

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

Ústav strojírenské technologie



VERIFIKACE ODPRUŽENÍ TLUSTÝCH
OCELOVÝCH PLECHŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Autor: Michaela Broumová
Studijní obor: Teoretický základ strojírenského inženýrství
Vedoucí práce: Ing. Lukáš Chrástanský

Praha 2018

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že bakalářskou práci na téma Verifikace odpružení tlustých ocelových plechů jsem vypracovala samostatně s využitím uvedené odborné literatury a pramenů a na základě konzultací s vedoucím práce.

V Praze dne:.....

.....

Michaela Broumová

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala panu Ing. Lukáši Chrástánskému za odborné vedení, cenné připomínky a trpělivost při vedení mé bakalářské práce. Dále bych ráda poděkovala panu Ing. Františku Tatíčkoví, Ph.D. za cenné rady v oblasti teorie. V neposlední řadě děkuji své rodině za podporu po celou dobu studia.

Anotace

Vysoká škola: ČVUT v Praze
Fakulta strojn^í
Ústav: Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.

Téma bakalářské práce: Verifikace odpružení tlustých ocelových plechů

Akademický rok: 2017/2018
Autor: Michaela Broumová
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Lukáš Chrástanský
Klíčová slova: Tváření, ohyb, odpružení, numerická simulace
Abstrakt: Teoretická část bakalářské práce se zabývá problematikou technologie tváření ohybem a nežádoucími faktory s ní spojenými. V praktické části se věnuje verifikaci odpružení reálného vzorku vůči numerické simulaci.

Rozsah práce a příloh

Počet stran: 37
Počet obrázků: 28
Počet tabulek: 14

Annotation

University: Czech Technical University in Prague
Faculty of Mechanical Engineering
Department: Department of Manufacturing Technology
Head of the department: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.

Theme of work: Verification of springback of thick steel sheets

Academic year: 2017/2018
Author: Michaela Broumová
Supervisor: Ing. Lukáš Chrástfanksý
Keywords: Forming, bend, springback, numerical simulation
Abstract: The theoretical part of bachelor thesis is about the bending technology problem and the undesirable effects associated with this technology. In practical part is about verification of real sample suspension versus numerical simulation.

Volume of work

Number of pages: 37
Number of pictures: 28
Number of tables: 14

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
$R_{p0,2}$	Mez kluzu smluvní	[MPa]
R_e	Mez kluzu výrazná	[MPa]
R_m	Mez pevnosti	[MPa]
F_{max}	Ohybová síla	[N]
A	Ohybová práce	[J]
h	Zdvih	[mm]
k_1	Koeficient průběhu	[-]
b	Šířka materiálu	[mm]
l	Vzdálenost podpěr	[mm]
t	Tloušťka materiálu	[mm]
ρ	Poloměr neutrální vrstvy	[mm]
R	Poloměr zaoblení	[mm]
x	Součinitel	[-]
L_o	Délka oblouku	[mm]
d_p	Průměr podpor	[mm]
d_t	Průměr trnu	[mm]
v	Rychlost posuvu trnu	[mm/s]
A_{80mm}	Tažnost	[%]
E	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
KV	Nárazová práce	[J]
L	Délka vzorku	[mm]
β_1	Úhel při zatížení	[°]
β_2	Úhel po odlehčení	[°]
α	Úhel odpružení	[°]
y	Hodnota souřadnice v ose y	[-]
z	Hodnota souřadnice v ose z	[-]
ϕ	Pomocný úhel výpočtu	[°]

Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	7
1 ÚVOD.....	9
2 TEORIE TVÁŘENÍ.....	10
2.1 Rozdělení tvářecích procesů	11
2.2 Ohyb.....	11
2.2.1 Výpočet sil pro ohyb.....	12
2.2.2 Vůle mezi činnými částmi nástroje.....	13
2.2.3 Přesnost ohýbání.....	13
2.2.4 Deformace průřezu a neutrální vlákno	14
2.2.5 Odpružení.....	15
2.2.6 Typy odpružení plošného tváření.....	16
2.2.7 Praskání a tvorba vln	18
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	19
3.1 Návrh a popis experimentu.....	19
3.1.1 Materiál	20
3.1.2 Zkušební zařízení	21
3.1.3 Numerická simulace	23
3.2 Vyhodnocení experimentu.....	23
3.2.1 Vyhodnocení martenzitické korozivzdorné oceli	23
3.2.2 Vyhodnocení ocele DP500	27
4 ZÁVĚR	32
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	33
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	35
SEZNAM TABULEK.....	36
SEZNAM PŘÍLOH	37

1 ÚVOD

V dnešní době je snaha stále více snižovat náklady na vstupní materiály, které jsou používány pro strojírenskou výrobu. Tyto úspory jsou převážně hledány snižováním tloušťky plechů, aby se docílilo nižší hmotnosti, a také v neposlední řadě snižováním nákladů na strojírenskou výrobu při zachování stejných vlastností na požadovanou aplikaci materiálu. I přes tuto skutečnost se v dnešní době stále vyskytuje uplatnění tlustých, vysokopevnostních, ocelových plechů, které jsou obtížně nahraditelné pro specifické účely. U těchto aplikací je požadována co nejvyšší rychlost výroby a samozřejmě její přesnost. To se v dnešní době velmi rychle posouvá kupředu díky automatizaci výroby. Důležitou součástí zpracování těchto plechů jsou jejich specifické vlastnosti, které jim dávají především legující prvky přidávané v požadovaném množství. Další důležitou částí výroby je samotné zpracování polotovaru, u tepelně zpracovávaných plechů záleží na způsobu kalení a následných operacích popouštění či žíhání, tyto operace dávají materiálu konečné mechanické vlastnosti jako je například pevnost povrchu a odstranění vnitřního pnutí. Využití plechů je již poměrně rozšířené, používáme je například k výrobě vozidel, jeřábů, pro ocelové stavby, tlaková zařízení, zařízení elektráren či v hornictví [5] [6].

Rozšířeným druhem zpracování plechů obecně je technologie tváření ohybem, který je popsán v mnoha publikacích. Jedná se o trvalou deformaci materiálu způsobenou působením vnějších sil. Vzniká po překročení meze kluzu. S tímto procesem jsou spojené i různé problémy. Například to může být deformace průřezu, odpružení, vznik prasklin až úplného prasknutí, či tvorba vln. Zde záleží především na materiálu a jeho vlastnostech. Konkrétně při odpružení je důležitým ukazatelem elastická deformace materiálu. Dalšími faktory ovlivňující odpružení jsou modul pružnosti v tahu, konstrukční řešení nástroje, podmínky tváření atd. [8].

Tato práce se zabývá právě problematikou odpružení plechů, které je velmi obtížné predikovat. Bakalářská práce má za úkol shrnout celkově problematiku odpružení a pomocí experimentu, který se skládá z numerických simulací a tříbodového ohybu martenzitické korozivzdorné ocele a ocele DP500, vyhodnotit využití numerické simulace odpružení pro reálné využití v praxi.

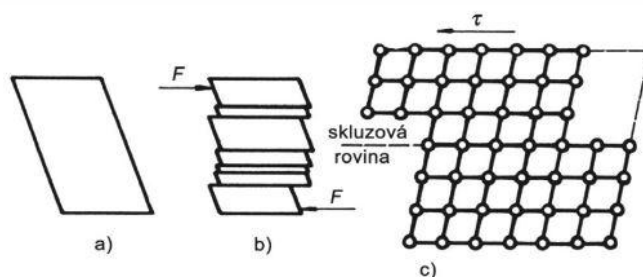
2 TEORIE TVÁŘENÍ

Tváření je technologický proces, při kterém dochází ke změně tvaru součásti působením vnějších sil bez odběru třísky. Toto probíhá za vzniku plastických deformací a ovlivňuje to mechanické vlastnosti materiálu. Při probíhající deformaci vzrůstá odpor materiálu tzv. přetvárný odpor. Další vliv na tvařitelnost má charakteristika materiálu (struktura materiálu, teplota, chemické složení atp.) a technologické podmínky (nástroj, tření, mazání, atp.) [8].

Při tváření kovů vždy nejdříve vzniká elastická deformace a následně pak plastická deformace. Plastická deformace je ve své podstatě pohyb jednotlivých částí kovů vůči sobě, aniž by mezi nimi přestaly působit přitažlivé síly. Díky této vlastnosti je možné tvářet kovy. Mechanismus vzniku plastické deformace lze vysvětlit na základě dislokační teorie, t.j. pohybem a vznikem mřížkových poruch. Známe dva základní mechanismy deformace a to skluzem a dvojčatěním [4].

- **Skluz**

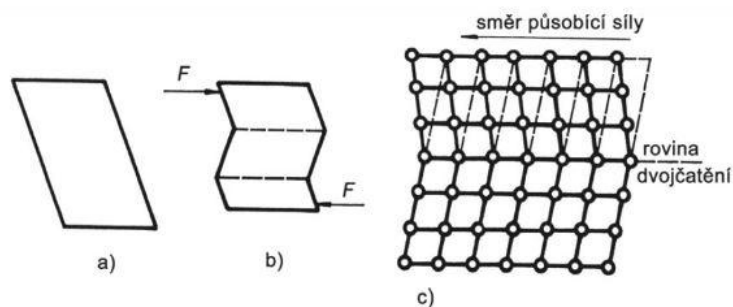
Ve směru působícího napětí se pohybuje nadbytečná vrstva atomů, až vystoupí na povrch. Na začátku plastické deformace dochází k jednoduchému skluzu a zároveň k malému zpevnění mřížky. Při pokračujícím zatěžování dochází ke složitějšímu skluzu, kdy dochází i k natáčení systému a díky tomu i k většímu zpevnění materiálu [4] [7].



Obr. 2.1 Plastická deformace skluzem [7]

- **Dvojčatění**

Část krystalu se přesune tak, že se nejdříve příznivě natočí celá mřížka pro skluz, a pak se část natočeného krystalu skluzem deformuje. Při tomto jevu dochází k velkému zpevnění materiálu, deformace bývá malá, a proto je tento jev nežádoucí [7].



