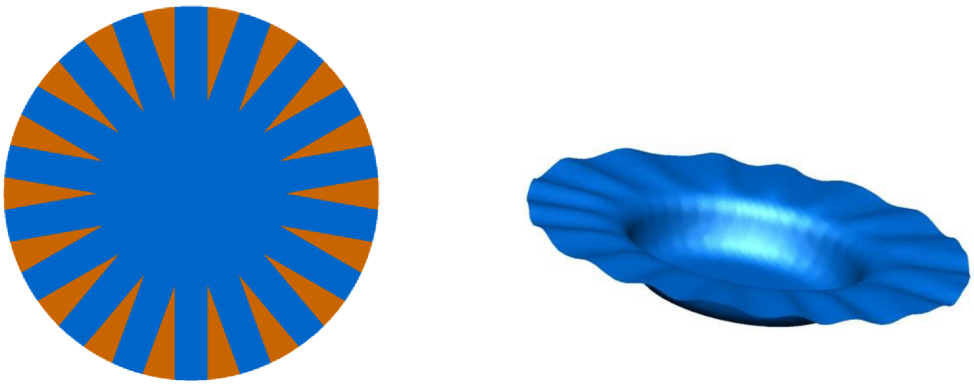
Lis zatlačuje tažník do tažnice, což je zobrazeno na Obr. 16, plech se posouvá přes tažnou hranu, která se kvůli tomu rychle opotřebovává, proto bývá vyvložkována a díky tomu je snadno vyměnitelná. Z podmínky pevnosti válcové části nádoby, která se během tažení nesmí porušit, vyplývá síla potřebná k tažení. Do těchto výpočtů je třeba zahrnout tření i zpevnění materiálu během tváření [2]. *„Při tažení se mezikruží přístřihu (D - d) změní na válec s průměrem d a výškou h z dřívějšího rozměru přístřihu D. V důsledku platnosti zákona stálosti objemu se objem kovu během procesu nemění, a proto výška h bude větší, než šířka mezikruží D – d.“*[2]



Obr. 16 Princip tažení válcového tvaru

Vznik vln

U technologie tažení dochází k přesunu velkého množství materiálu. Ten se během tažení vytlačuje, zvyšuje výšku nádoby a mění sílu stěny. Když je materiál vtlačován do tažnice, má tendenci se v místě příruby začít vlnit kvůli přebývajícímu objemu, ten je zobrazen na Obr. 17 oranžově. K této situaci dochází především u vysokého stupně deformace. Při větší tloušťce plechu a menších stupních deformací se vlny netvoří. Hlavním způsobem, jak zabránit tvorbě vln, je použití přidržovače. Jeho použití však způsobuje pěchování materiálu a růst tloušťky. S použitím přidržovače je potřeba znát velikost měrného tlaku *p* přidržovače [3].



Obr. 17 Zvlnění výlisku [8]

Výpočet síly a práce

Vztahy pro výpočet síly by byly příliš složité, proto se provádí zjednodušení. Vzorce, které se používají, vycházejí z podmínky, že dovolené napětí v nebezpečném průřezu musí být menší než napětí na mezi pevnosti. Maximální tažná síla musí být o trochu menší než síla, která by měla za následek utržení dna od bočních stěn [2].

Výpočet tažné síly pro rotační tvar bez použití přidržovače:

$$F = S \times R_m \text{ [N]} \tag{3}$$

Kde S … plocha materiálu ($S=\pi \times d \times s$) [mm^2]

R_m … mez pevnosti materiálu [MPa]

d …průměr tažníku [mm]

s … tloušťka plechu [mm]

Výpočet tažné síly při použití přidržovače:

$$F_c = F_t + F_p = L \times s \times R_m + S_p \times p \text{ [N]} \tag{4}$$

Kde L … délka obvodu polovýrobku [mm],

S_p … plocha přidržovače [mm^2]

p … specifický tlak přidržovače (od 0,8 do 3 MPa) [MPa].

Výpočet práce

$$A = C \times F_C \times h \text{ [J]} \tag{5}$$

Kde Fc … maximální velikost tažné síly [N]

C …součinitel zaplnění diagramu [-]

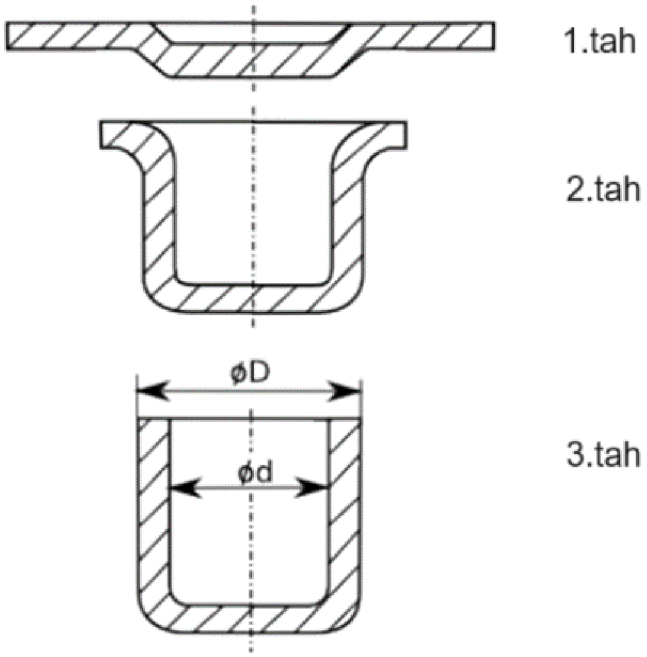
C=0,66 při tažení bez kalibrování[-]

C=0,8 při tažení s kalibrací[-]

h …výška výtažku [mm]

Určování rozměrů přístřihu, počet tahů

Kvůli velkému celkovému přetvoření se celá nádobka většinou nevytahuje na jeden zdvih. První tah je mělký s velkým průměrem. Před dalším tahem se provádí výměna nástrojů na menší průměr a větší výšku (viz. Obr. 18). Je nutné hlídat plastičnost materiálu, aby nedošlo k přetržení výtažku. Jinak se musí zařadit mezioperační žíhání [2].



Obr. 18 Tažení výlisku na 3 tahy

Pro určení počtu tažných operací a maximální deformace se používá součinitel tažení, který se vypočte pro první tah dle rovnice (6).

$$m = \frac{d}{D} = \frac{1}{K} \tag{6}$$

Kde m… součinitel tažení [-]

d… průměr výtažku [mm]

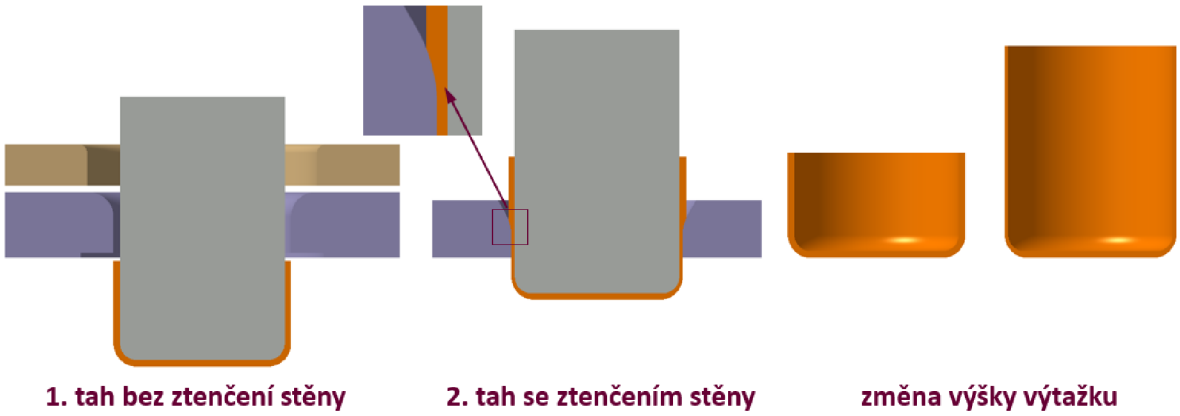
D… průměr přístřihu [mm]

K… stupeň tažení [-]

Součinitel tažení pro další tahy vychází ze stejného vzorce. Celkový součinitel tažení je roven součinu dílčích součinitelů. Pro válcové nádoby se součinitelé tažení nacházejí v tabulkách. Pokud se jedná o jiný tvar, určujeme součinitel tažení z místa, kde zakřivené stěny a poměrná hloubka dosahují nejvyšších hodnot. Všeobecně je potřeba brát v potaz typ materiálu, předchozí zpevnění, poměrnou tloušťku, tažné rychlosti, mazání, tvar výtažku a hlavně geometrii nástroje [2].

Tažení se ztenčením stěny

Tato technologie se používá pro zvětšení výšky výtažku. Pro první tah se však ztenčení stěny nepoužívá, proto se tloušťka dna takřka nemění. U dalších tahů se redukuje tloušťka stěny pomocí záporné tažné mezery, což je zobrazeno na Obr. 19. Při ztenčování tloušťky stěny je vždy nutné brát v potaz nebezpečí utržení výtažku a velikost tažní síly [8].



Obr. 19 Tažení se ztenčením stěny [8]

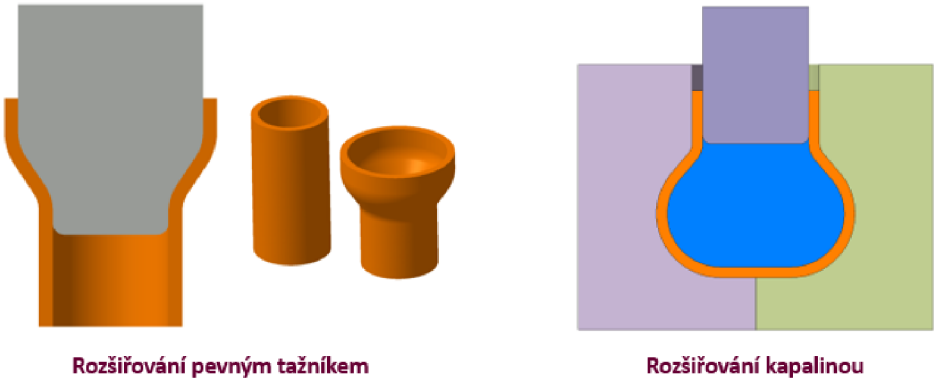
Zužování

Z názvu by se mohlo zdát, že tato technologie je podobná té předešlé. Avšak zde nedochází k zeslabení tloušťky stěny, nýbrž k redukování průměru otevřeného konce, viz Obr. 20. Provádí se v jedné nebo více operacích, ale průměr u dna je zachován. Díky zužování se materiál zpevňuje, ale tvárnost klesá. Někdy je tedy nutné zařadit mezioperační žíhání. Když tažný úhel α překročí hodnotu 45°, hrozí zborcení horní části výtažku [8].

Obr. 20 Zužování [8]

Rozšiřování

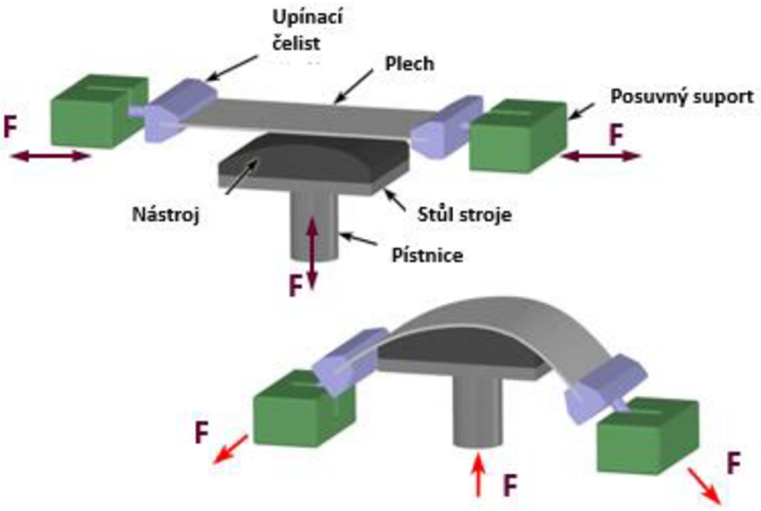
Opakem k minulé technologii je rozšiřování, jímž lze docílit zvětšení části výtažku, který vznikl pomocí klasického tažení. Na Obr. 21 je znázorněno rozšiřování pomocí pevného tažníku a pomocí kapaliny. Průměr výtažku u tvárných kovů se může zvětšit až o 30 % na jeden tah. Při nutnosti většího přetvoření se užívá více operací a mezioperační žíhání [8].



