



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program N2301 – Strojní inženýrství

Materiály a technologie
zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

**Úprava geometrie ohýbacího nástroje pro výrobu blatníku
manipulačních strojů**

**The Modification of the Bending Tool Geometry for
Production Handling Machines Fender**

Bc. Vít Kirschner
KSP – TP –

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

Konzultant diplomové práce: Ing. Pavel Doubek, Ph.D.

Rozsah práce a příloh:

Počet stran	78
Počet tabulek	12
Počet obrázků	92
Počet příloh	2

Datum: 25. 5. 2012



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení	Bc. Vít K I R S C H N E R
Studijní program	N2301 Strojní inženýrství
Obor	2303T002 Strojírenská technologie
Zaměření	Tváření kovů a plastů

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

Úprava geometrie ohýbacího nástroje pro výrobu blatníku manipulačních strojů.

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Teoretický rozbor procesu ohýbání.
2. Optické systémy pro analýzu deformace a měření rozměrů výrobků.
3. Analýza současného stavu výroby blatníku vysokozdvížného vozíku firmy STILL WAGNER ve firmě CDS holding s.r.o.
4. Numerická simulace procesu výroby blatníku vysokozdvížného vozíku.
5. Návrh na geometrickou změnu ohýbacího nástroje pro výrobu blatníku.
6. Závěr

A N O T A C E
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Diplomant: Bc. Vít Kirschner

Téma práce: Úprava geometrie ohýbacího nástroje pro výrobu blatníku
manipulačních strojů

The Modification of the Bending Tool Geometry for Production
Handling Machines Fender

Číslo DP: KSP – TP –

Vedoucí DP: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D. - *TU v Liberci*

Konzultant DP: Ing. Pavel Doubek, Ph.D. - *TU v Liberci*

Abstrakt:

Diplomová práce se zabývá úpravou geometrie ohýbacího nástroje pro výrobu blatníku manipulačních strojů. Požadavek na tvarovou změnu nástroje pro ohýbání vychází z nevyhovující rozměrové přesnosti stávajících výrobků. Důsledkem nedodržení výrobních tolerancí je nutnost zařazení následných dorovnávacích operací.

V rámci experimentálního řešení diplomové práce je provedeno měření mechanických vlastností tvářeného materiálu pomocí statické zkoušky tahem. Dále byly stanoveny skutečné rozměry současného nástroje a reálného výlisku pomocí bezkontaktního optického 3D skeneru REVscan. Návrh tvarové změny ohýbacího nástroje byl proveden pomocí numerické simulace v software PAM-STAMP 2G. K ověření použitelnosti tohoto řešení byla vytvořena porovnávací numerická simulace současného technologického postupu výroby blatníku vysokozdvizného vozíku při respektování všech technologických podmínek. Na základě numerické simulace byl proveden návrh změny tvaru ohýbacího nástroje a doporučení pro výrobu ve firmě CDS holding s.r.o.

Abstract:

This thesis deals with the modification of the bending tool geometry for production handling machines fender. The requirement for the bending tool shape change results from unsatisfactory dimensional accuracy of existing products. As the consequence of variations of production tolerances there is necessity to include other technological operations.

The measuring of tested material mechanical properties by using a static tensile test is carried out in the thesis experimental part. Moreover, the actual real dimensions of tool and real stamping were determined by using non-contact optical 3D scanner REVscan. The bending tool shape change was carried out by numerical simulation at software PAM-STAMP 2G. To verify the applicability of this solution there was created the comparative numerical simulation of the technological process for production forklift fender under the respecting all process conditions. On the basis of numerical simulation was carried out a proposal for shape change of the bending tool in the CDS holding Company Ltd.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 25. 5. 2012

.....

Bc. Vít Kirschner
Sněhurčina 712/77
46015 Liberec 15

Poděkování:

V úvodu bych chtěl poděkovat mému vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlu Solfronkovi, Ph.D. a konzultantovi Ing. Pavlu Doubkovi, Ph.D. za jejich odborné vedení, rady a věcné připomínky, díky kterým jsem se mohl lépe orientovat v celé problematice při vypracování předkládané diplomové práce.