Obr. 2.2 Plastická deformace dvojčatěním [7]

2.1 Rozdělení tvářecích procesů

Dle tvářecí teploty

Hraniční teplota se určuje dle rekrystalizační teploty materiálu.

- Tváření za studena
- Tváření za poloohřevu
- Tváření za tepla [4]

Dle stavu napjatosti

Rozeznáváme devět stavů napjatosti, v tváření může být prakticky pět možných stavů.

- Tlaková
- Tah - tlak
- Tah
- Ohyb
- Smyk [4]

Rozdělení podle převládajících směrů deformace

- Plošném tváření - Deformace probíhá pouze ve dvou směrech a třetí hlavní deformace je velmi malá a zanedbáváme ji
- objemovém - Deformace probíhá ve všech třech směrech hlavních deformací [4]

Druhy tvářecích operací

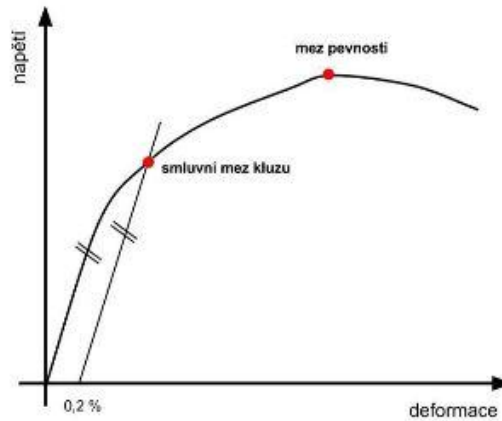
- | | |
|----------------|---------------|
| • Stříhání | • Ražení |
| • Ohýbání | • Kování |
| • Tažení | • Válcování |
| • Tlačení | • Kalibrování |
| • Protlačování | • Ostatní[4] |

Tato práce se zabývá technologií tváření ohybem a odpružením, které při ohybu vzniká. Podle základního rozdělení výše spadá ohyb do plošného tváření. Následující kapitoly se zabývají detailně právě teorií ohybu a problematice odpružení při ohybu.

2.2 Ohyb

Ohýbání je technologický proces tváření, při kterém je materiál vzniklým napětím trvale deformován bez podstatné změny průřezu. Plastická deformace zasahuje do poměrně malého objemu tvářeného materiálu a tvoří ostrou nebo oblou hranu či oblou plochu [1].

Ohýbání využívá stejných zákonů plasticity jako ostatní způsoby tváření, překročením meze kluzu se dosahuje deformace plastické s elastickou. Mez kluzu je buď smluvní $R_{p0,2}$ nebo výrazná R_e , nesmí se však překročit mez pevnosti R_m , mohlo by dojít k nežádoucímu porušení materiálu. Na obr. 2.3 je zobrazen graf pro materiál s nevýraznou mezí kluzu [1] [11].



Obr. 2.3 Pracovní diagram s nevýraznou mezí kluzu $R_{p0,2}$ [10]

Ohýbání je prováděno buď ručně (na ručních strojích) nebo strojně. Druhou variantou je strojní, realizuje se na lisech pomocí ohýbacího nástroje nebo na ohraňovacích strojích, případně pomocí rotačních nástrojů například válců [1].

2.2.1 Výpočet sil pro ohyb

Ohyb se rozděluje na dva základní typy a to do tvaru „V“ a „U“.

- **Ohyb do tvaru „V“**

Ohýbaný výrobek se považuje za nosník na dvou podporách zatížený silou uprostřed [1].

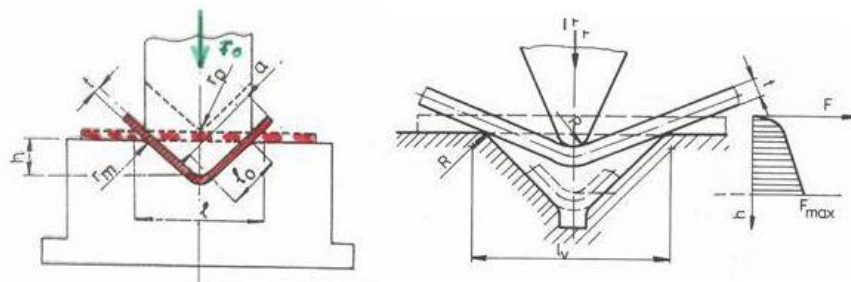
Potom

- Výpočet síly
$$F_{max} = \frac{b \cdot t^2}{l} R_m \quad (1)$$

- Výpočet práce
$$A = F_{max} \cdot h \cdot k_1 \quad (2)$$

Kde pro oba vzorce platí:

F_{max}	ohybová síla	[N]
A	ohybová práce	[J]
b	šířka materiálu	[mm]
t	tloušťka materiálu	[mm]
R_m	mez pevnosti materiálu	[MPa]
l	vzdálenost podpěr	[mm]
h	zdvih (koncová poloha)	[mm]
k_1	koeficient průběhu F ($k = 1/3$)	[-]



Obr. 2.4 Ohyb do tvaru V [11]

2.2.2 Vůle mezi činnými částmi nástroje

Vůle představuje vzdálenost mezi činnými částmi ohýbacího nástroje, které se nazývá ohybník a ohybnice. Ohýbání probíhá ohnutím stěn součásti pod určitým úhlem či poloměrem, pro ohyb do tvaru V, kdy velikost mezery mezi pevnou a pohyblivou částí nástroje odpovídá zpravidla tloušťce ohýbaného materiálu. Tohoto parametru se dosáhne seřízením lisovacího nástroje [1].

Ohýbání může také probíhat jako ohnutí stěn součásti, pro ohyb do tvaru U, rovnoběžně se směrem pohybu pohyblivé čelisti. Velikost vůle může mít v tomto případě několik různých významů a hodnot v návaznosti na skutečných podmínkách práce a geometrii nástroje. Minimální hodnotu tloušťky ohýbaného materiálu volíme tehdy, kdy je výška stěny malá. V tomto případě vůle zajišťuje dobrou jakost výlisku. Při větší výšce stěny se provede úprava s rovnoběžnými stěnami a velikost vůle se volí v závislosti na tloušťce ohýbaného materiálu, která je větší než tloušťka ohýbaného materiálu [1].

2.2.3 Přesnost ohýbání

Přesnost v technologii ohýbání závisí na mnoha faktorech. Ty lze obecně rozdělit do dvou skupin, na vlivy materiálové a konstrukční. Materiálové vlivy zahrnují především typ materiálu, rovnoměrnost a rozložení mechanických vlastností, tloušťka, velikosti plastických deformací a jiné. Mezi konstrukční vlivy pak patří zejména tloušťka a přesnost rozměru tvářeného polotovaru, rozměry a přesnost činných částí nástroje, stav a stupeň opotřebení nástroje, konstrukce nástroje a středění polotovaru, pracovní vůle nástroje, počtem operací apod. [1].

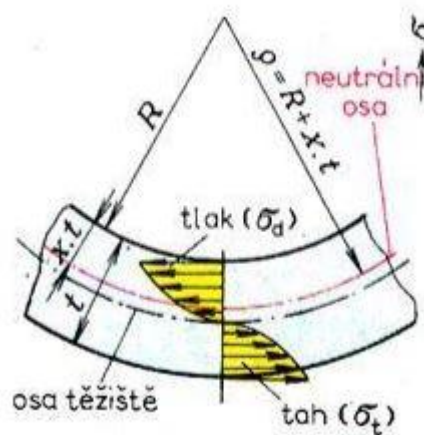
Materiálové vlastnosti jsou většinou předepsány konstruktérem součásti, lze je ovšem také ovlivňovat i technologií tváření, a to konstrukcí tvářecích nástrojů. Proto je požadováno, aby nástroj docílil rovnoměrného rozložení plastické deformace polotovaru a velikosti zpevnění, protože pak bude podíl pružných deformací poměrně nízký [1].

Rozměrovou přesnost a jakost tvářené plochy tedy ovlivňuje konstrukční vliv vyplývající z technologie a realizované konstrukce nástroje, zejména volbou vhodné geometrie činných částí, jejich kvalitou a rozměrovou přesností [1].

2.2.4 Deformace průřezu a neutrální vlákno

Při ohýbání se vrstvy kovu na vnější straně ohýbaného materiálu natahují (tahová napětí) a na vnitřní straně stlačují (tlaková napětí). Mezi natahovanými a stlačovanými vrstvami je neutrální vrstva zvané vlákno, které je bez napětí, tedy v průběhu ohybu si ponechává původní délku, ani se nenatahuje ani nestlačuje. Toto vlákno je na začátku procesu uprostřed průřezu, v průběhu procesu ohybu se posouvá směrem k vnitřní straně ohybu. Není tedy na stejné pozici s osou těžiště ohýbaného materiálu [1].

Z technologického hlediska se zajímáme zejména o její polohu. Její praktický význam spočívá především ve výpočtu rozměrů vstupního polotovaru při ohýbání a také v určení minimálního poloměru zaoblení R [1].



Obr. 2.5 Rozložení a velikost napětí v ohýbaném materiálu [11]

V rámci uvažované metodiky určování polohy, resp. rozměru neutrální vrstvy, se musí řešit dva zásadní případy. Prvním z nich je případ, kdy ohyb má velký poloměrem zaoblení $R/t \geq 12$. Vzniknou tak pružně plastické deformace, které jsou malé a lze předpokládat, že neutrální vrstva prochází středem tloušťky výchozího materiálu. V druhém případě řešíme situaci, kdy provádíme ohýbání s velmi malým poloměrem zaoblení, jakým jsou např. ostré hrany $R/t \leq 6$. V tomto případě dochází k pohybu neutrální vrstvy směrem k menšímu poloměru zaoblení, tedy ke stlačovaným vláknům a dochází k nežádoucímu jevu a to změně průřezu. Posun neutrální osy je vidět na obr. 2.6 [1].