Obr. 21 Rozšiřování [8]

Přetahování (vypínání)

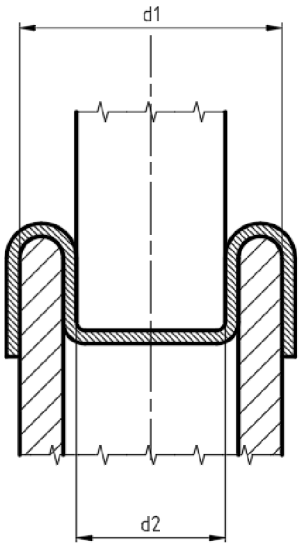
U tváření panelových výtažků je prostou technologií tažení nedostatečně zpevněn materiál, takže dochází k velkému odpružení a polotovar nedrží požadovaný tvar. Proto se plech vypne pomocí dvou čelistí, které v materiálu vytvoří tahové napětí ještě před samotným tažením (viz Obr. 22). Tažník potom působí na polotovar, kde už nějaké napětí je a snadněji vznikají plastické deformace. Výtažek po uvolnění odpovídá tvaru tažníku a má minimální odpružení [8].



Obr. 22 Vypínání plechu [8]

Zpětné tažení

Polotovar je tažen ve dvou opačných směrech Obr. 23, díky čemuž vznikají dvojnásobné deformace, které dodávají materiálu vysoké zpevnění. Použitím tohoto druhu tváření odpadá nutnost použití přidržovače a je možno využít zvýšenou tažnou sílu. Tato technologie se využívá pro výrobu kulovitých a elipsovitých tvarů [3, 8].



Obr. 23 Zpětné tažení

Brzdící lišty

Při tažení se využívají za účelem vytvoření vhodného stavu napjatosti potřebného stupně deformace a zajištění optimálních podmínek tváření. Není vhodné je využívat při tváření hlubokých výtažků. Naopak se hodí pro velkorozměrné, nepravidelné, mělké a tvarově složité výtažky.

Výhody použití brzdících lišt:

- Pro mělké a nepravidelné výtažky je zajištěn potřebný stav napjatosti a maximální využití plasticity plechu.
- Díky různým tvarům, uspořádání a počtu brzdicích lišt lze dosáhnout širokého rozsahu intenzity brzdění.

Nevýhody použití brzdicích lišt:

- Dochází ke změně mechanických a strukturních vlastností materiálu, konkrétně k zpevňování, to má za důsledek trhání výlisku v okolí tažné hrany.
- Nevhodné využití může mít za následek horší tvar a rozměrovou přesnost výlisku [9].

2.2 Materiály používané pro hluboké tažení

Vývoj vakuového zpracování a kontrola tvaru vměstků byly obzvláště prospěšné pro zvýšení tažnosti oceli. Další kovové materiály, které mohou být hluboce taženy: hliník, slitiny hliníku, měď, slitiny mědi, nerezové oceli a titan.

2.2.1 Nízkouhlíkové oceli

Nejběžnější nízkouhlíkové oceli pro hluboké tažení 1006 a 1008 se často využívají v automobilovém průmyslu. Mají typické meze kluzu 170÷240 MPa a tažnost 35÷45%. Plechy z těchto ocelí jsou dostupné v několika úrovních kvality a v širokém rozsahu tlouštěk. Další oceli využívané pro hluboké tažení jsou 1010 a 1012. Tyto materiály jsou o něco pevnější než předešlé, ale mají horší tvárnost.

Tab. 2 Mechanické vlastnosti nízkouhlíkových ocelí [10]

Úroveň kvality	Pevnost v tahu [MPa]	Mez kluzu [MPa]	Tažnost v 50 mm [%]	Tvrdost [HRB]
Válcované za tepla				
Komerční kvalita	358	234	35	58
Tažná kvalita	345	220	39	52
Válcované za studena				
Komerční kvalita	331	234	36	50
Tažná kvalita	317	207	40	42

Velikost zrna má vliv na tažnost materiálu. Čím větší zrna, tím se zvětšuje drsnost povrchu a snižuje tažnost. Povrchové úpravy mají také vliv na tažnost materiálu. Tažné ocele se většinou dodávají matné s pórovitým povrchem, aby zadržovali mazivo, a tím se zlepšovala tažnost [10].

2.2.2 Hliník a jeho slitiny

Hliník je méně tvárný než ocel a má menší tvarovou stálost, menší pevnost v tahu a při jeho tažení jsou použity nižší rychlosti. Slitiny 1100, 3003 a 5005 jsou vhodné pro tažení na více tahů bez nutnosti mezioperačního žíhání. Je však nutné je správně mazat. U slitin 2014,2024 je nutné mezioperačního žíhání (lokálního nebo úplného) už po 3. tahu [10, 11].

Tab. 3 Mechanické vlastnosti slitiny 3003 během jednotlivých tahů [10]

Počet tahů	Pevnost v tahu [MPa]	Mez kluzu [MPa]	Tažnost v 50mm [%]
0	110	41	30
1	131	117	11
2	152	145	9
3	162	152	8
4	169	155	8

2.2.3 Slitiny mědi

Slitiny mědi mají nejvyšší hodnoty hloubky tažení na jeden tah, a to konkrétně slitina C52100. Po ní následují mosazi, kde záleží na příměsi zinku. Čím méně zinku obsahuje tím nižší hodnoty. Mosazi s vyšším obsahem zinku, jako jsou slitiny C24000, C26000 a C26200, mají pevnost srovnatelnou s nízkouhlíkovou ocelí. Jsou to vynikající materiály pro hluboké tažení.

Fosforový bronz A (slitina C51000) má také vynikající kombinaci vysoké pevnosti a tažnosti. Používá se k výrobě hlubokotažených tenkostěnných skořepin, které jsou pak žíhány, přičemž získají vysokou únavovou pevnost, vynikající pružnost a jsou odolné proti korozi.

Slitiny Cu, Ni a Zn (Nikl stříbra) jsou svými vlastnostmi podobné mosazím s příměsí zinku, ale mají poněkud vyšší rychlost zpevňování. Proto vyžadují častější mezioperační žíhání.

Vysokých pevností v tahu 1275÷1380 MPa se dosahuje tepelným zpracováním slitiny mědi a beryllia [10].

2.2.4 Nerezové oceli

Tyto oceli mají vysokou rychlost mechanického zpevňování proto je nutné časté mezioperační žíhání pro dosažení hlubokotažných tvarů. U feritických kovů se tažnost obvykle snižuje s rostoucím obsahem chrómu. Pro zlepšení jejich tažnosti se plech před tažením mírně zahřeje. Jejich nejlepší tažnost je 40÷55 % [10, 11].

2.3 Zkoušky mechanických vlastností

Materiály jsou v technické praxi namáhány na tah, tlak, krut, střih a ohyb. Tato namáhání ve většině případu nepůsobí samostatně, ale v různé kombinaci. Když na materiál působí víc druhů namáhání, jedná se o namáhání složené. Materiál tedy musí odolat těmto namáháním pomocí jeho vlastností, jako jsou pevnost, tvrdost, pružnost, tvárnost aj. Tyto vlastnosti jsou také závislé na teplotě, během které k namáhání dochází.

2.3.1 Přehled mechanických zkoušek

Z hlediska působící síly na zkušební těleso se mechanické zkoušky rozdělují na zkoušky statické a zkoušky dynamické, rázové a cyklické.

Všechny tyto zkoušky jsou normalizované, aby se při zkoušení téhož materiálu nemohlo dosáhnout rozdílných výsledků. Normalizované jsou i rozměry a tvary zkušebních těles. Kromě zkoušek tvrdosti jsou ostatní zmíněné zkoušky destruktivní. To znamená, že všechny vzorky jsou po testování trvale porušeny [12].

2.3.2 Statické mechanické zkoušky

U statických zkoušek se zatěžující síla mění jenom pozvolna a obvykle trvají v řádu minut, ale u dlouhodobých zkoušek to mohou být hodiny, dny i roky. Mezi tyto zkoušky se řadí zkoušky pevnosti a tvrdosti.

Zkoušky pevnosti

Zkouškami pevnosti se zjišťuje pevnost materiálu při určitém druhu namáhání. Nejčastěji to bývají zkoušky v tahu a tlaku. Hodnoty z nich zjištěné se používají pro pevnostní výpočty namáhaných součástí i jinými druhy namáhání. Další zkoušky jsou ohybem, krutem a střihem. Ty jsou však používány méně.

Statická zkouška tahem

Jedná se o nejrozšířenější statickou zkoušku pevnosti, která se vykonává dle normy ČSN EN ISO 6892-1. Provádí se u většiny technických materiálů, protože hodnoty z ní získané se používají pro konstrukční výpočty návrhu součástí. Je to pevnost v tahu, poměrné prodloužení, tažnost a kontrakce. Zkouška se neprovádí na vyrobených součástech, nýbrž na zkušebních tyčích [12].

Při volbě tvaru a rozměru zkušebních tyčí může být brán v potaz tvar a rozměr výrobku, u kterého chceme testovat mechanické vlastnosti. Průřezy vzorků tedy mohou mít kruhový, čtvercový, obdélníkový a ve zvláštních případech jiný tvar. Počáteční měřená délka L_0 s počáteční průřezovou plochou zkoušené délky S_0, by měly být spjaty rovnicí (7).Mezinárodně uznávaná hodnota pro k je 5,65 nebo 11,3 [13].

$$L_0 = k\sqrt{S_0} \tag{7}$$

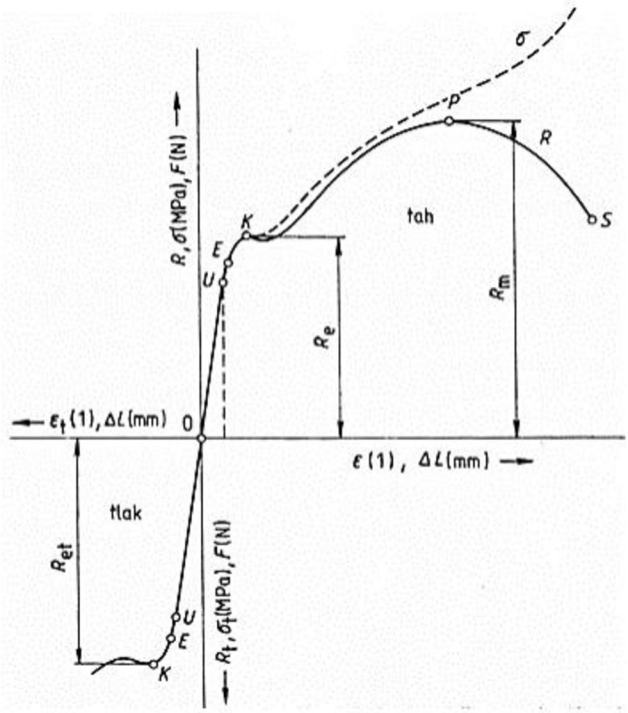
Kde L_0 … počáteční měřená délka [mm]

k … součinitel proporcionality [-]

S_0 … počáteční průřezová plocha zkoušené délky [mm^2]

Zkušební těleso se uchytí do čelistí univerzálního trhacího stroje a na vzorek se nasadí průtahoměr. Během zkoušky stroj ukládá závislost působící síly F na prodloužení zkušební tyčky, které snímá průtahoměr.

Díky platnosti Hookova zákona je prodloužení až do U (meze kluzu) přímo úměrné vzrůstajícímu zatížení. Při překročení meze kluzu přestává být prodloužení přímo úměrné zatížení, ale až do bodu E je deformace pružná, tzn., že při případném odlehčení by se zkušební těleso vrátilo do své počáteční délky. Po překročení meze pružnosti se zkušební tyč začíná plasticky přetvářet. Když napětí dosáhne bodu K, definuje se jako mez kluzu v tahu R_e. Při tomto napětí se tyč začne výrazně deformovat a dochází k poklesu zatěžující síly [12, 14].



Obr. 24 Diagram tahové a tlakové zkoušky [12]

Některé materiály nevykazují výraznou mez kluzu, proto se u nich zavádí smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$. Což je napětí, u kterého plastická deformace zkušebního vzorku dosáhne předem určené hodnoty vyjádřené v % počáteční měřené délky [12].

$$R_p 0{,}2 = \frac{F_p 0{,}2}{S_0} \tag{8}$$

Při následném zatěžování se tyč prodlužuje daleko rychleji, než jak roste zatížení. Bodem P na grafu se vyznačuje smluvní mez pevnosti v tahu R_m, tj. maximální napětí, které materiál vydrží. V bodě S dochází k přetržení zkušebního vzorku.