Obsah

Seznam použitých značek, veličin a jednotek	9
1 Úvod	11
2 Teoretická část	12
2.1 Teorie ohýbání	12
2.1.1 Charakteristika a základní rozdělení ohýbání	12
2.1.1.1 Ohýbání dle pohybu nástroje vzhledem k tvářenému materiálu	15
2.1.1.2 Rozdělení dle tvaru ohybu	17
2.1.1.3 Rozdělení dle velikosti poloměru zakřivení	17
2.1.2 Teorie ohybového momentu a průběh při prostém ohýbání tyčí a pásů ..	18
2.1.2.1 Ohýbání úzkých tyčí bez zpevnění	18
2.1.2.2 Ohýbání širokých pásů bez zpevnění	21
2.1.2.3 Napětí při ohýbání	23
2.1.3 Neutrální vrstva (osa).....	26
2.1.4 Plocha nulového prodloužení	28
2.1.5 Ohýbání se zpevněním	29
2.1.6 Minimální a maximální poloměr ohybu	30
2.1.7 Výpočet potřebné ohýbací síly	32
2.2 Odpružení při ohybu	33
2.2.1 Odpružená křivost pro úzké tyče	34
2.2.2 Odpružená křivost pro široké pásy	34
2.2.3 Výpočet úhlového odpružení	34
2.2.4 Hlavní vlivy na děj odpružení	35
2.2.5 Eliminace odpružení při ohybu	36
2.3 Anizotropie	38
2.4 Statická zkouška tahem EN ISO 6892-1.....	39
2.5 Optické systémy	43
2.5.1 Skenovací optické systémy	43
2.5.2 Optické systémy pro měření 3D deformací	45
3 Experimentální část	49
3.1 Cíle experimentální části	49



3.2 Analýza současného technologického postupu	51
3.2.1 Technologický postup výroby blatníku.....	51
3.2.2 Měření skutečných rozměrů výrobního nástroje	52
3.2.3 Tvar zrna oceli S235JR.....	55
3.3 Měření mechanických vlastností materiálu	56
3.4 Numerická simulace současného stavu.....	60
3.4.1 Numerická simulace v softwaru PAM-STAMP 2G	60
3.4.2 Postup pro vytvoření simulace výrobního procesu	62
3.5 Porovnání reálného stavu s numerickou simulací.....	65
3.5.1 Rozměry výlisku po simulaci	65
3.5.2 Měření výlisku ze skutečného procesu.....	67
3.5.3 Zhodnocení získaných výsledků	69
3.6 Optimalizace výrobního procesu	70
4 Závěr	75
5 Seznam použité literatury.....	77
6 Seznam příloh.....	78



Seznam použitých značek, veličin a jednotek

Označení	Název	Jednotka
A_{xmm}	Tažnost	[%]
b	šířka materiálu	[mm]
d	průměr podpory	[mm]
D	průměr zatěžujícího válečku při ohybu	[mm]
e	velikost obrazce pružné deformace	[mm]
E	Youngův modul pružnosti v tahu	[MPa]
F	Síla	[N]
J	moment setrvačnosti	[mm ⁴]
KUT	komplexní ukazatel tvárnosti	[–]
l	délka středního oblouku	[mm]
Δl	prosté prodloužení	[–]
l_0	původní délka	[mm]
l_p	rozpětí podpěry	[mm]
l_u	konečná délka	[mm]
M	ohybový moment	[Nmm]
r, R, ρ	Poloměry	[mm]
R_e	výrazná mez kluzu	[MPa]
R_m	smluvní mez pevnosti v tahu	[MPa]
$R_{p0,2}$	smluvní mez pevnosti	[MPa]
R_u	smluvní mez úměrnosti	[MPa]
R_{Ax}, R_{Ay}, R_{By}	reakční síly	[N]
s, t	tloušťka materiálu	[mm]
S	průřez tyčky v místě přetržení	[mm ²]
S_0	počáteční plocha příčného průřezu	[mm ²]
T	absolutní teplota	[K]
UH	ukazatel hlubokotažnosti materiálu	[–]
W	průřezový modul v ohybu	[mm ³]
x, y, z	pravoúhlé souřadnice	[mm]
x	součinitel pro určení polohy neutrální osy	[–]
y	Průhyb	[mm]



Z	kontrakce, neboli poměrné zúžení	[%]
ZP	zásoba plasticity	[–]
α	délková roztažnost	[K ⁻¹]
α_x	úhel ohnutí	[rad]
$\Delta\alpha$	odpružení materiálu	[rad]
$\Delta\alpha^\circ$	odpružení materiálu	[°]
β	doplňkový úhel	[°]
ε	poměrné přetvoření	[%]
ρ	měrná hustota	[kg · m ⁻³]
λ	tepelná vodivost	[W · m ⁻¹ · K ⁻¹]
μ	Poissonovo číslo	[–]
σ	skutečné normálové napětí	[MPa]
σ_K	okamžitá hodnota meze kluzu	[MPa]
σ_S	střední napětí	[MPa]
σ_P	přirozený přetvárný odpor	[MPa]



1 Úvod

Tváření je jednou z nejvýznamnějších a zároveň nejstarších technologií zpracování kovů. Tváření kovů je metoda s vysokou produktivitou, hospodárností i velkou perspektivou. Tvářecí nástroje jsou určeny především pro hromadnou výrobu, kde se požaduje vysoká rozměrová přesnost výrobku. Důležitým úsekem při lisování výrobků z plechu je rychlost výroby nástroje pro navržený výlisek s nejnižšími náklady a s nejkratším časovým horizontem.

V době výpočetní techniky se upřednostňuje provádění technologické přípravy výroby lisovacího nástroje na počítačích za pomoci speciálních softwarů. Období, kdy se značná část úseků technologické přípravy výroby prováděla experimentálními metodami, jsou již minulostí. Tento trend není pouze z důvodu používání nových materiálů se značně odlišnými vlastnostmi, ale také se značně zvýšily požadavky na zkrácení doby inovací výrobků.