Tabulka 1 Hodnoty součinitele x [11]

$\frac{R}{t}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1	1,2	1,5	2	3	4	Nad 5
x	0,23	0,29	0,32	0,35	0,38	0,39	0,4	0,41	0,41	0,42	0,44	0,45	0,46	0,47	0,5

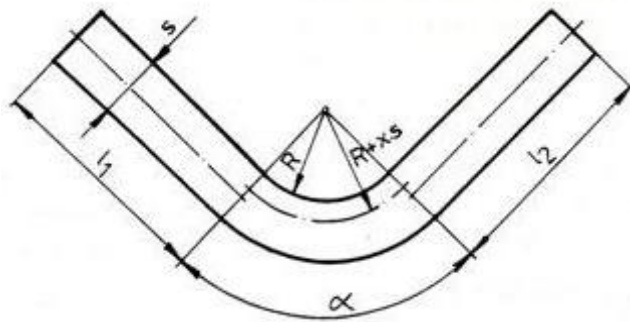
Na základě znalosti polohy neutrální vrstvy je pak možné určit výchozí délku polotovaru pro součást vyráběnou ohýbáním s různými druhy ohybu, která odpovídá součtu délek oblouků v jednotlivých ohybech a délek jednotlivých rovných částí [1].

Poloměr neutrální vrstvy je pak tedy:

$$\rho = R + x \cdot t \quad (3)$$

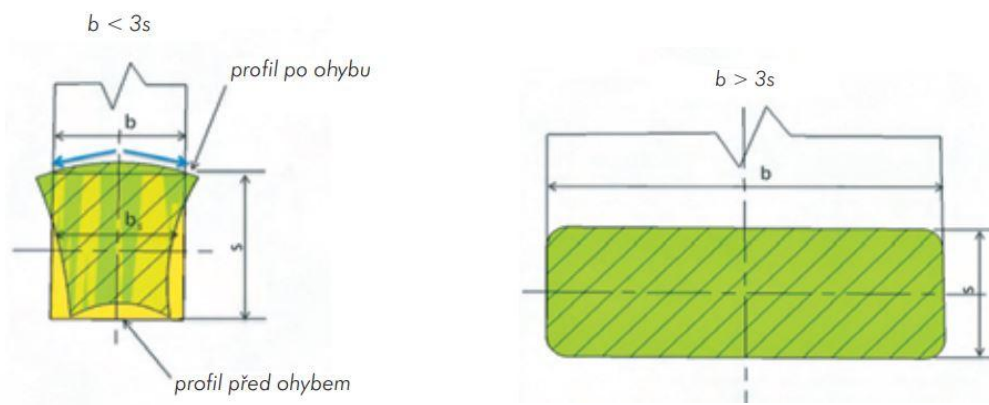
Délku oblouku uvažovaného ohybu je možné stanovit ze vztahu:

$$L_0 = \frac{\pi \rho \alpha}{180} \quad (4)$$



Obr. 2.6 Posunutí neutrální osy v místě ohybu [11]

V případě ohybu úzkého polotovaru, kde je $b \leq 3s$, dochází k deformaci příčného průřezu za vzniku rovinné napjatosti. Pro široké polotovary, kde je $b \geq 3s$, se deformace v příčném průřezu se zřetelem na jeho šířku neprojevuje, napjatost prostorová. Je to způsobeno tím, že proti deformacím v příčném směru působí odpor materiálu velké šířky vzhledem k jeho malé tloušťce [1].

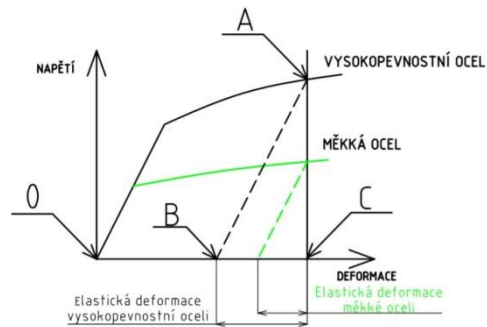


Obr. 2.7 Deformace úzkého a širokého polotovaru

2.2.5 Odpružení

Odpružení je nežádoucí dodatečná deformaci výlisku, vznikající relaxací napětí po odlehčení výlisku ve tvářecím nástroji. Určující vliv na velikost odpružení má velikost elastické deformace. Na Obr. 2.8 je naznačena problematika odpružení na různých materiálech s odlišnými mechanickými vlastnostmi. Ohýbaný materiál je zatěžován do oblasti plastických deformací, charakterizovaných zpevňující křivkou (OA). Po uvolnění tvářecích nástrojů se

pohybujeme po křivce AB, nikoliv k nulovému napětí po křivce AC. Odpružení je pak charakterizováno rozdílnou velikostí deformace na vodorovné ose, například pro vysokopevnostní ocel mezi body BC. Z diagramu je tedy vidět, že lisovaný materiál má určující vliv na velikost odpružení. Toto ovšem není jediný faktor, který ovlivňuje velikost odpružení při výrobě výlisků, dalšími vlivy jsou pružnosti v tahu, konstrukční řešení nástroje, podmínky tváření, symetrie a tvarová složitost součásti, výsledné rozložení zbytkových napětí atd. [2].

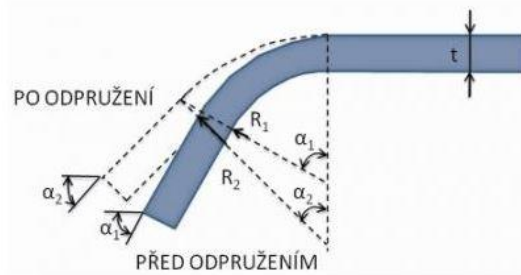


Obr. 2.8 Diagram pro dva rozdílné materiály [2]

2.2.6 Typy odpružení plošného tváření

Úhlová změna

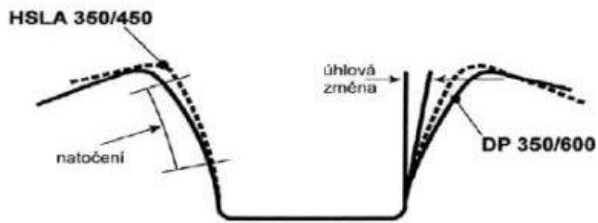
Úhlová změna je definována jako úhlový rozdíl součásti před odlehčením nástroje a po odlehčení nástroje tvářecí síly. Je způsobena ohybovým momentem, který vyvolává rozdíl napětí ve směru tloušťky plechu během ohýbání přes poloměr ohybu. Představuje základní typ odpružení a následkem toho druhu odpružení je zvětšení poloměru ohybu [2].



Obr. 2.9 Úhlová změna [2]

Natočení boční stěny

Natočení boční stěny vzniká na boční stěně profilu, která se zakříví. Tato vada vzniká jako následek tažení tažnou drážkou nebo při tažení plechu přes poloměr tažnice. Jeho příčinou je nerovnoměrné rozdělení napětí nebo napěťový gradient v tloušťce plechu [2].



Obr. 2.10 Natočení boční stěny [2]

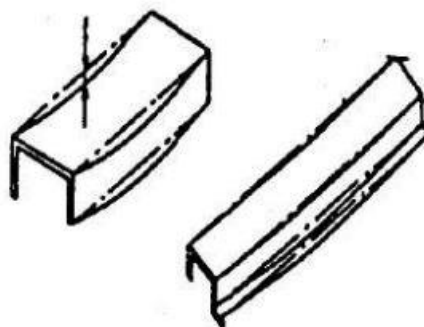
Natočení

Natočení neboli twist je vzájemné pootočení dvou příčných řezů (obvykle voleny z opačných konců součásti). Vada se projevuje úhlovou změnou, při které může nastat posun průřezu. Natočení vzniká jako následek zbytkového pnutí ve výlisku, které je nevyvážené. Tento efekt způsobuje krouticí moment vznikající v bočních stěnách součásti, v přírubách nebo v obou současně. Velikost natočení ovlivňuje torzní tuhost výlisku daná jeho tvarem, nevhodná volba přístřihu či rozdílné tlaky přidržovačů po stranách. Ve většině případech se vyskytuje právě u dlouhých tenkých výlisků, které se vyznačují malou torzní tuhost. Jednou z možností eliminace tohoto druhu odpružení jsou prolisy a výztužná žebra [2].

Zkřivení hrany

U této vady se zkřivuje hrana ohýbané součásti vůči hraně nástroje. Příčiny vzniku zkřivení hrany jsou podobné jako u vady natočení. Zde ovšem změnu nezpůsobuje krouticí moment, ale ohybový moment v rovině, která je kolmá na průřez. Odpružení nastane jako následek rozdílu tažných poměrů na kraji a uprostřed boční stěny součásti [2].

Zkřivení hrany se často vyskytuje v kombinaci s natočením, protože je málo pravděpodobné, aby nevyrovnanost zbytkového napětí byla stejná v obou bočních stěnách. Možnost eliminace je vhodná volba geometrie součásti s výstužnými prvky, které zvyšují tuhost v ohybu. Dále pak zajištění takových podmínek mazání a jakosti povrchu, které toto odpružení snižují [9].



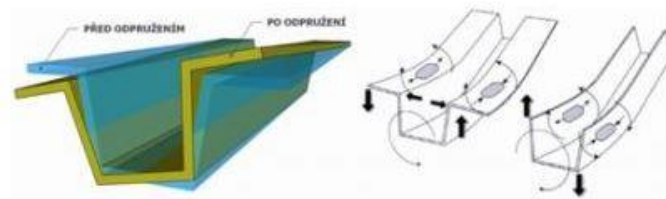
Obr. 2.11 Zkřivení hrany [2]

Zkroucení povrchu

Zkroucení povrchu je vada, která nastává na povrchu plechu po tváření, jedná se o místní vybočení. Tyto defekty vznikají z lokální reakce na pnutí v materiálu v průběhu tváření. Obvyklým případem jsou místní výstupky a prohlubně [2].