Ve skutečnosti se průřez zkušební tyče během zkoušky zmenšuje. Napětí by mělo tedy průběh takový, jako je vyznačený čárkovanou čarou na obr. 24, protože vychází z rovnice (9)[12].

$$\sigma = \frac{F}{S} \tag{9}$$

Kde S … okamžitý průřez [mm^2]

Poměrné prodloužení

$$\Delta L = L_u - L_0 \tag{10}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \tag{11}$$

Kde ΔL … celkové prodloužení [mm]

L_u … konečná měřená délka po lomu [mm]

L_0 … počáteční měřená délka [mm]

Tažnost

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100 \tag{12}$$

Kde A … tažnost v procentech [%]

Kontrakce

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100 \tag{13}$$

Kde S_0 … počáteční průřezová plocha zkoušené délky [mm^2]

S_u … minimální průřezová plocha po lomu [mm^2]

Z … kontrakce v procentech [%]

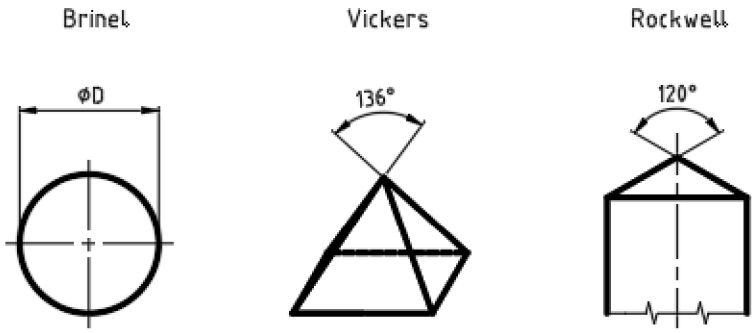
Zkoušky tvrdosti

Tvrdost má především u kovových materiálů zásadní využití, a to z důvodu, že ji lze z materiálu zjistit nejrychleji a nejlevněji. Rozlišují se různé zkoušky tvrdosti, a to vrypové, vnikací a odrazové.

Vrypová zkouška podle Martense se vykonává pomocí přitlačování diamantového kuželového hrotu na leštěný povrch testovaného předmětu tak, aby vznikl v materiálu vryp o šířce 0,01 mm. Síla potřebná ke vzniku tohoto vrypu je pak mírou tvrdosti zkoušeného materiálu [12].

Mezi zkoušky vnikací se řadí zkouška tvrdosti podle Brinella, Rockwella a Vickerse. Všechny tyto zkoušky spočívají ve vtlačování indentoru Obr. 25 (vnikacího tělíska) předem stanovenou silou do povrchu zkušebního materiálu. Tvar indentoru a průběh zatěžující síly se

u každého typu zkoušky liší. Z poměru zatěžující síly a velikosti vtisku se poté určuje tvrdost materiálu [14].



Obr. 25 Tvary indentorů

Odrazová zkouška funguje na principu interakce (pružného odrazu) závaží od zkoušeného materiálu. Zařízení pro měření odskoku (tvrdosti) se nazývá Shoreův skleroskop [12].

2.3.3 Dynamické mechanické zkoušky

Při zkouškách dynamických rázových působí síla jenom v jeden okamžik a pak ustane [12].

Zkoušky rázem

Jsou založeny na principu kolik práce nebo energie je potřeba k porušení zkušebního vzorku. Zpravidla se používá jeden ráz, výjimečně se užívá několika rázu, kde se energie rázů musí sečíst. Pomocí rázu lze zkoušet pevnost v tahu, tlaku, ohybu a krutu [12].

Zkouška rázem v ohybu je nejrozšířenější z rázových zkoušek. Jako zkušební těleso je zde jednostranně vrubovaná tyč, která leží na dvou podporách. Testovacím nástrojem je rázové kyvadlové kladivo Obr. 26, které tyč přerazí. Z rozdílu výkyvů kyvadla se vypočte spotřebovaná nárazová práce na přeražení vzorku. Podíl takto vykonané práce s počátečním příčným průřezem v místě vrubu se nazývá vrubová houževnatost [12].

Obr. 26 Rázové kladivo [15]

Zkoušky únavy materiálu

U zkoušek dynamických cyklických (únavových) zatěžovací síla mění svojí velikost a směr v krátkých intervalech a to po dobu několika až několikaset cyklů za sebou. Vzniká zde velké vnitřní napětí, které způsobuje vznik mikroskopické trhliny, která se během dalších cyklů šíří a snižuje namáhaný průřez součásti. Když průřez nedokáže přenést dané napětí, součást se přelomí [14].

Zkoušky za zvýšených a snížených teplot

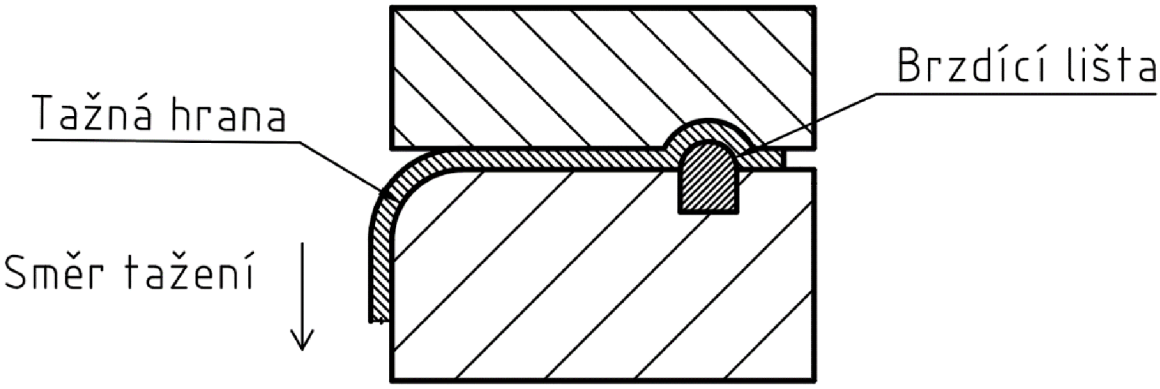
U součástí, které budou vystaveny extrémním podmínkám, se provádí zkoušky za vysokých a nízkých teplot. Nejčastější to bývá zkouška pevnosti v tahu, ale provádí se i zkoušky v tlaku, ohybu, krutu a i zkoušky tvrdosti. Zkušební stroje jsou podobné těm klasickým, ale je zde přidána pícka, která udržuje teplotu testovaného vzorku na požadované hodnotě [12].

3 Experimentální část

Cílem experimentální části bakalářské práce je stanovení změny mechanických vlastností materiálu při průchodu přes brzdící lištu a tažnou hranu nástroje. Brzdící lišty se využívají u složitých výlisků pro vytvoření vhodného stavu napjatosti a zajištění optimálních podmínek pro tváření. Nevýhodou tohoto technologického zásahu je změna mechanických vlastností, kdy materiál zpevňuje a ztrácí svou tažnost.

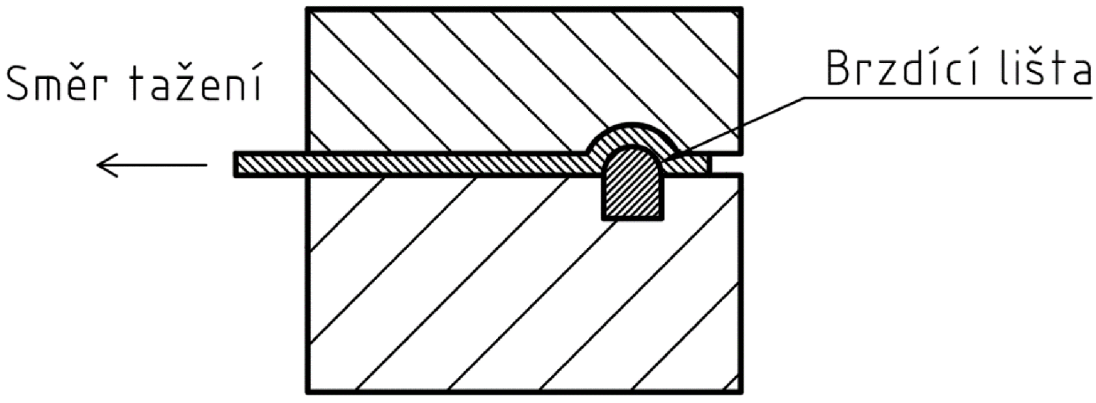
Vzorky plechu byly podrobeny několika variantám tažení simulujícím děje probíhající v tažném nástroji:

A. Tažení plechu přes brzdící lištu a tažnou hranu



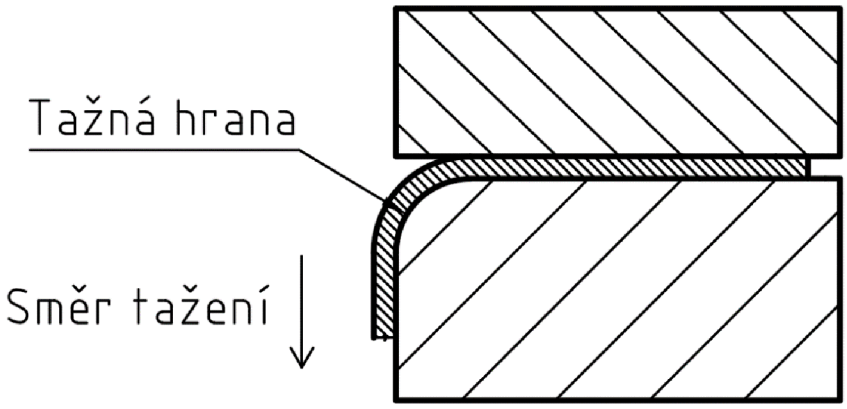
Obr. 27 Tažení varianta A

B. Tažení plechu přes brzdící lištu



Obr. 28 Tažení varianta B

C. Tažení plechu přes tažnou hranu



Obr. 29 Tažení varianta C

Po protažení vzorků plechu byla pomocí statické zkoušky tahem zjištěna změna mechanických vlastností oproti výchozímu stavu (nedeformovaném) materiálu. V rámci vyhodnocení pak byla určována procentuální změna mechanických vlastností taženého plechu oproti plechu, který nebyl nijak tvářen. Další částí bakalářské práce bylo provedení statistického vyhodnocení, kdy bylo zjišťováno, zda mají na změnu mechanických vlastností vliv zvolené technologické podmínky (přidržovací tlak a rychlost tažení).

2.4 Pracovní postup

2.4.1 Rozbor materiálu

Název použitého materiálu je DC05+ZE75/75 B P dle normy ČSN EN 10 152. Jedná se o plech z nelegované jakostní hlubokotažné oceli.

D - ploché ocelové výrobky k tváření za studena

C – válcováno za studena

05 – rozlišení jakosti ocele

+ZE75/75 elektrolyticky pozinkované, se jmenovitou tloušťkou povlaku 7,5 μm na každé straně

B – Lepší strana musí být bez vad, aby nebyl ovlivněn jednotný vzhled jakosti nátěru. Druhá strana musí splňovat druh povrchu A.

P – fosfátovaný povrch [16]

Tab. 4 Mechanické vlastnosti testovaného materiálu [16]

Mechanické vlastnosti	
Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	140-190
Mez pevnosti R_m [MPa]	270-330
Tažnost A_{80mm} [%] min.	39

Tab. 5 Chemické složení testovaného materiálu [16]

Chemické složení, Hmotnostní podíl v %, max.			
C	P	S	Mn
0,06	0,025	0,025	0,35

2.4.2 Měření mechanických vlastností základního materiálu

Na začátku experimentu bylo nutné změřit materiálové vlastnosti základního materiálu, který nebyl tvářen tažením ani jiným způsobem. Pomocí programu LabNet, byly vyhodnoceny základní mechanické vlastnosti jednotlivých vzorků (R_{p02}, R_m a A_{80mm}).

Tab. 6 Hodnoty mechanických vlastností pro základní materiál

Vzorek	$\boldsymbol{R_{p0,2}}$**[MPa]**	$\boldsymbol{R_m}$**[MPa]**	$\boldsymbol{A_{80mm}}$**[%]**
1	142,6	282,3	47
2	141,6	281,6	46
3	142,6	282,1	46,8
4	142,8	283,1	47,6
5	141,5	280,8	45,4
6	142,7	282,2	46,6
7	142,4	282	47,3
8	141,8	281,9	45,9
$\bar{x}$	142,2	282	46,6
σ	0,5	0,6	0,7

V následujících tabulkách se pro zjednodušení používají jenom střední hodnoty a směrodatné odchylky. Tyto hodnoty základního materiálu jsou v tabulkách umístěny vpravo pro snadné a rychlé porovnání s taženým materiálem.

2.4.3 Příprava vzorků

Tabule plechu byly nastříhány na tabulových nůžkách tak, aby pásy plechu byly rovnoběžné se směrem válcování. Tyto pásy byly rozděleny do skupin a označeny dle plánovaného druhu tažení.

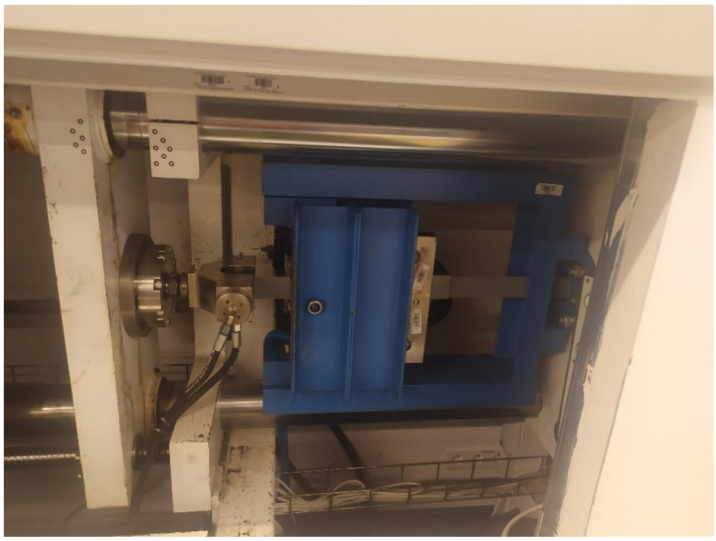
2.4.4 Zkouška protahování pásku

Tažení plechu se provádělo na stroji Sokol 400. Nejprve se prováděla varianta B, tažení plechu napřímo přes brzdící lištu (Obr. 30). Na vzorky bylo aplikováno mazivo Anticorit PL 3802-39LV v množství 1,5±0,1 g/m^2. Pás byl vložen do přípravku s brzdící lištou a na jeho konci upnut do čelistí zkušebního stroje. Rychlost posuvu byla 10 mm/s a přítlačný tlak přípravku s brzdící lištou 2 MPa. Poté byla provedena samotná zkouška. Následovalo postupné zvyšování tlaku na 4 a 6 MPa. Poté byla zvýšena tažná rychlost na 50 mm/s a znovu provedeny všechny varianty tlaků 2,4 a 6 MPa. Pro každou variantu bylo vždy provedeno tažení na 4 pásů plechu.

Tab. 7Přehled počtu vzorků pro jednotlivé varianty

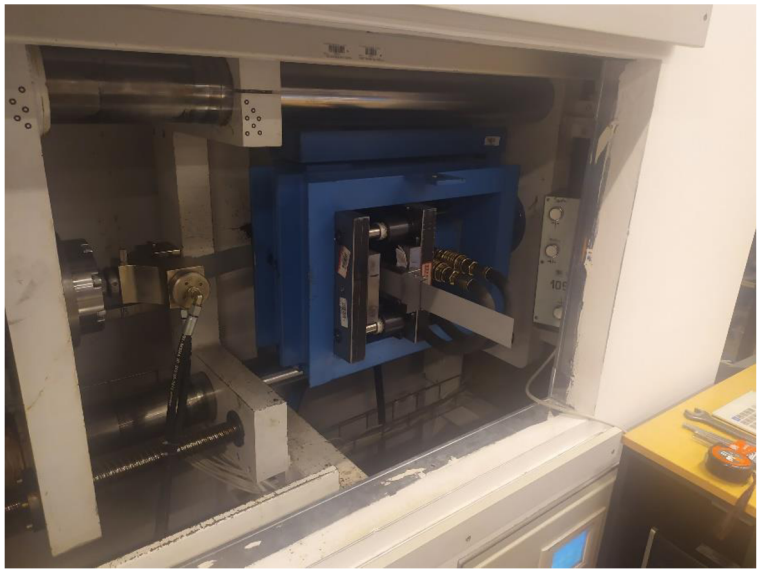
Varianta	Rychlost posuvu [mm/s]	Přidržovací tlak [MPa]	Počet opakování měření	Počet vzorků pro jednu variantu	Celkový počet vzorků
A	10, 50	2, 4	8	8	32
B	10, 50	2, 4, 6	4	8	48
C	10, 50	2, 4, 6	4	8	48

U varianty A bylo nutné zvýšit počet opakování měření na 8, protože z jednoho pásu plechu bylo možné vystřihnout jenom jednu zkušební tyč kvůli jejímu zakřivení. Pro varianty B a C bylo možné zhotovit dvě zkušební tyče z jednoho pásu plechu.



Obr. 30 Tažení přes brzdící lištu (Varianta B)

Následovalo natočení přípravku, aby tažený plech procházel přes brzdící lištu i tažnou hranu (varianta A) Obr. 31. Celý cyklus tažení se opakoval a docházelo k postupnému zvětšování tlaků a tažné rychlosti. Při zvýšení přítlačného tlaku přípravku na 6 MPa došlo k přerušení (přetržení) materiálu a tažení bylo ukončeno. Stalo se tak pro rychlost tažení 10 mm/s i 50 mm/s. Tyto varianty tažení tedy dále nebyly zahrnuty do testování a nadále s nimi nebylo nijak pracováno. Pro zbylé varianty bylo tažení vždy provedeno pro 8 pásů plechu.

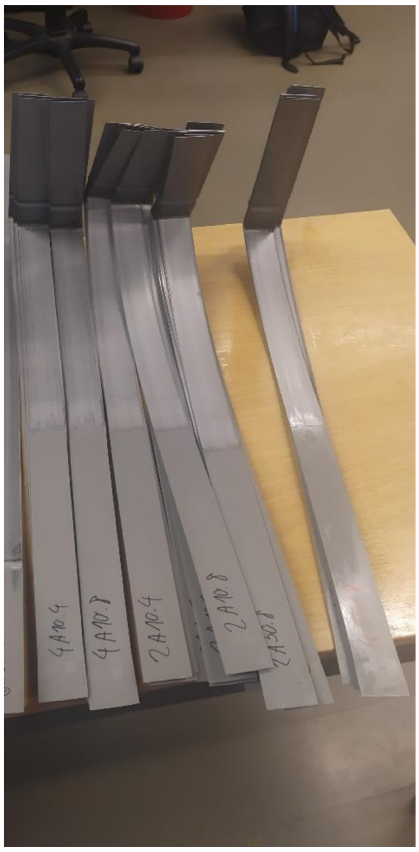


Obr. 31 Tažení přes brzdící lištu a tažnou hranu (Varianta A)

Pro variantu C musel být přípravek vyjmut ze stroje a odstraněna brzdná lišta. Tažení poté probíhalo ve stejném smyslu jako dvě předchozí varianty s postupným navyšováním tlaku a rychlosti tažení. Pro každou variantu bylo vždy provedeno tažení na 4 pásech plechu. Výsledky a grafy zkoušek protahováním pásu plechu jsou umístěny v přílohách 1-16.

2.4.5 Příprava vzorků

Z pásů plechu po zkoušce protahováním pásku byly vystřiženy normalizované zkušební tyče. Zkušební tyčinky byly obdélníkového průřezu s rozměry 0,7×20 mm o délce L_0= 80 mm dle normy ČSN EN ISO 6892-1. Z jednoho pásu plechu varianty B a C byly zhotoveny dvě zkušební tyčinky. U varianty A byl vystřižen jenom jeden vzorek z jednoho pásu, kvůli jeho nevhodnému tvaru po zkoušce tažením (Obr. 32).



Obr. 32 Pásy plechu po tažení přes brzdící lištu a tažnou hranu

2.4.6 Měření vzorků

Následovalo měření tloušťky a šířky zkušebních tyčinek na měřidle Mitutoyoobr. 33. Naměřené hodnoty byly zaznamenány do programu Microsoft Excel a v něm zprůměrovány. Výsledné hodnoty pro jednotné varianty zatěžování při tažení byly vloženy do programu LabNET.

Obr. 33 Měření rozměrů zkušebních tyčinek

2.4.7 Statická zkouška tahem

Mechanické vlastnosti testovaného materiálu byly zjišťovány pomocí statické zkoušky tahem, která byla realizována na trhacím stroji TIRATest 2300 (obr. 34). Vzorky se před zkouškou očistily a byly rovnoměrně vloženy do horních a spodních čelistí trhacího stroje. Bylo nutné dbát na to, aby podélná osa vzorku byla rovnoběžná s vertikálním směrem osy stroje. Počáteční rozměry zkušebních těles byly zjišťovány na třech místech a průměrné hodnoty byly u každého vzorku vloženy do programu LabNET, který řídil celý průběh zkoušky podle normy ČSN EN ISO 6892-1. Po spuštění zkoušky byl ke zkušebnímu tělesu automaticky přiložen extenzometr a těleso začalo být zatěžováno ve směru podélné osy. Rychlost posuvu čelistí byla proměnná – 1 mm/min. po mez kluzu a poté 15 mm/min. až do přetržení vzorku. V příloze 17-33 bakalářské práce jsou výsledné protokoly ze zkoušek, kde jsou uvedeny veškeré vstupní a výstupní hodnoty.

Obr. 34 Trhací stroj TIRATest 2300

2.5 Vyhodnocení dat ze zkoušky tahem

Data z průběhu zkoušky byla zpracována programem LabNET, který vyhodnotil základní mechanické vlastnosti jednotlivých vzorků (R_{p02}, R_m a A_{80mm}) a vykreslil pracovní diagramy zkoušek. Protokoly z jednotlivých zkoušek se nacházejí v příloze 17-33. Dále následovalo statistické vyhodnocení mechanických vlastností a jejich porovnání se základním materiálem, který nebyl tažen (deformován).

2.5.1 Statistické vyhodnocení dat

V následující podkapitole jsou v tabulkách uvedeny průměrné hodnoty $\bar{x}$ s výběrovými směrodatnými odchylkami σ mechanických vlastností zkoušených vzorků, na které byl použitý tlak přidržovače 2,4 a 6 MPa a rychlost tažení 10 mm/s a 50 mm/s. K nim je pro porovnání přidána i odpovídající hodnota pro základní materiál, který nebyl tvářen tažením. V dalších tabulkách lze naleznout procentuální změnu mechanických vlastností oproti základnímu materiálu. Podkapitola byla rozdělená na tři části. Každá se zabývá jednou variantou tažení, které jsou schematicky zobrazeny na začátku experimentální části. Pro lepší přehlednost jsou na konci této kapitoly umístěny 3 sloupcové grafy pro porovnání $R_{p0,2}$, R_m a A_{80mm} mezi jednotlivými variantami tažení.