Celková změna tvaru

Celková změna tvaru je typ odpružení, který se projevuje komplexní změnou tvaru součásti. Po odlehčení nástroje výlisek změnil svůj tvar. Dalo by se říci, že představuje kombinaci několika předchozích typů odpružení současně. Projevuje se obvykle při lisování tvarově složitějších výlisků větších rozměrů [2].



Obr. 2.12 Celková změna tvaru [2]

2.2.7 Praskání a tvorba vln

Praskání a tvorba vln je další problematikou tváření. K praskání materiálu, tedy vzniku trhlin na vnější straně, dochází tehdy, kdy dojde k překročení kritické hodnoty poloměru ohybu R/s , což může být způsobeno zpevněním materiálu, stavem materiálu, jak byl zpracován, či za jakých podmínek je tvářený, například žíhaný, tvářený za studena apod. Též to může být průběhem vláken. Osa ohybu by měla být kolmá na směr vláken materiálu nebo minimálně pod úhlem 30° . Zvětší se nám ovšem odpružení [3].

Při návrhu ohýbaných dílů je třeba klást důraz na požadavky hodnot poloměrů ohybu. Poloměr ohybu musí být minimálně takový, aby v krajních vláknech došlo k plastické deformaci, překročení meze kluzu. Je potřeba dávat pozor na to, aby nebyla překročena hodnoty meze pevnosti, tudíž poloměr nesmí být ani příliš malý. Poloměr ohybu se má volit co nejmenší s ohledem na následné odpružení, ale co největší vzhledem k tvárnosti a tloušťce ohýbaného materiálu. Jinak může docházet k destrukci v ohýbaném průřezu [3].

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V experimentální části práce se zabývám porovnáním velikostí odpružení reálných vzorků vůči numerické simulaci. Vše probíhá při stejně nastavených okrajových podmínkách a parametrech, jako je například velikost vzorku, vzdálenost podpor, rychlost a délka posuvu trnu při ohýbání atd. Pro vyhodnocení praktické části volím software Solidworks, kde je možné načíst jak simulační výstupy, tak i výstupy z reálného měření. Vyhodnocení numerické simulace jsem vytvořila přes souřadnicový systém jednoduchou goniometrickou funkcí. Následně je vzorky potřeba porovnat vizuálně překryvem obou obrázků. Podrobnější popis experimentu je rozveden v dalších kapitolách.

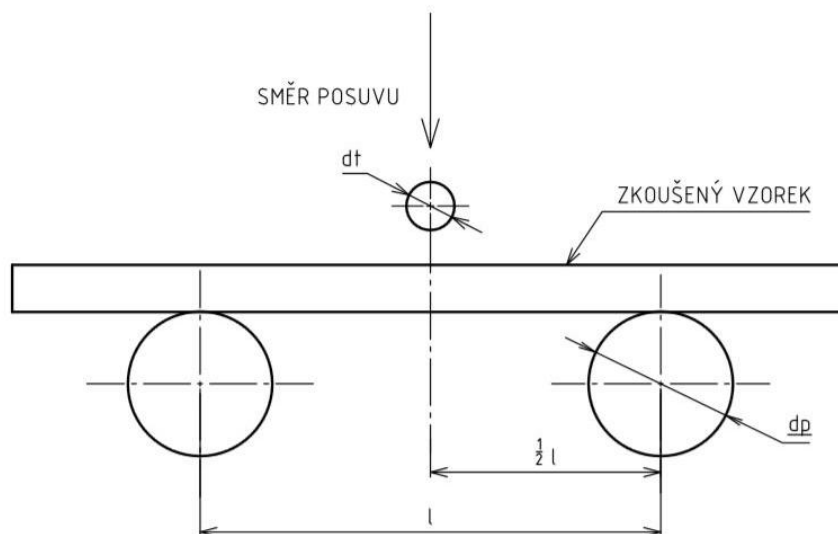
3.1 Návrh a popis experimentu

Pro způsob zkoušky technologii tváření ohybem volím co nejjednodušší aplikaci a to tříbodový ohyb. Důvodem této volby je snaha dosáhnout co nejlepších výsledků, jak z praktické části experimentu, tak z numerické simulace.

Návrh experimentu ohybem je znázorněn na Obr. 3.1, kde je trn o průměru 10 mm a dvě podpěry o průměru 30mm. Posuv trnu volím v krocích po pěti milimetrech až do třiceti milimetrů, tedy 5 mm, 10 mm, 15 mm atd.

Tabulka 2 Parametry tříbodového ohybu:

l_1 [mm]	160
l_2 [mm]	80
d_p [mm]	30
d_t [mm]	10
v [mm/s]	20



Obr. 3.1 Tříbodový ohyb

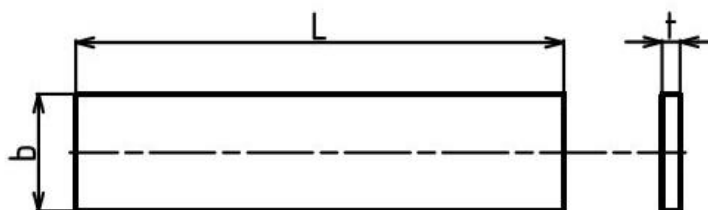
Jako zkušební vzorek, který je použit jako model pro numerickou simulaci i reálný experiment, volím rozměry následovně:

$$L = 270 \text{ mm}$$

$$b = 50 \text{ mm}$$

$$t_1 = 10 \text{ mm}$$

$$t_2 = 0,6 \text{ mm}$$



Obr. 3.2 Tvar vzorku

3.1.1 Materiál

Pro vyhodnocení experimentu volím dva druhy materiálu, jak je zmíněno v popisu experimentu. Prvním materiálem je martenzitická korozivzdorná ocel, která je podle DIN EN označena jako: X3CrNi134. Jedná se o plech válcovaný za tepla a jeho tloušťka je 10 mm [10].

Tabulka 3 Mechanické vlastnosti materiálu [9]

Třída oceli	Mez kluzu	Mez pevnosti	Tažnost	Modul pružnosti	Nárazová práce
	$R_{p\ 0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} mm [%]	E [GPa]	KV [J]
X3CrNiMo13-4 / X4CrNi134	650	780-980	14	200	70

Tabulka 4 Chemické složení materiálu [9]

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	N
$\leq 0,05$	$\leq 0,7$	$\leq 1,5$	$\leq 0,04$	$\leq 0,015$	12,0-14,0	0,3-0,7	3,5-4,5	$\geq 0,02$

Druhým materiálem je ocel DP500, která je dle VDA 293-100 označena jako: CR290Y490T-DP, dle DIN EN HCT500X. Povrchová úprava je dle VDA 239-100: GI 40/40-E, tedy žárově pozinkovaná ocel, dle DIN EN se značí Z100. Vrstva povrchové úpravy se pohybuje mezi 5-8,5 μm na každé straně. Tloušťka toho materiálu je 0,6 mm.

Tabulka 5 Mechanické vlastnosti materiálu

Třída oceli	Mez kluzu	Mez pevnosti	Tažnost	Exponent deformačního zpevnění	Bake hardening
	R _{p 0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A ₈₀ mm [%]	n _{10-20/Ag}	BH ₂ [MPa]
CR290Y490T-DP (DP500)	290-380	490-600	≥ 24	≥ 0,15	≥ 30

Tabulka 6 Chemické složení materiálu

C	Si	Mn	P	S	Al	Ti+Nb	Cr+Mo	B	Cu
≤ 0,14	≤ 0,50	≤ 1,80	≤ 0,050	≤ 0,010	0,015-1,0	≤ 0,15	≤ 1,00	≤ 0,005	≤ 0,20

3.1.2 Zkušební zařízení

Pro vyhodnocení reálného experimentu, tzn. zkouška tříbodovým ohybem, volím použití univerzálního elektromechanického zkušebního stroje od společnosti LABORTECH s.r.o. (Obr. 3.3), který se nachází v laboratoři na FS ČVUT v Praze. Na tomto stroji lze provádět testování materiálu v tahu, tlaku, ohybu, krutu, odlupovací, odtrhávací, penetrační a třecí zkoušky ve statickém a dynamickém namáhání vzorků a celých výrobků [9].

Popis zařízení:

- Digitální elektromechanický dvousloupový stroj
- Zatížení do 100 kN
- Stožanové provedení s možností variabilní šířky a výšky
- Dva pracovní prostory
- Vhodný pro testování pružin
- Nadčasová konstrukce
- Rozlišení polohy příčnicku 1 μm
- Elektronická a mechanická ochrana proti přetížení
- Podpora norem ČSN, DIN, EN, ISO, ASTM, GOST [9]

Tabulka 7 Technické údaje stroje [9]

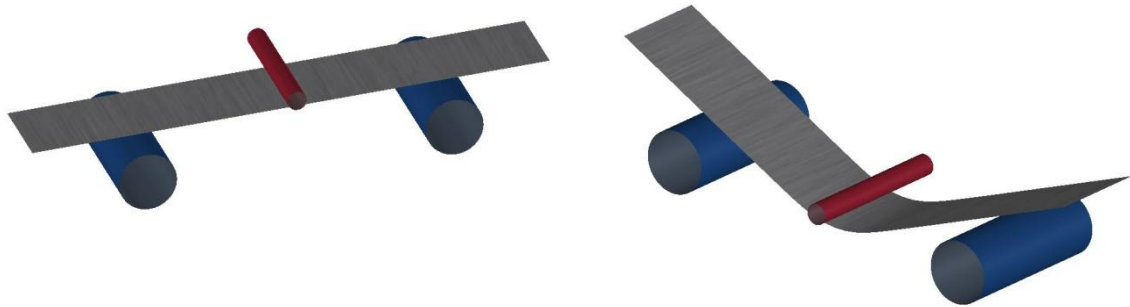
Typ stroje - model		5.100SP1
Jmenovité zatížení tah/tlak	kN	100
Minimální zkušební rychlost	mm/min	0,001
Maximální zkušební rychlost	mm/min	600
Návratová rychlost	mm/min	600
Přesnost řízení rychlosti	%	±0,5
Rozlišení polohy příčnicku	μm	1
Opakovatelnost změny	μm	2
Rozměry stroje A x B x C	mm	2373x920x880
Rozměry stroje D x E x F x G	mm	400x1130x125x1570
Hmotnost stroje	Kg	688
Tuhost rámu	mm/N	3,4x10 ⁻⁷
Barevná úprava	RAL	RAL 9005, eloxovaný hliník
Teplota pracovního prostředí	°C	10 až 35
Vlhkost pracovního prostředí	%	20 až 70
Napájecí napětí	V	3x230V/400V 50/60Hz
Příkon stroje	VA	2200



Obr. 3.3 Univerzální zkušební stroj LabTest 5.100SP1

3.1.3 Numerická simulace

Pro vytvoření numerické simulace vybírám software AutoForm, který nabízí softwarová řešení pro odvětví tváření a tváření plechů. Poskytuje řešení v průběhu celého procesu. Tento program se vyznačuje vysokou rychlostí počítání numerických simulací a jejich přesností. Jeho uživatelské rozhraní je intuitivní. Další výhodou je kompatibilita se všemi hlavními CAD systémy a je optimalizován pro standardní počítačové systémy, tudíž není potřeba speciálních hardwarových požadavků [12].