A. Mechanické vlastnosti zkušebních vzorků pro variantu A

Tab. 8 Střední hodnoty a směrodatné odchylky mechanických vlastností pro variantu A

$R_{p0.2}$ [MPa]	2 MPa		4 MPa		Základní materiál
	10 mm/s	50 mm/s	10 mm/s	50 mm/s	
$\bar{x}$	372,3	375,2	398,4	405,4	142,2
σ	2,1	1,3	1,7	2,8	0,5
R_m [MPa]	2 MPa		4 MPa		Základní materiál
	10 mm/s	50 mm/s	10 mm/s	50 mm/s	
$\bar{x}$	404,1	403,5	424,9	428,1	282
σ	2	1,7	1,4	2,8	0,6
A_{80mm} [%]	2 MPa		4 MPa		Základní materiál
	10 mm/s	50 mm/s	10 mm/s	50 mm/s	
$\bar{x}$	13	14,3	11,4	10,5	46,6
σ	1,7	1,1	0,7	1	0,7

Legenda pro Tab. 9, Tab. 11, Tab. 13

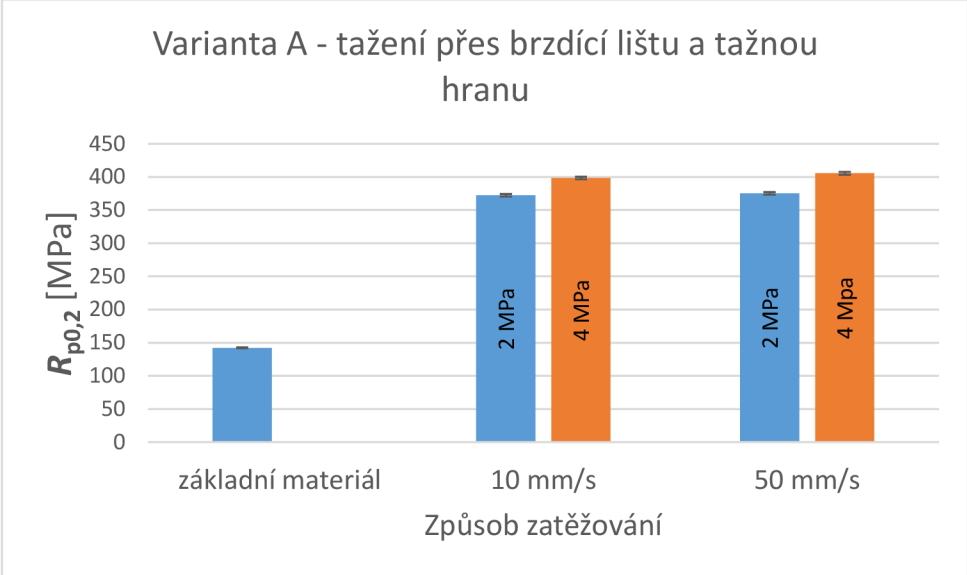
1) 2 a 4 MPa – tlak přidržovače
2) 10 a 50 mm/s – posuv při tažení

Tab. 9 Procentuální porovnání změny mechanických vlastností varianty A

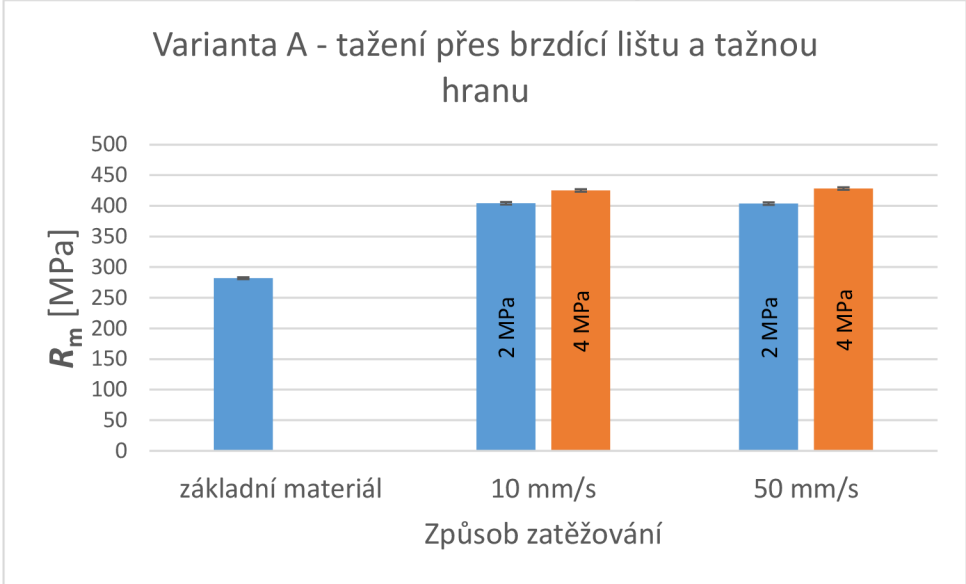
Varianta A	Tlak přidržovače 2 [MPa]		Tlak přidržovače 4 [MPa]	
	10 [mm/s]	50 [mm/s]	10 [mm/s]	50 [mm/s]
$R_{p0.2}$ [MPa]	262%	264%	280%	285%
R_m [MPa]	143%	143%	151%	152%
A_{80mm} [%]	28%	31%	24%	23%

Legenda pro Tab. 10Tab. 12Tab. 13

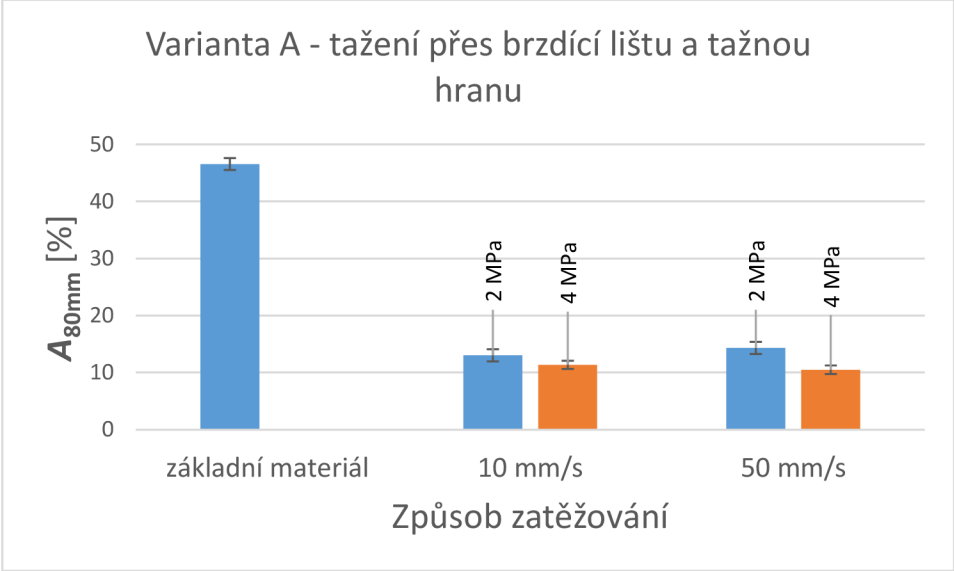
1) Změna mechanických vlastností oproti základnímu materiálu



Obr. 35 Graf změny smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$pro variantu A



Obr. 36 Graf změny mezi pevnosti R_m pro variantu A



Obr. 37 Graf změny celkové tažnosti A_{80mm} pro variantu A

Z uvedených dat v Tab. 8je patrné, že k největším změnám dochází při použití přidržovacího tlaku 4 MPa a rychlosti tažení 50 mm/s. Hodnota smluvní meze kluzu$R_{p0.2}$ v tomto případě dosáhla téměř trojnásobku napětí oproti základnímu materiálu. U smluvní meze pevnosti není nárůst napětí už tak markantní, zvětšuje se na 150% základního materiálu. Naopak celková tažnost zde klesá o 77% z původní tažnosti. Tlak přidržovače 6 MPa zde není uveden, protože při jeho použití došlo při zkoušce k přetržení pásu plechu.

Po podrobnějším zkoumání je patrné, že velikost přidržovacího tlaku má na změnu mechanických vlastností vliv větší, než rychlost tažení. Tato domněnka byla ověřena v následující kapitole pomocí analýzy rozptylu (ANOVA).

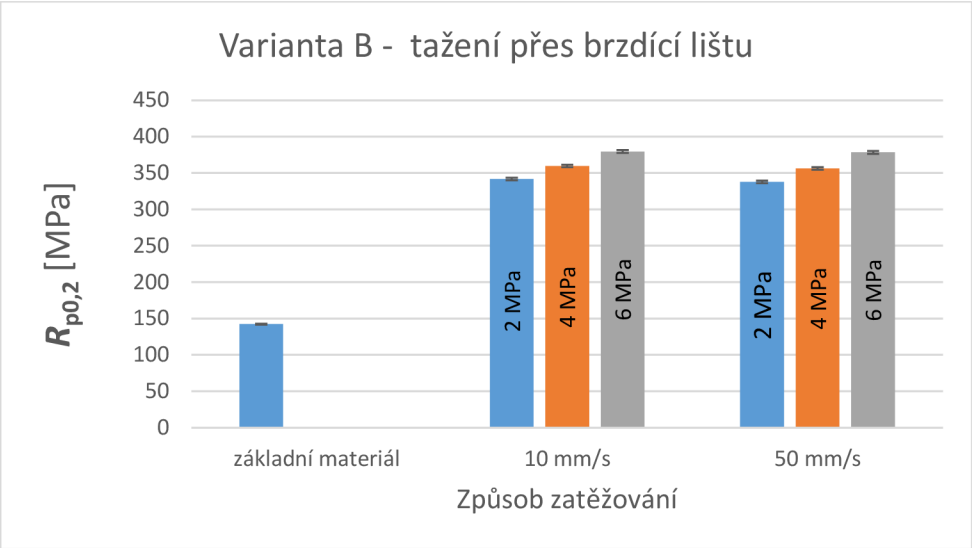
B. Mechanické vlastností zkušebních vzorků pro variantu B

Tab. 10Střední hodnoty a směrodatné odchylky mechanických vlastností pro variantu B

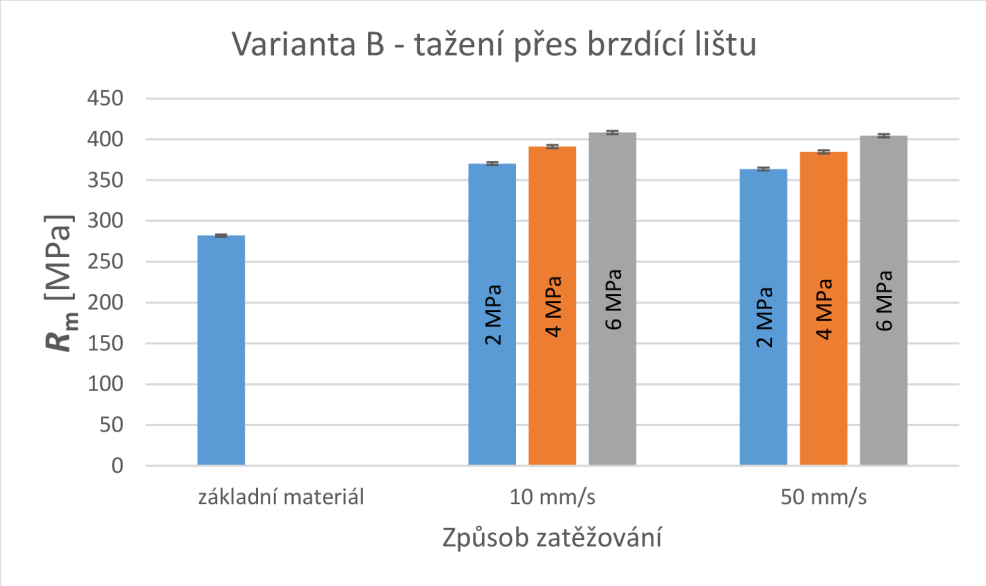
$R_{p0.2}$ [MPa]	2 MPa		4 MPa		6 MPa		Základní materiál
	10 mm/s	50 mm/s	10 mm/s	50 mm/s	10 mm/s	50 mm/s	
$\bar{x}$	341,6	337,6	359,7	356	379,7	378,4	142,2
σ	0,6	1	0,5	1,2	1,3	0,8	0,5
R_m [MPa]	2 MPa		4 MPa		6 MPa		Základní materiál
	10 mm/s	50 mm/s	10 mm/s	50 mm/s	10 mm/s	50 mm/s	
$\bar{x}$	370,1	363,4	391	384,3	408,3	404,5	282
σ	0,6	0,9	0,5	1,2	1,5	0,9	0,6
A_{80mm} [%]	2 MPa		4 MPa		6 MPa		Základní materiál
	10 mm/s	50 mm/s	10 mm/s	50 mm/s	10 mm/s	50 mm/s	
$\bar{x}$	19,4	21,4	16	16,9	12,7	13,5	46,6
σ	1,2	1,7	1,4	1	1,1	1,4	0,7

Tab. 11Procentuální porovnání změny mechanických vlastností varianty B

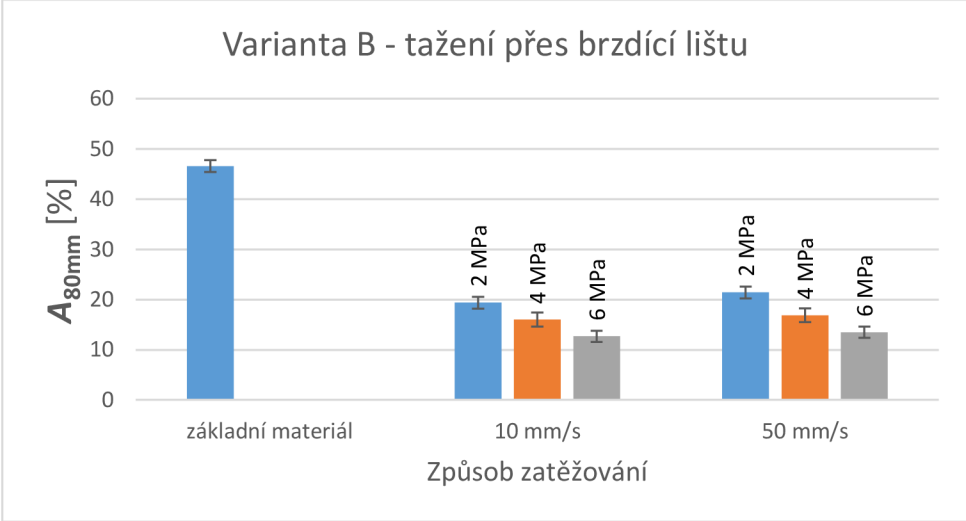
Varianta B	2 MPa		4 MPa		6 MPa	
	10 [mm/s]	50 mm/s	10 mm/s	50 mm/s	10 mm/s	50 mm/s
$R_{p0.2}$ [MPa]	240%	237%	253%	250%	267%	266%
R_m [MPa]	131%	129%	139%	136%	145%	143%
A_{80mm} [%]	42%	46%	34%	36%	27%	29%



Obr. 38 Graf změny smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ pro variantu B



Obr. 39 Graf změny mezi pevnosti R_m pro variantu B



Obr. 40 Graf změny celkové tažnosti A_{80mm} pro variantu B

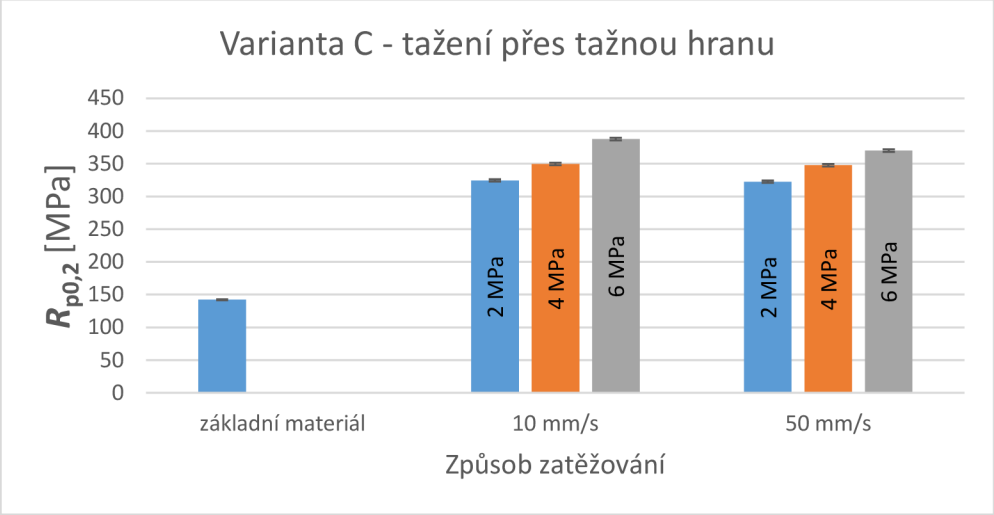
C. Mechanické vlastností zkušebních vzorků pro variantu C

Tab. 12Střední hodnoty a směrodatné odchylky mechanických vlastností pro variantu C

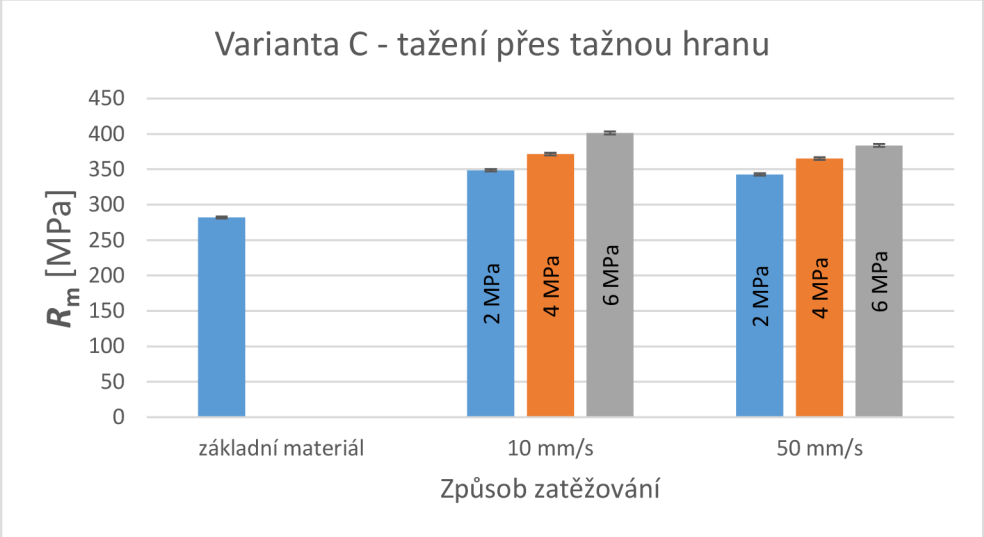
$R_{p0.2}$ [MPa]	2 MPa		4 MPa		6 MPa		Základní materiál
	10 mm/s	50 mm/s	10 mm/s	50 mm/s	10 mm/s	50 mm/s	
$\bar{x}$	324,4	322,5	349,6	347,7	387,7	370,3	142,2
σ	0,7	2,7	1,9	1,6	2,1	1,6	0,5
R_m [MPa]	2 MPa		4 MPa		6 MPa		Základní materiál
	10 mm/s	50 mm/s	10 mm/s	50 mm/s	10 mm/s	50 mm/]	
$\bar{x}$	348,6	342,7	371,3	364,9	401,3	383,7	282
σ	0,6	2,6	1,7	1,4	1,8	1,3	0,6
A_{80mm} [%]	2 MPa		4 MPa		6 MPa		Základní materiál
	10 mm/s	50 mm/s	10 mm/s	50 mm/s	10 mm/s	50 mm/s	
$\bar{x}$	25	26,2	16,9	18,6	11,1	14,2	46,6
σ	1,9	1,4	2,7	1,4	2,1	0,9	0,7

Tab. 13Procentuální porovnání změny mechanických vlastností Varianty C

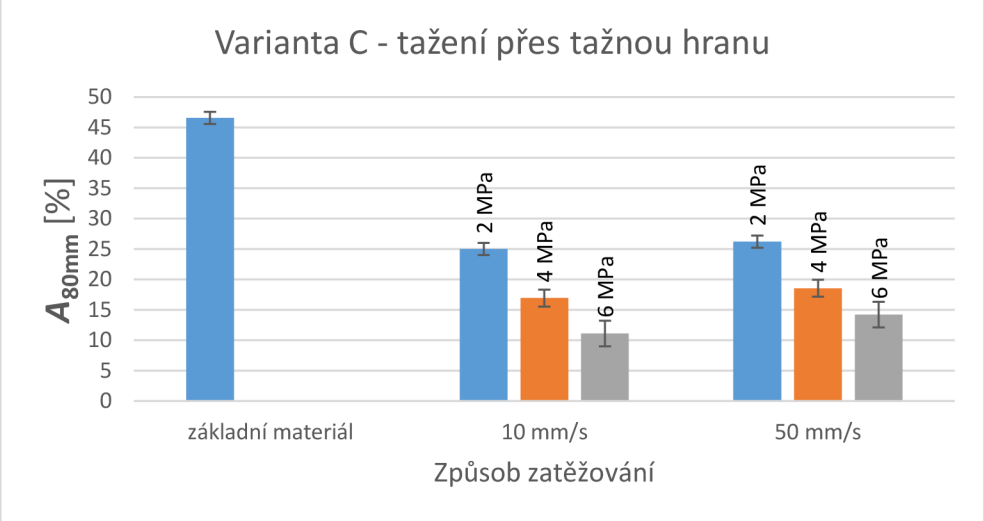
Varianta C	2 MPa		4 MPa		6 MPa	
	10 mm/s	50 mm/s	10 mm/s	50 mm/s	10 [mm/s]	50 mm/s
$R_{p0.2}$ [MPa]	228%	227%	246%	244%	273%	260%
R_m [MPa]	124%	122%	132%	129%	142%	136%
A_{80mm} [%]	54%	56%	36%	40%	24%	31%



Obr. 41 Graf změny smluvní meze kluzu Rp02 pro variantu C



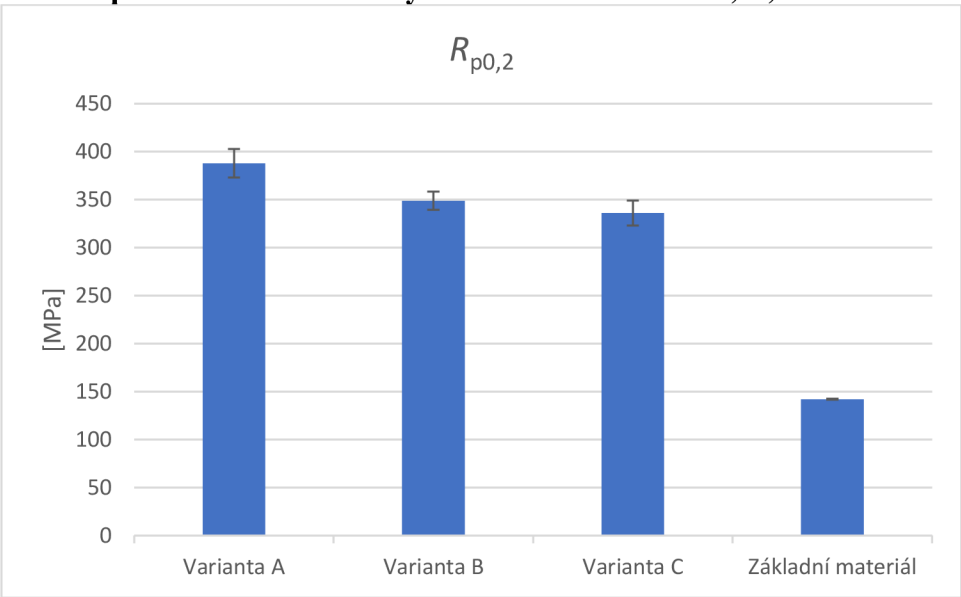
Obr. 42 Graf změny mezi pevnosti Rm pro variantu C



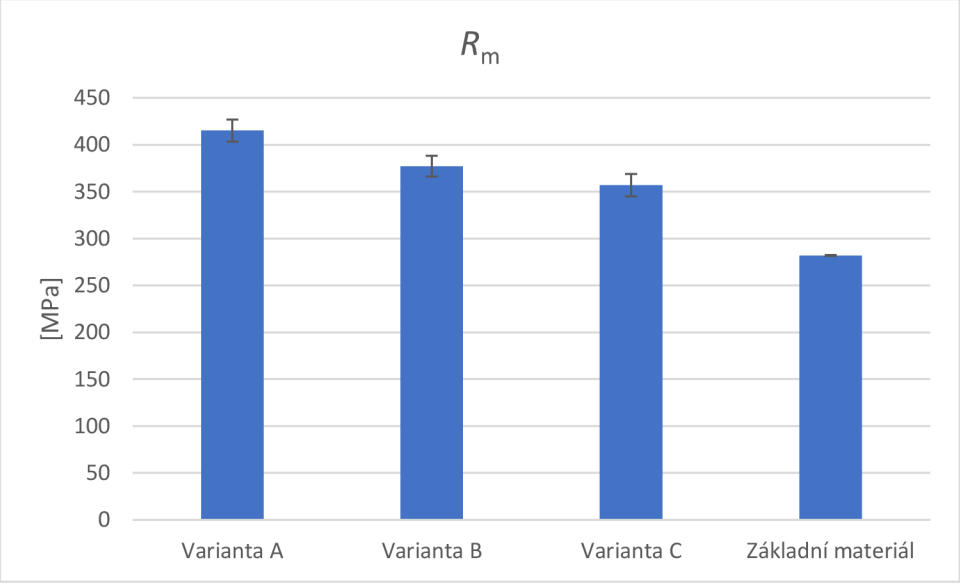
Obr. 43 Graf změny celkové tažnosti A80mm pro variantu C

Při porovnání všech průměrných hodnot varianty B (jenom tažná hrana) a C (brzdící lišta) je patrné, že větší změny mechanických vlastností způsobí použití brzdící lišty. Pravděpodobně je to způsobeno tím, že při průchodu přes brzdící drážku se materiál ohýbá na obě strany. U obou těchto variant ve všech případech došlo k menší změně mechanických vlastností při použití rychlejšího posuvu 50 mm/s.