Obr. 3.4 Numerická simulace

3.2 Vyhodnocení experimentu

Jak je zmíněno v popisu experimentu, tak v první části jsem se zabývala martenzitickou korozivzdornou ocelí, a následně stejný experiment proběhl pro ocel DP500. V následujících podkapitolách shrnuji jednotlivé výsledky.

3.2.1 Vyhodnocení martenzitické korozivzdorné oceli

Výsledky martenzitické korozivzdorné ocele jsem zpracovala pro posuv trnu od 5 mm až do 30 mm. Vzdálenost podpor u všech vzorků byla 160 mm. Tloušťka materiálu byla 10 mm.

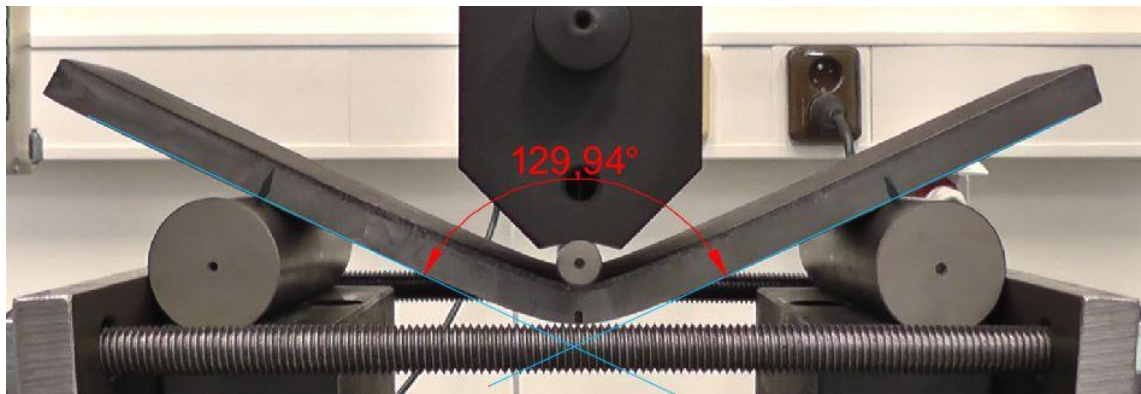
Praktická část experimentu

Z diplomové práce Ing. Jana Müldnera byla převzata pouze část experimentu. Tato část je potřebná ke zhodnocení odpružení martenzitické korozivzdorné ocele. V níže uvedené Tabulce 8 je popsán úhel ohybu před a po odpružení a na Obr. 3.5 je konkrétní příklad ohybu při zatížení a následující Obr. 3.6 znázorňuje ten samý případ po odlehčení nástrojů. Pro oba obrázky je posuv trnu 30 mm.

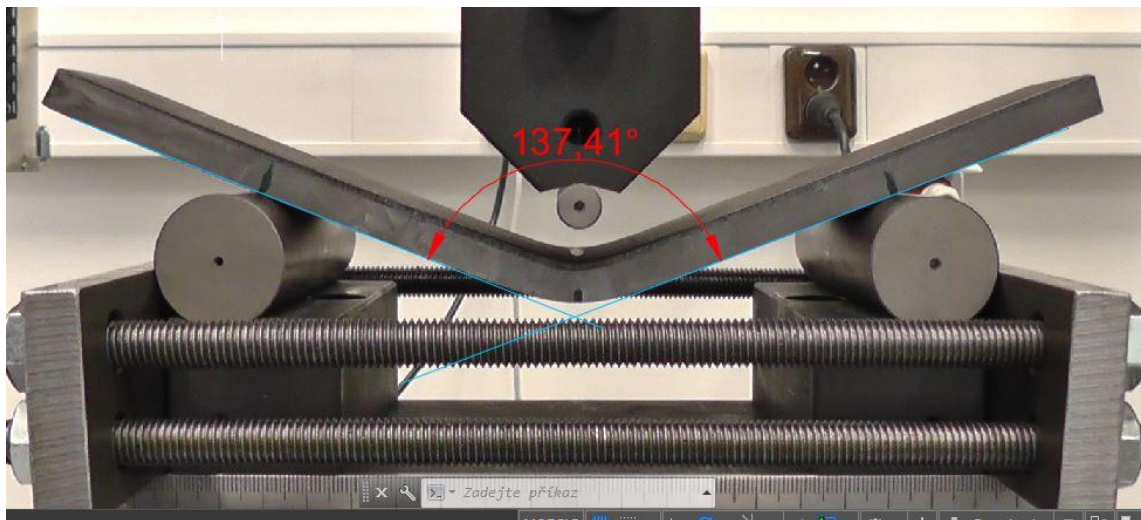
Vyhodnocení v tomto případě probíhalo prolnutím přímek v programu CAD - Solidworks. Nakreslením přímky podél hrany plechu a vynesení úhlové kóty byl zjištěn úhel ohybu pro oba případy - tedy před a po odpružení tlustého plechu.

Tabulka 8 Naměřené hodnoty - vzorek tloušťky 10 mm [9]

Posuv trnu [mm]	Úhel při zatížení B_1 [°]	Úhel po odlehčení B_2 [°]	Úhel odpružení α [°]
5	171,27	177,49	3,11
10	162,63	169,42	3,40
15	154,15	161,10	3,47
20	145,71	152,98	3,63
25	137,58	144,75	3,58
30	129,94	137,41	3,74



Obr. 3.5 Zatížený stav - posuv 30mm [9]



Obr. 3.6 Odlehčený stav - posuv 30 mm [9]

Numerická simulace ohybu

Numerické simulace jsem vyhodnotila pomocí souřadnicového systému. Pro výpočet úhlu jsem zvolila dva body, které se nacházely na volném rameni za podpěrou, ukázáno na Obr. 3.7. Tyto souřadnice jsem odečetla a z nich vypočítala výsledný úhel pomocí goniometrické funkce tangens.

Teoretický výpočet:

$$\Delta y = y_1 - y_2 \quad (5)$$

$$\Delta z = z_1 - z_2 \quad (6)$$

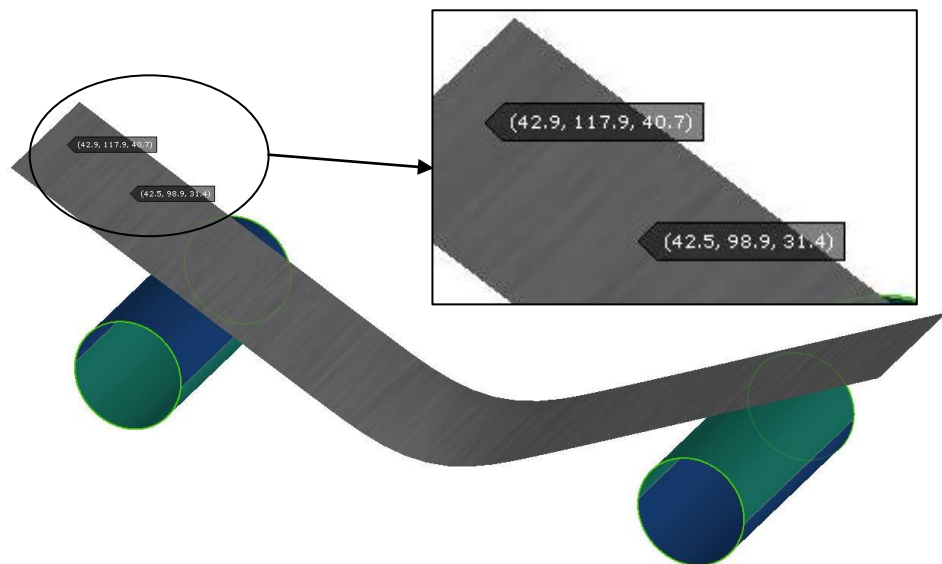
$$\tan \phi = \frac{\Delta y}{\Delta z} \rightarrow \phi = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta y}{\Delta z} \right) \quad (7)$$

$$\beta = 2 \cdot \phi \rightarrow \text{výsledný úhle ohybu} \quad (8)$$

Příklad vzorku posuvu 30 mm při zatížení:

Tabulka 9 Výpočet úhlu

	1	2	Δ		ϕ [°]	β [°]
y	117,9	98,9	19	→	63,92	127,84
z	40,7	31,4	9,3			

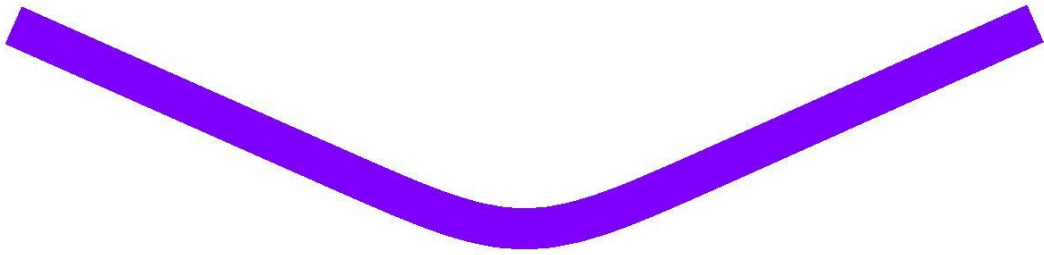


Obr. 3.7 Určení souřadnic bodů z výsledků simulace

Tabulka 10 Naměřené hodnoty - vzorek tloušťky 10 mm

Posuv trnu [mm]	Úhel při zatížení β_1 [°]	Úhel po odlehčení β_2 [°]	Úhel odpružení α [°]
5	171,32	174,56	1,62
10	162,91	166,43	1,76
15	153,93	157,60	1,83
20	145,19	149,18	2,00
25	136,71	140,81	2,05
30	127,84	132,51	2,33

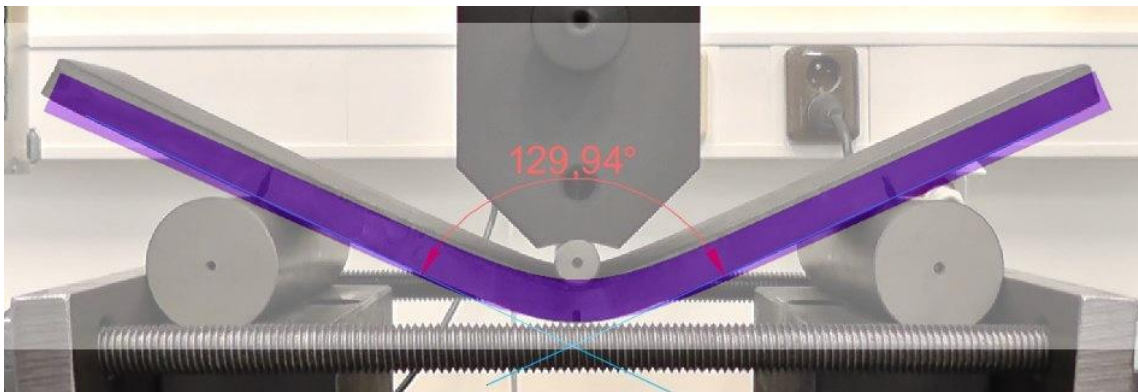
Na Obr. 3.8 je znázorněn výsledek numerické simulace, kde je vzorek v zatíženém stavu při posuvu trnu 30 mm. Více v příloze 2.



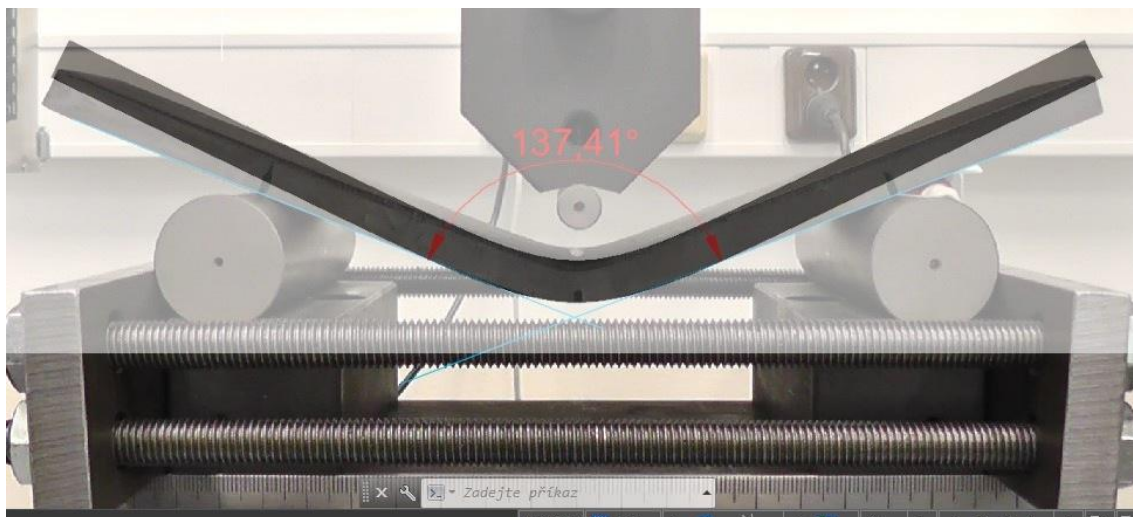
Obr. 3.8 Zatížený stav numerické simulace - posuv 30 mm - tloušťka 10 mm

Obrazové porovnání

Obrazové porovnání jsem vytvořila prolnutím dvou obrázků do jednoho ve stejném měřítku, aby byly kompenzovány geometrické nepřesnosti, které by mohly způsobit chybné vyhodnocení. Z důvodu eliminace dalších rizik pro správné vyhodnocení, musela jsem dále provést co nejlépe překrytí osy ohybu porovnávaných výstupů.



Obr. 3.9 Zatížený stav - porovnání obou částí pro vzorek tloušťky 10mm



Obr. 3.10 Odlehčený stav - porovnání obou částí pro vzorek tloušťky 10mm

Shrnutí výsledků martenzitické korozivzdorné oceli

Z naměřených hodnot praktické části a numerických simulací mi vyšlo, že v tomto případě numerickou simulaci pro výpočet odpružení nelze použít. Již na Obr. 3.9 vidím poměrně značný rozdíl, jak probíhá odpružení v praxi a jak u numerické simulace. V praxi se vzorek odpružil mnohem více. Z porovnání výsledných hodnot z Tabulek 8 a 10 vyplývá, že rozdíl úhlů při zatížení není tak velký než rozdíl úhlů po odlehčení. Následkem tohoto výsledku může být hned několik příčin. První příčinou může být samotný program numerické simulace, který je vytvořen převážně pro simulace karosářských plechů, tedy pro úzké plechy. Dalším aspektem nesprávného výpočtu simulace je přesnost materiálového modelu, který byl pro tento účel použit. V neposlední řadě hraje určitou roli i metoda odměření úhlů z praktické části, kde by bylo pro přesné vyhodnocení potřeba využít optického snímacího systému.

3.2.2 Vyhodnocení ocele DP500

Po vyhodnocení experimentu, kde byl použit vzorek o tloušťce 10 mm z martenzitické korozivzdorné ocele, jsem se rozhodla pro vytvoření dalšího experimentu pro jiný materiál, který jsem zvolila tak, aby se co nejvíce eliminovaly chyby z předchozího experimentu.

Pro tento experiment volím jiný materiálový model - DP500, tloušťky 0,6 mm. Vzájemná vzdálenost podpor pro zkoušku ohybem je 160 mm a 80 mm.

Praktická část experimentu

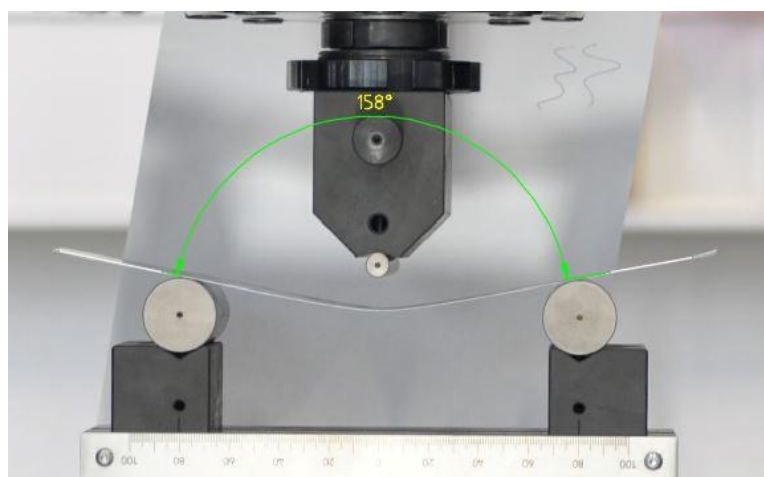
Pro tuto část jsem zvolila pouze hodnoty posuvu trnu 5 mm, 15 mm a 30 mm. V Tabulce 11 jsou výsledky úhlů pro vzdálenost podpor 160 mm a v Tabulce 12 je vyhodnocení úhlů pro vzdálenost podpor 80 mm. Při vyhodnocování jsem postupovala stejně jako u martenzitické korozivzdorné ocele. Na Obr. 3.11 je příklad vzorku na podporách 160 mm, s posuvem trnu 30 mm a s vynesným úhlem. Více v příloze 1.

Tabulka 11 Naměřené hodnoty vzorek tloušťky 0,6 mm, podpory 160 mm

Posuv trnu [mm]	Úhel při zatížení β_1 [°]	Úhel po odlehčení β_2 [°]	Úhel odpružení α [°]
5	169,03	177,37	4,17
15	149,07	173,74	12,34
30	122,95	158,18	17,62

Tabulka 12 Naměřené hodnoty vzorek tloušťky 0,6 mm, podpory 80 mm

Posuv trnu [mm]	Úhel při zatížení β_1 [°]	Úhel po odlehčení β_2 [°]	Úhel odpružení α [°]
5	160,75	175,75	7,50
15	126,48	146,44	9,98
30	83,49	107,15	11,83



Obr. 3.11 Odlehčený stav - posuv 30 mm - podpory 160 mm

Numerická simulace ohybu

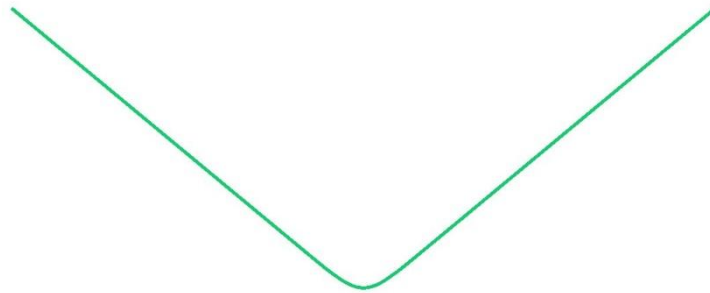
Shodně, jako u praktické části, jsou v Tabulkách 13 a 14 naměřené hodnoty úhlů pro posuv trnu 5 mm, 15 mm a 30 mm. Na Obr. 3.12 jsem vybrala ukázkou z numerické simulace vzorku po odlehčení se vzdáleností podpory 80 mm a s posuvem trnu 30 mm. Více v příloze 2.