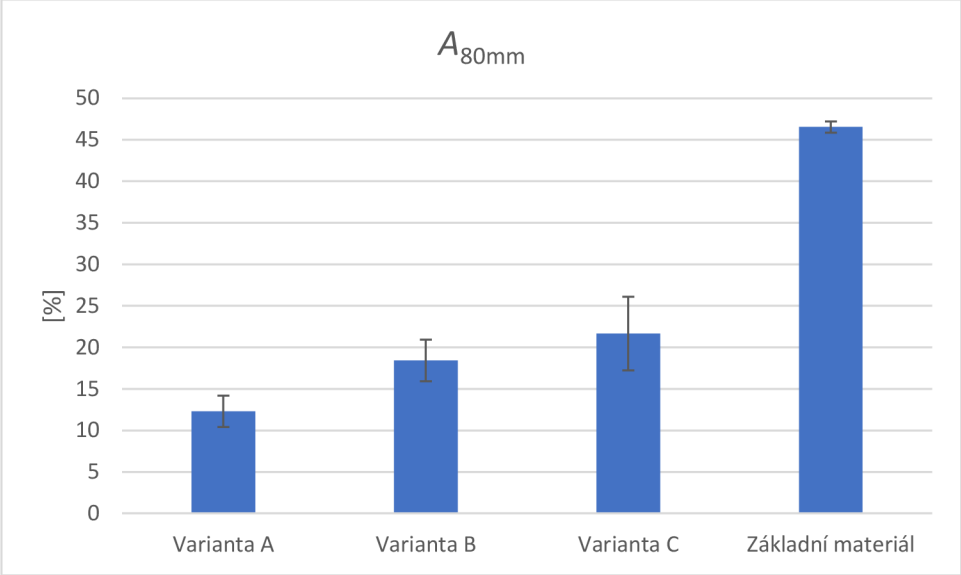
- **Grafické porovnání mechanických vlastností variant A, B, C**



Obr. 44 Graf změny smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ vlivem jednotlivých variant tažení



Obr. 45 Graf změny smluvní meze pevnosti R_m vlivem jednotlivých variant tažení



Obr. 46 Graf změny celkové tažnosti A_{80mm} vlivem jednotlivých variant tažení

2.5.2 Analýza rozptylu (ANOVA)

Vliv tlaku přidržovače a rychlosti tažení na výsledné hodnoty mechanických vlastností byly zkoumány statistickou metodikou. Přesněji řečeno, byly naměřené hodnoty testovány pomocí analýzy rozptylu. ANOVA slouží k posouzení variability naměřených hodnot opakovaného náhodného pokusu. Tato metoda má za úkol určit, které faktory statisticky významně ovlivňují výsledné hodnoty naměřené při experimentu a které mají pouze náhodný charakter k závislé proměnné. Využití tohoto druhu ověření je podmíněno několika požadavky. Je nutná stejná četnost prvků, jejich vzájemná nezávislost, srovnatelný rozptyl a normální rozdělení pro jednotlivé výběry souborů.

Dvoufaktorová ANOVA s opakováním

Pomocí této analýzy jsou vyhodnocovaná data roztříděna do dvou faktorů, kde se předpokládá existence vzájemné interakce mezi faktory. Interakce nastane, když vliv od jednoho faktoru na závislou proměnnou není stejný s úrovní změny druhého faktoru. Soubor hodnot, který je určen k vyhodnocení, musí být rozdělen do skupin, přičemž v každé skupině je známá střední hodnota a rozptyl prvků. Také je potřeba určit nulovou hypotézu H_0a k i hypotézu alternativní H_1.Přijetí a odmítnutí hypotéz H_0se vyhodnocuje pomocí testování shody středních hodnot metodou analýzy rozptylu.

H_0: Střední hodnoty sledovaných skupin se neliší

H_1: Alespoň jedna střední hodnota je jiná než ostatní

Použitím F-testů se zkoumá shodnost rozptylů kombinací výběru. Následně je vypočítána hodnota testovacího kritéria F. S ohledem na hladinu významnosti α a jí úměrnou velikost kritické hodnoty F_{krit} se porovnají hodnoty F a F_{krit}. Když nastane situace, že $F > F_{krit}$ hypotéza H_0se zamítá na hladině významnosti α a přijme se H_1. Rozhodnutí o přijetí hypotézy lze učinit i podle parametru p. Pokud je $p < \alpha$ zamítá se hypotéza H_0a přijímá se H_1.[17]

Pomocí dvoufaktorové ANOVY s opakováním byly vyhodnoceny naměřené mechanické vlastnosti zkušebních tyčinek, které byly rozděleny podle dvou faktorů – velikost přítlačného tlaku a rychlosti tažení. Výpočet se uskutečnil v programu MS Excel. Jak již bylo zmíněno, pro každou sérii bylo zhotoveno 8 vzorků. Testování probíhalo s hladinou významnosti $\alpha = 0{,}05$.

Tab. 14 Vliv velikosti přítlačného tlaku a rychlosti tažení pro variantu A

ANOVA	$R_{p0.2}$			R_m			A_{80mm}		
Varianta A	**F**	**p**	**F_{krit}**	**F**	**p**	**F_{krit}**	**F**	**p**	**F_{krit}**
Tlak	1508,699	$6{,}7\times10^{-26}$	4,196	963,865	$3{,}1\times10^{-23}$	4,196	43,532	$3{,}7\times10^{-7}$	4,196
Rychlost	46,509	$2{,}1\times10^{-7}$	4,196	3,049	0,092	4,196	0,281	0,6	4,196
Interakce	8,568	0,007	4,196	6,954	0,013	4,196	6,471	0,017	4,196

Při porovnání F a F_{krit} nebo hodnot p a α, bylo dosaženo závěru, že hypotéza H_0se zamítá pro faktor A, neboli tlak přidržovače má statisticky významný vliv na všechny mechanické vlastnosti. U faktoru B (rychlost tažení) byla zamítnuta nulová hypotéza H_0pouzeu $R_{p0.2}$, takže rychlost tažení má výsledný vliv na smluvní mez kluzu. Na R_m a A_{80mm} statistický vliv nemá. Interakce obou faktoru má ve všech případech statistický vliv na mechanické vlastnosti vzorků.

Tab. 15Vliv velikosti přítlačného tlaku a rychlosti tažení pro variantu B

ANOVA	$R_{p0.2}$			R_m			A_{80mm}		
Varianta B	**F**	**p**	**F_{krit}**	**F**	**p**	**F_{krit}**	**F**	**p**	**F_{krit}**
Tlak	7239,225	$4{,}9\times10^{-54}$	3,22	6473,629	$5{,}1\times10^{-53}$	3,22	124,086	$2{,}4\times10^{-18}$	3,22
Rychlost	122,7	$4{,}9\times10^{-14}$	4,073	402,156	4×10^{-23}	4,073	10,532	0,002	4,073
Interakce	10,26	$2{,}4\times10^{-4}$	3,22	11,553	1×10^{-4}	3,22	1,112	0,338	3,22

U varianty B, kde je materiál tažen jen přes brzdící drážku, má tlak přidržovače vliv na všechny zkoumané vlastnosti. Vliv rychlost tažení je taky statisticky významný u všech testovaných mechanických vlastností. Interakce obou faktorů je statisticky významná pro $R_{p0.2}$a R_m. Pro celkovou tažnost A_{80mm} je vliv náhodného charakteru.

Tab. 16Vliv velikosti přítlačného tlaku a rychlosti tažení pro variantu C

ANOVA	$R_{p0.2}$			R_m			A_{80mm}		
Varianta C	**F**	**p**	**F_{krit}**	**F**	**p**	**F_{krit}**	**F**	**p**	**F_{krit}**
Tlak	3627,504	$9{,}3\times10^{-48}$	3,22	3156,603	$1{,}7\times10^{-46}$	3,22	204,419	$2{,}3\times10^{-22}$	3,22
Rychlost	176,445	$1{,}2\times10^{-16}$	4,073	425,833	$1{,}3\times10^{-23}$	4,073	14,204	$5{,}1\times10^{-4}$	4,073
Interakce	93,446	$3{,}4\times10^{-16}$	3,22	63,055	$2{,}2\times10^{-13}$	3,22	1,159	0,324	3,22

Pro obvyklé tažení, tedy variantu C (pouze přes tažnou hranu), má statistický vliv na všechny mechanické vlastnosti jak tlak přidržovače, tak i rychlost tažení. Pro interakci faktorů je statistický význam pouze pro $R_{p0.2}$a pro R_m. Celková tažnost A_{80mm}je dle ANOVY statisticky nevýznamná.

Celkový přehled vlivů jednotlivých variant na mechanické vlastnosti je shrnut v Tab. 17.

Tab. 17 Statistický vliv rychlosti tažení na změnu mechanických vlastností

	$R_{p0,2}$	R_m	A_{80mm}
Varianta A	MÁ	NEMÁ	NEMÁ
Varianta B	MÁ	MÁ	MÁ
Varianta C	MÁ	MÁ	MÁ

4 Diskuse výsledků

Z naměřených výsledků je patrné, že průchodem materiálu přes oblast přidržovače dochází ke změně mechanických vlastností. V rámci experimentu byly testovány varianty průchodu přes brzdící lištu současně s tažnou hranou, dále pak jen přes brzdící lištu a nakonec jen přes tažnou hranu. Tyto varianty reprezentují možnosti průchodu plechu z oblasti přidržovače do tvarové dutiny tažného nástroje. Ze srovnávacích tabulek Tab. 18 až Tab. 20 vyplývá, že k nejvyšší změně mechanických vlastností materiál dochází při použití kombinace brzdící lišty a tažné hrany.

Tab. 18 Vyhodnocení smluvní meze kluzu jednotlivých variant

Průměrné hodnoty smluvní meze kluzu						
$R_{p0.2}$ [MPa]	2 MPa		4 MPa		6 MPa	
	10 mm/s	50 mm/s	10 mm/s	50 mm/s	10 mm/s	50 mm/s
Varianta A	372,3	375,2	398,4	405,4	-	-
Varianta B	341,6	337,6	359,7	356	379,7	378,4
Varianta C	324,4	322,5	349,6	347,7	387,7	370,3
Základní materiál	142,2					

V tabulce 16 je uvedeno srovnání změny meze kluzu pro jednotlivé testované varianty. Nejvyšší změna meze kluzu byla dosažena při použití kombinace brzdící lišty a tažné hrany, což byl oproti dalším testovaným variantám očekávatelný výsledek. Důležité je tak porovnání dalších dvou variant tažením přes brzdící lištu (Varianta B) a přes tažnou hranu (Varianta C). V 7 z 8 případu jsou vetší hodnoty právě při variantě B. Lze tedy konstatovat, že použití brzdící lišty má větší vliv na změnu smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ než běžné tažení přes tažnou hranu.

Z naměřených hodnot vyplývá, že průchodem materiálu přes oblast přidržovače dochází ke zvýšení meze kluzu cca 2,5 krát oproti původním hodnotám základního materiálu.

Tab. 19 Vyhodnocení meze pevnosti jednotlivých variant

Průměrné hodnoty meze pevnosti						
R_m [MPa]	2 MPa		4 MPa		6 MPa	
	10 mm/s	50 mm/s	10 mm/s	50 mm/s	10 mm/s	50 mm/s
Varianta A	404,1	403,5	424,9	428,1	-	-
Varianta B	370,1	363,4	391	384,3	408,3	404,5
Varianta C	348,6	342,7	371,3	364,9	401,3	383,7
Základní materiál	282					

Z Tab. 19 je patrné, že podobně jako u meze kluzu dochází k nejvyšší změně meze pevnosti u varianty A. Při srovnáním variant B a C jsou opět patrné vyšší hodnoty napětí u varianty B, než u varianty C. Tentokrát již ve všech případech tažení. Z naměřených hodnot lze konstatovat, že změna mechanických vlastností u meze pevnosti není již tak značná jako u meze kluzu a dochází ke zvýšení maximálně o 51 %.

Tab. 20 Vyhodnocení celkové tažnosti jednotlivých variant

Průměrné hodnoty celkové tažnosti						
A_{80mm} [%]	2 MPa		4 MPa		6 MPa	
	10 mm/s	50 mm/s	10 mm/s	50 mm/s	10 mm/s	50 mm/s
Varianta A	13	14,3	11,4	10,5	-	-
Varianta B	19,4	21,4	16	16,9	12,7	13,5
Varianta C	25	26,2	16,9	18,6	11,1	14,2
Základní materiál	46,6					

Nejzajímavější porovnání hodnot je u Tab. 20. Celková tažnost materiálu po průchodu přes brzdící drážku klesne na méně než polovinu tažnosti základního materiálů při použití přítlačného tlaku 2 a 4 MPa. Při použití kontaktního tlaku 6 MPa je tažnost materiálu více než 3 menší oproti základnímu matriálu, což je zcela zásadní pro další operace tváření. Průchodem materiálu přes brzdící lištu materiál ztrácí výrazně svoje deformační schopnosti.