Tabulka 13 Naměřené hodnoty vzorek tloušťky 0,6 mm, podpory 160 mm - simulace

Posuv trnu [mm]	Úhel při zatížení β_1 [°]	Úhel po odlehčení β_2 [°]	Úhel odpružení α [°]
5	169,26	179,64	5,19
15	150,10	173,49	11,70
30	125,79	153,10	13,66

Tabulka 14 Naměřené hodnoty vzorek tloušťky 0,6 mm, podpory 80 mm - simulace

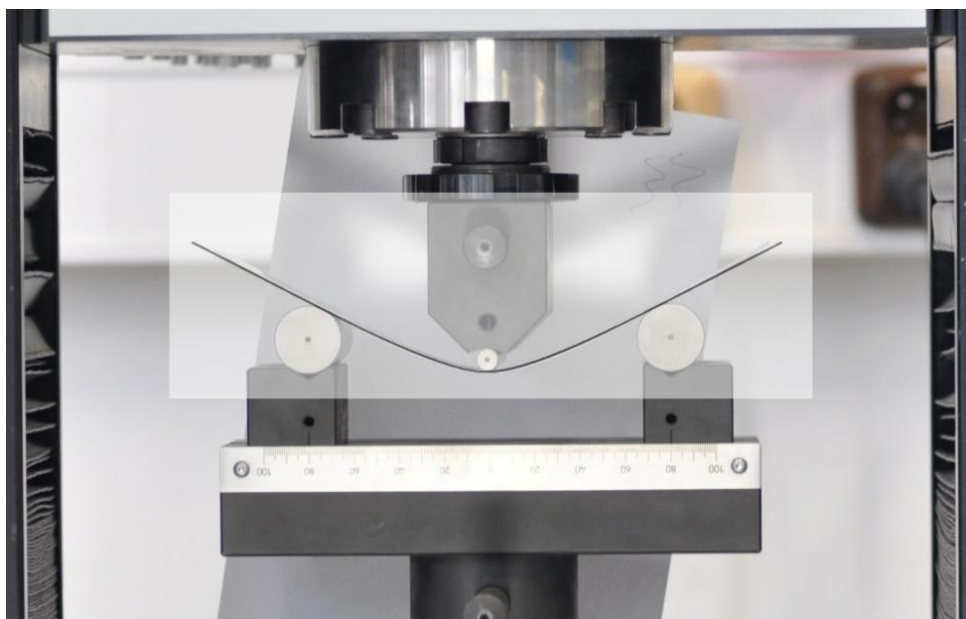
Posuv trnu [mm]	Úhel při zatížení β_1 [°]	Úhel po odlehčení B_2 [°]	Úhel odpružení α [°]
5	160,75	171,83	5,54
15	127,01	144,30	8,65
30	83,97	100,52	8,28



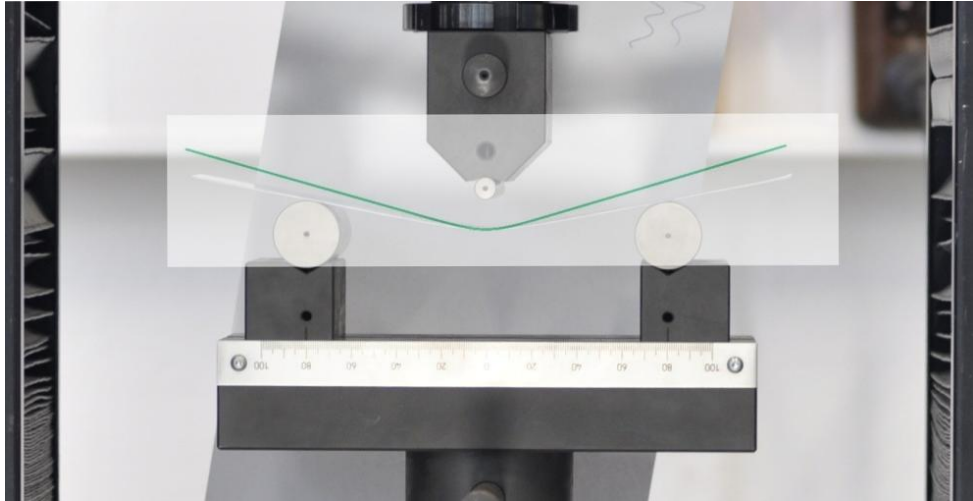
Obr. 3.12 Odlehčený stav numerické simulace - posuv 30 mm - tloušťka 0,6 mm

Obrazové porovnání

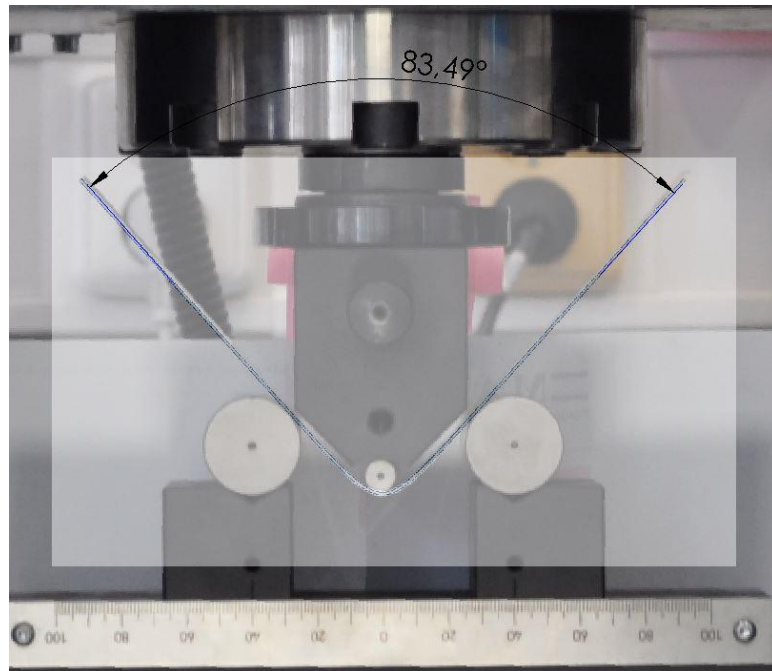
Opět jsem vytvořila prolnutí numerické simulace vůči reálnému vzorku. Měřítka obrázků byla nastavena stejně a snažila jsem se znovu co nejlépe překrýt osy ohybu. Obr. 3.13 a 3.14 zobrazuje porovnání vzorků na vzdálenosti podpor 160 mm. Vzdálenost podpor 80 mm je zobrazen na Obr. 3.15 a 3.16.



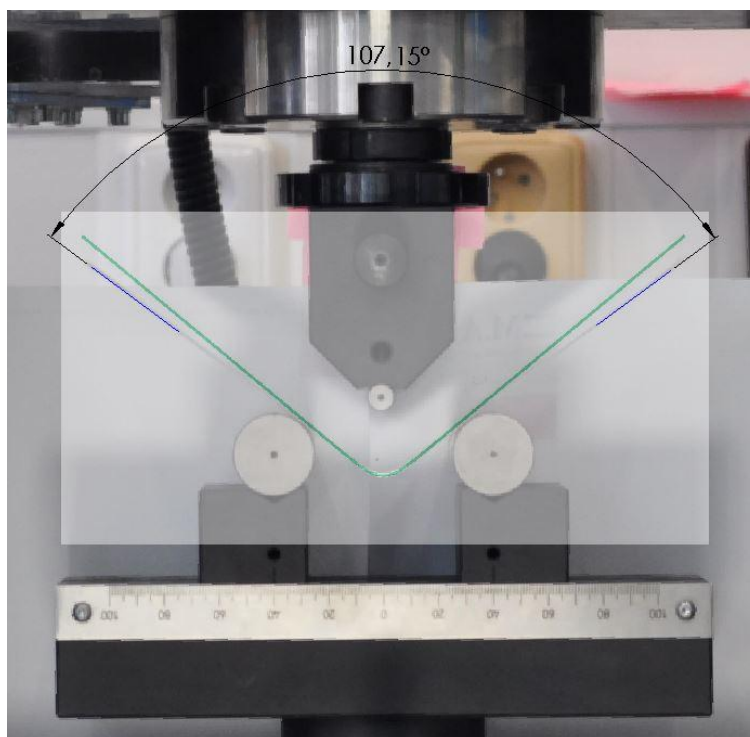
Obr. 3.13 Zatížený stav - porovnání vzorku tloušťky 0,6 mm - podpory 160 mm



Obr. 3.14 Odlehčený stav - porovnání vzorku tloušťky 0,6 mm - podpory 160 mm



Obr. 3.15 Zatížený stav - porovnání vzorku tloušťky 0,6mm - podpory 80 mm



Obr. 3.16 Odlehčený stav - porovnání vzorku tloušťky 0,6 mm - podpory 80 mm

Shrnutí výsledků materiálu DP500

Z naměřených hodnot numerické simulace a praktické části můžeme konstatovat, že pro zatížený stav je rozdíl velmi malý. U vzdálenosti podpor 80 mm se výsledky liší maximálně o 0,5°, což může být způsobeno metodou měření úhlů. Při vizuálním porovnání na Obr. 3.15 není vidět žádná odchylka. Pro vzdálenost podpor 160 mm výsledky vyšly o něco hůře, zde již na posuvu trnu 30 mm je rozdíl necelé 3°. To je i vidět na Obr. 3.13. Ovšem problém nastal po odpružení, kde u obou vzdáleností podpor je rozdíl výrazný. Jak na Obr. 3.14, tak i na Obr. 3.16 je jasně vidět, že ramena obou vzorků jsou pod jiným úhlem.