5 Závěr

Cílem předkládané bakalářské práce bylo stanovení změny mechanických vlastností hlubokotažného plechu při průchodu přes oblast přidržovače. Testovány byly všechny nejběžnější varianty používané při konstrukci nástrojů pro hluboké tažení. Jednalo se o varianty tažení přes brzdící lištu v kombinaci s tažnou hranou, dále pak variantu tažení pouze přes brzdící lištu a variantu tažení pouze přes tažnou hranu. Provedené experimenty jednoznačně prokázaly změnu mechanických vlastností při průchodu materiálu přes oblast přidržovače. Nejvyšší změnu mechanických vlastností způsobuje brzdná lišta, kde dochází k střídavému ohybu materiálu, zpevnění materiálu a vyčerpání deformačních schopností plechu. Nárůst meze kluzu je oproti výchozímu stavu základního materiálu více jak dvojnásobný. Tažnost materiálu naopak klesá na téměř čtvrtinové hodnoty oproti základnímu materiálu. Při konstrukci nástroje pro hluboké tažení a návrhu tvaru přístřihu plechu je nutno brát na zřetel, že průchodem materiálu v oblasti přidržovače dochází k zásadním negativním změnám mechanických vlastností tvářeného materiálu (zvýšení meze kluzu a snížení tažnosti), a tudíž plocha plechu za tažnou hranou musí být dostatečně velká pro výrobu tvaru výlisku.

V rámci experimentu a následného statistického vyhodnocení bylo dále zjištěno, že na změnu mechanických vlastností mají vliv i zvolené technologické parametry velikosti přidržovacího tlaku (2, 4 a 6 MPa) a rychlosti posuvu tažení (10 a 50 mm/s). Zásadnější vliv na změnu mechanických vlastností má velikost zvoleného kontaktního tlaku. Menší vliv má rychlost posuvu.

Seznam obrázků

Obr. 1 Poloha neutrální osy [4] 12
Obr. 2 Úhlová odchylka odpružení 13
Obr. 3 Lemované spoje [4] 14
Obr. 4 Zakružování [4] 14
Obr. 5 Technologie rovnání pomocí válců 15
Obr. 6 Fáze při stříhání [6] 15
Obr. 7 Technologie stříhání (vlevo) a děrování (vpravo)[6] 17
Obr. 8 Porovnání délky střihu s rovnými noži(vlevo) a šikmými noži(vpravo)[3] 17
Obr. 9 Dělení svitků na pásy plechu [6] 18
Obr. 10 Stříhání profilu I pomocí šikmého posuvu [6] 18
Obr. 11 Speciální způsoby stříhání [6] 19
Obr. 12 Stříhání s nátlačnou hranou [7] 20
Obr. 13 Stříhání se zápornou střižnou mezerou [6] 20
Obr. 14 Schéma tažení [8] 21
Obr. 15 Metody tažení[7] 22
Obr. 16 Princip tažení válcového tvaru 23
Obr. 17 Zvlnění výlisku [8] 23
Obr. 18 Tažení výlisku na 3 tahy 25
Obr. 19 Tažení se ztenčením stěny [8] 26
Obr. 20 Zužování [8] 27
Obr. 21 Rozšiřování [8] 27
Obr. 22 Vypínání plechu [8] 28
Obr. 23 Zpětné tažení 28
Obr. 24 Diagram tahové a tlakové zkoušky [12] 33
Obr. 25 Tvary indentorů 35
Obr. 26 Rázové kladivo [15] 36
Obr. 27 Tažení varianta A 37
Obr. 28 Tažení varianta B 37
Obr. 29 Tažení varianta C 38
Obr. 30 Tažení přes brzdící lištu (Varianta B) 41
Obr. 31 Tažení přes brzdící lištu a tažnou hranu (Varianta A) 41
Obr. 32 Pásy plechu po tažení přes brzdící lištu a tažnou hranu 42
Obr. 33 Měření rozměrů zkušebních tyčinek 43
Obr. 34 Trhací stroj TIRATest 2300 44
Obr. 35 Graf změny smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$pro variantu A 46
Obr. 36 Graf změny mezi pevnosti R_m pro variantu A 46
Obr. 37 Graf změny celkové tažnosti A_{80mm} pro variantu A 46
Obr. 38 Graf změny smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ pro variantu B 48
Obr. 39 Graf změny mezi pevnosti R_m pro variantu B 48
Obr. 40 Graf změny celkové tažnosti A_{80mm} pro variantu B 48
Obr. 41 Graf změny smluvní meze kluzu Rp02 pro variantu C 50
Obr. 42 Graf změny mezi pevnosti Rm pro variantu C 50
Obr. 43 Graf změny celkové tažnosti A80mm pro variantu C 50
Obr. 44 Graf změny smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ vlivem jednotlivých variant tažení 51
Obr. 45 Graf změny smluvní meze pevnosti R_m vlivem jednotlivých variant tažení 51

Obr. 46 Graf změny celkové tažnosti A_{80mm} vlivem jednotlivých variant tažení 52

Použitá literatura

[1] KRÍZ, Rudolf a Pavel VÁVRA. *Strojírenská příručka: 24 oddílu v osmi svazcích. Svazek 8*. Praha: Scientia, 1994. ISBN 978-80-7183-054-2.

[2] BENEŠOVÁ, Soňa a Vladimír BERNÁŠEK. *Technologie tváření*. 2014. ISBN 978-80-261-0449-0.

[3] *Elektronická skripta poskytnuta univerzitou* [online]. 10. květen 2022. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/literatura.htm

[4] DOC. ING. PAVEL SOLFRONK, PH.D. Technologie II - 6.přednáška Technologie ohýbání - A. In: . Liberec. 2021.

[5] DOC.ING. JIŘÍ PROCHÁZKA, CSC. *Technologie slévání, tváření a svařování*. nedatováno.

[6] DOC. ING. PAVEL SOLFRONK, PH.D. Technologie II – 5. přednáška Technologie stříhání. In: . Liberec. 2021.

[7] ČADA, Radek. *Technologie tváření a slévání–teoretickỳ základ [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská–Technická univerzita, 2013 [cit. 2018-05-13]*. B.m.: ISBN 978-80-248-3015-5. nedatováno.

[8] DOC. ING. PAVEL SOLFRONK, PH.D. Technologie II – 7. přednáška Technologie tažení. In: . Liberec. 2021.

[9] HEJDUK, Jiří. *Vymezte vliv tvaru brzdících lišt na zvyšování tahových napětí použitím přípravku*. Liberec, 1969. Diplomová práce. Vysoká škola strojní a textilní.

[10] ASM INTERNATIONAL, ed. *ASM handbook*. 10th edition. Materials Park, Ohio: ASM International, 1990. ISBN 978-0-87170-377-4.

[11] DAVIES, Geoff. *Materials for automobile bodies*. second edition. Amsterdam: Elsevier, 2012. ISBN 978-0-08-096979-4.

[12] HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. *Strojírenská technologie 1. 1. díl, Nauka o materiálu*. 4., rev. vyd. Praha: Scientia, 2007. ISBN 978-80-86960-26-5.

[13] ESTUDIO.CZ. *ČSN EN ISO 6892-1 (420310)* [online]. [vid. 2023-11-03]. Dostupné z: https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-iso-6892-1-420310-202365.html#

[14] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I.* B.m.: Cerm, 2001. ISBN 80-7204-193-2.

[15] *Rázová kladiva a padostroje - Labortech s.r.o.* [online]. 16. červenec 2018 [vid. 2023-11-29]. Dostupné z: https://www.labortech.cz/produkty/zkusebni-systemy/razova-kladiva/

[16] ESTUDIO.CZ. *ČSN EN 10152 (420911)* [online]. [vid. 2023-12-01]. Dostupné z: https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-10152-420911-203632.html

[17] BEDÁŇOVÁ, Iveta. *ANOVA. Statistika a výpočetní technika* [online]. [vid. 2023-12-04]. Dostupné z: https://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Teorie/Predn3/ANOVA.htm

Seznam příloh

Příloha 1: Protokol ze zkoušky protahování pásku – tlak 2 MPa, rychlost tažení 10 mm/s,A

Příloha 2:Protokol ze zkoušky protahování pásku – tlak 2 MPa, rychlost tažení 10 mm/s, B

Příloha 3:Protokol ze zkoušky protahování pásku – tlak 2 MPa, rychlost tažení 10 mm/s, C

Příloha 4:Protokol ze zkoušky protahování pásku – tlak 4 MPa, rychlost tažení 10 mm/s, A

Příloha 5:Protokol ze zkoušky protahování pásku – tlak 4 MPa, rychlost tažení 10 mm/s, B

Příloha 6:Protokol ze zkoušky protahování pásku – tlak 4 MPa, rychlost tažení 10 mm/s, C

Příloha 7:Protokol ze zkoušky protahování pásku – tlak 6 MPa, rychlost tažení 10 mm/s, B

Příloha 8:Protokol ze zkoušky protahování pásku – tlak 6 MPa, rychlost tažení 10 mm/s, C

Příloha 9:Protokol ze zkoušky protahování pásku – tlak 2 MPa, rychlost tažení 50 mm/s, A

Příloha 10:Protokol ze zkoušky protahování pásku – tlak 2 MPa, rychlost tažení 50 mm/s,B

Příloha 11:Protokol ze zkoušky protahování pásku – tlak 2 MPa, rychlost tažení 50 mm/s, C

Příloha 12:Protokol ze zkoušky protahování pásku – tlak 4 MPa, rychlost tažení 50 mm/s,A

Příloha 13:Protokol ze zkoušky protahování pásku – tlak 4 MPa, rychlost tažení 50 mm/s, B

Příloha 14:Protokol ze zkoušky protahování pásku – tlak 4 MPa, rychlost tažení 50 mm/s, C

Příloha 15:Protokol ze zkoušky protahování pásku – tlak 6 MPa, rychlost tažení 50 mm/s, B

Příloha16:Protokol ze zkoušky protahování pásku – tlak 6 MPa, rychlost tažení 50 mm/s, C

Příloha17: Protokol ze statické zkoušky tahem – tlak 2 MPa, rychlost tažení 10 mm/s, A

Příloha 18: Protokol ze statické zkoušky tahem – tlak 2 MPa, rychlost tažení 10 mm/s, B

Příloha 19: Protokol ze statické zkoušky tahem – tlak 2 MPa, rychlost tažení 10 mm/s, C

Příloha 20: Protokol ze statické zkoušky tahem – tlak 4 MPa, rychlost tažení 10 mm/s, A

Příloha 21: Protokol ze statické zkoušky tahem – tlak 4 MPa, rychlost tažení 10 mm/s, B

Příloha 22: Protokol ze statické zkoušky tahem – tlak 4 MPa, rychlost tažení 10 mm/s, C

Příloha 23: Protokol ze statické zkoušky tahem – tlak 6 MPa, rychlost tažení 10 mm/s, B

Příloha 24: Protokol ze statické zkoušky tahem – tlak 6 MPa, rychlost tažení 10 mm/s, C

Příloha 25: Protokol ze statické zkoušky tahem – tlak 2 MPa, rychlost tažení 50 mm/s, A

Příloha 26: Protokol ze statické zkoušky tahem – tlak 2 MPa, rychlost tažení 50 mm/s, B

Příloha 27: Protokol ze statické zkoušky tahem – tlak 2 MPa, rychlost tažení 50 mm/s, C

Příloha 28: Protokol ze statické zkoušky tahem – tlak 4 MPa, rychlost tažení 50 mm/s, A

Příloha 29: Protokol ze statické zkoušky tahem – tlak 4 MPa, rychlost tažení 50 mm/s, B

Příloha 30: Protokol ze statické zkoušky tahem – tlak 4 MPa, rychlost tažení 50 mm/s, C

Příloha 31: Protokol ze statické zkoušky tahem – tlak 6 MPa, rychlost tažení 50 mm/s, B

Příloha 32: Protokol ze statické zkoušky tahem – tlak 6 MPa, rychlost tažení 50 mm/s, C

Příloha 33: Protokol ze statické zkoušky tahem – základní materiál bez tažení