4 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo verifikovat odpružení tlustých ocelových plechů pomocí jednoduchého experimentu, kterým byl zvolen tříbodový ohyb. V práci jsem se zabývala ohybem a problematikou, která s tím souvisí. Samotný experiment jsem rozdělila na dvě části, a to na verifikaci odpružení martenzitické korozivzdorné ocele a na verifikaci odpružení ocele DP500. Druhým experimentem jsem ověřovala správnost počítání softwaru.

V teoretické části jsem rozebírala problematiku technologie tváření. Provedla jsem základní rozdělení a dále jsem se zabývala ohybem. Důležitá část je popsána v podkapitole 2.2.5, která popisuje problematiku odpružení při ohýbání a rozdíl mezi odpružením měkké ocele a vysokopevnostní ocele. Tato problematika úzce souvisí se zbytkovou elastickou deformací v materiálu.

V první části experimentu jsem vytvořila pouze numerickou simulaci pro daný plech, protože reálný experiment byl již součástí diplomové práce pana Ing. Jana Müldnera, odkud jsem použila naměřené hodnoty. Porovnáním těchto výsledků jsem došla k závěru, že pro daný materiál nelze použít numerickou simulaci k výpočtu odpružení tlustého plechu. Hodnoty z praktické části experimentu a z numerické simulace se liší již v zatíženém stavu vzorku a po odlehčení se rozdíl ještě zvýší. Faktory špatného výpočtu numerické simulace může být hned několik. Prvním a velmi zásadním problémem může být právě tloušťka plechu, protože software pro výpočet numerické simulace je vytvořen především pro simulace karosářských plechů, tudíž pro úzké plechy. Dalším zásadním faktorem ovlivnění výsledků může být nepřesný materiálový model, který byl pro tento experiment použit.

Druhá část experimentu jsem provedla pro takový materiál, který zaručoval vhodnou tloušťku materiálu pro daný software a byl znám i přesný materiálový model. Zde jsem již provedla jak praktickou část, tak i numerickou simulaci. Výsledky ovšem ukázaly, že výpočet odpružení numerické simulace neodpovídá reálnému experimentu. Ve stavu před odlehčením byly výsledky naměřených úhlů, až na pár odchylek, stejné. Ovšem po odlehčení se výsledky lišily až o sedm stupňů, což byl velmi překvapivý výsledek.

Nyní je potřeba se zabývat otázkou, proč k takto rozdílným výsledkům došlo. V první části experimentu není až tak překvapivé, že výpočty z numerické simulace nesedí s výsledky z reálného experimentu. Některé okrajové podmínky nebylo možné zadat do numerické simulace přesně tak, aby odpovídaly výsledkům z diplomové práce Ing. Jana Müldnera (například popis materiálového modelu). Ovšem proč výsledky experimentu v takové míře neodpovídají výpočtům odpružení, je námětem k provedení dalších zkoušek a porovnání. Jedna z možných příčin se může vyskytovat v samotné stavbě simulačního softwaru, především ve způsobu možností výpočtu odpružení. Bylo by vhodné tuto problematiku dále řešit s vývoji toho softwaru.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DVOŘÁK, Roman, František TATÍČEK, Tomáš PILVOUSEK, Roman HALTUF a Luděk FINDA. AKADEMIE TVÁŘENÍ: OHÝBÁNÍ [online]. July, August 2010, 52, 53, 54 [cit. 2018-05-31]. Dostupné z:
[https://www.mmspektrum.com/content/100716_Akademie_tva%C5%99eni_oh%C3%BDb%C3%A1n%C3%AD\(1\).pdf](https://www.mmspektrum.com/content/100716_Akademie_tva%C5%99eni_oh%C3%BDb%C3%A1n%C3%AD(1).pdf)
- [2] DVOŘÁK, Roman, František TATÍČEK, Martin KUBELKA a Luděk FINDA. Akademie tváření: Odpružení v plošném tváření [online]. Praha: ČVUT, FS [cit. 2018-05-31]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-odpruzeni-v-plosnem-tvareni.html>
- [3] DVOŘÁK, Roman, Martin OUŠKA a Lukáš TURZA. *Akademie tváření: Technologičnost konstrukce při ohýbání* [online]. Praha: ČVUT, FS [cit. 2018-05-31]. Dostupné z:
<https://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-odpruzeni-v-plosnem-tvareni.html>
- [4] NOVOTNÝ, Jiří, Jan ŠANOVEC, Bohumír BEDNÁŘ a Viktor KREIBICH. *Technologie 1: Slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy*. Dotisk 2.vyd. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-02351-6.
- [5] HOFMAN, Jan. *Současná tendence při práci s plechy a kovy?: Automatizace procesů* [online]. [cit. 2018-05-31]. Dostupné z:
<https://www.mmspektrum.com/clanek/soucasna-tendence-pri-praci-s-plechy-a-kovy-automatizace-procesu.html>
- [6] *Vysokopevnostní a otěruvzdorné plechy* [online]. [cit. 2018-05-31]. Dostupné z:
<http://www.salzgitter.cz/index.php?page=40>
- [7] ČADA, Radek. *Technologie 1: Studijní opora* [online]. Ostrava - Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2007 [cit. 2018-05-31]. Dostupné z:
<http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/TECH1/Technologie-I.pdf>
- [8] *Technologie tváření kovů* [online]. Liberec [cit. 2018-05-31]. Dostupné z:
http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm
- [9] MÜLDNER, Jan. *Chování materiálu při stříhání a ohýbání plechů o větších tloušťkách*. Praha, 2014. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. František Tatíček.
- [10] *OVMT Mechanické zkoušky* [online]. Praha [cit. 2018-05-31]. Dostupné z:
<http://docplayer.cz/41155-Ovmt-mechanicke-zkousky.html>

- [11] *Technologie plošného tváření – ohýbání* [online]. Liberec [cit. 2018-05-31]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/07.htm
- [12] *AutoForm Solution Overview* [online]. [cit. 2018-05-31]. Dostupné z: <https://www.autoform.com/en/products/solution-overview/>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Plastická deformace skluzem [7].....	10
Obr. 2.2 Plastická deformace dvojčatěním [7].....	10
Obr. 2.3 Pracovní diagram s nevýraznou mezí kluzu $R_{p0,2}$ [10].....	12
Obr. 2.4 Ohyb do tvaru V [11].....	13
Obr. 2.5 Rozložení a velikost napětí v ohýbaném materiálu [11].....	14
Obr. 2.6 Posunutí neutrální osy v místě ohybu [11].....	15
Obr. 2.7 Deformace úzkého a širokého polotovaru.....	15
Obr. 2.8 Diagram pro dva rozdílné materiály [2].....	16
Obr. 2.9 Úhlová změna [2].....	16
Obr. 2.10 Natočení boční stěny [2].....	17
Obr. 2.11 Zkřivení hrany [2].....	17
Obr. 2.12 Celková změna tvaru [2].....	18
Obr. 3.1 Tříbodový ohyb.....	19
Obr. 3.2 Tvar vzorku.....	20
Obr. 3.3 Univerzální zkušební stroj LabTest 5.100SP1.....	22
Obr. 3.4 Numerická simulace.....	23
Obr. 3.5 Zatížený stav - posuv 30mm [9].....	24
Obr. 3.6 Odlehčený stav - posuv 30 mm [9].....	24
Obr. 3.7 Určení souřadnic bodů z výsledků simulace.....	25
Obr. 3.8 Zatížený stav numerické simulace - posuv 30 mm - tloušťka 10 mm.....	26
Obr. 3.9 Zatížený stav - porovnání obou částí pro vzorek tloušťky 10mm.....	26
Obr. 3.10 Odlehčený stav - porovnání obou částí pro vzorek tloušťky 10mm.....	27
Obr. 3.11 Odlehčený stav - posuv 30 mm - podpory 160 mm.....	28
Obr. 3.12 Odlehčený stav numerické simulace - posuv 30 mm - tloušťka 0,6 mm.....	29
Obr. 3.13 Zatížený stav - porovnání vzorku tloušťky 0,6 mm - podpory 160 mm.....	29
Obr. 3.14 Odlehčený stav - porovnání vzorku tloušťky 0,6 mm - podpory 160 mm.....	30
Obr. 3.15 Zatížený stav - porovnání vzorku tloušťky 0,6mm - podpory 80 mm.....	30
Obr. 3.16 Odlehčený stav - porovnání vzorku tloušťky 0,6 mm - podpory 80 mm.....	31

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Hodnoty součinitele x [11].....	14
Tabulka 2 Parametry tříbodového ohybu:	19
Tabulka 3 Mechanické vlastnosti materiálu [9]	20
Tabulka 4 Chemické složení materiálu [9]	20
Tabulka 5 Mechanické vlastnosti materiálu.....	21
Tabulka 6 Chemické složení materiálu.....	21
Tabulka 7 Technické údaje stroje [9]	22
Tabulka 8 Naměřené hodnoty - vzorek tloušťky 10 mm [9]	24
Tabulka 9 Výpočet úhlu.....	25
Tabulka 10 Naměřené hodnoty - vzorek tloušťky 10 mm.....	25
Tabulka 11 Naměřené hodnoty vzorek tloušťky 0,6 mm, podpory 160 mm	28
Tabulka 12 Naměřené hodnoty vzorek tloušťky 0,6 mm, podpory 80 mm	28
Tabulka 13 Naměřené hodnoty vzorek tloušťky 0,6 mm, podpory 160 mm - simulace.....	28
Tabulka 14 Naměřené hodnoty vzorek tloušťky 0,6 mm, podpory 80 mm - simulace.....	29

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Fotografie z reálného experimentu

Příloha 2 Numerické simulace