Pomocí metody konečných prvků s využitím počítačové techniky je možné s vyhovující přesností numericky modelovat materiálový tok a také simulovat celý výrobní proces. Při optimalizaci či návrhu nových nástrojů se vychází z vytvořeného modelu s konkrétním tvarem. K němu se dále vytvoří příslušné lisovací nástroje, po nastavení jednotlivých parametrů procesu vznikne tvářecí operace lisování ve virtuálním prostředí. Tímto způsobem lze následně ověřit správnost celého technologického procesu (například u technologie tažení či ohýbání s možností úprav pro doladění procesu). Hlavní výhodou těchto postupů návrhu nástroje je provádění veškerých úprav jen na virtuálním prototypu, což je především ekonomicky výhodnější než experimentální metody. [1]

Předkládaná diplomová práce se v teoretické části bude zabývat podrobným rozбором technologie plošného tváření ohýbání, nežádoucí zpětnou pružnou deformací a její možnou eliminací. Dále budou popsány skenovací optické systémy a metody pro získání vstupních materiálových dat potřebné pro vytvoření numerické simulace ve speciálních tvářecích softwarech.

Experimentální část bude zaměřena na porovnání simulace technologie ohýbání v softwaru PAM stamp 2G se skutečným výrobním procesem. Pokud rozměry výlisku z numerické simulace budou odpovídat rozměrům výlisku současného procesu, bude možné využít simulaci pro následnou optimalizaci výroby výlisku z plechu o jmenovité tloušťce 12[mm]. Materiál plechu je ocel S235JR dle ČSN EN 10025-2.

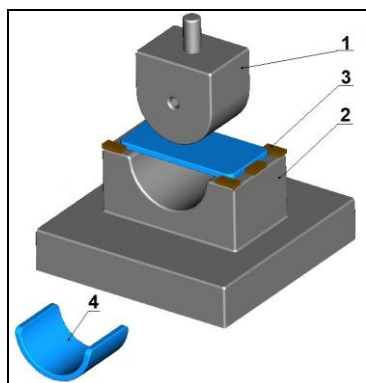
Diplomová práce vznikla v rámci řešení projektu studentské grantové soutěže 2822.

2 Teoretická část

2.1 Teorie ohýbání [2], [3], [4], [5], [6], [7]

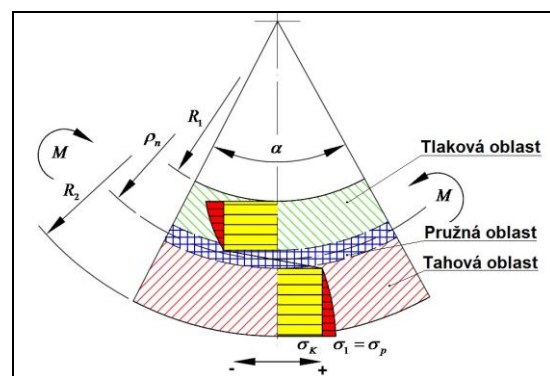
Ohýbání je plošné tváření, při kterém je materiál trvale deformován do různého úhlu ohybu. Nástrojem je lisovací nástroj, který se nazývá ohýbadlo.

Tvářecí nástroj se skládá z ohybníku, z ohybnice a ze základacích dorazů, které slouží pro správné a rychlé uložení ohýbaného materiálu viz obr. 2.1. Výrobkem je výlisek, neboli ohybek. Při ohýbání dochází k pružně plastické deformaci, která má rozdílný průběh od povrchu materiálu k neutrální vrstvě. Největší napětí je v krajních vláknech ohýbaného objektu a zároveň má na protilehlých površích opačný smysl (tah, tlak) viz obr. 2.2. Obecně dosahuje hodnot od meze kluzu σ_K až do meze pevnosti σ_m , což je oblast trvalé deformace a oblast tváření.



Obr. 2.1: Ohýbací nástroj

1 – ohybník 2 – ohybnice
3 – zakl. dorazy 4 – výlisek



Obr. 2.2: Přehled vzniklých oblastí při ohybu /2/

2.1.1 Charakteristika a základní rozdělení ohýbání

Charakteristickým znakem ohýbání je změna tvaru osy ohýbané součásti. Trvalé změny křivosti polotovarů jako jsou plechy, tyče a dráty, se provádí ohýbáním. Ohybem se zmenšuje poloměr zakřivení a teoreticky lze tvářet materiál až na hranici mezní hodnoty přetvoření za studena σ_m (napětí na mezi pevnosti).

Opak ohýbání je rovnání, kde poloměr zakřivení se naopak zvětšuje.

**Z hlediska působení na výchozí materiál lze rozlišit:**

- ohyb s vnějšími momenty
- ohyb s lokálními silami
- ohyb s kombinací vnějšího zatížení (ohýbání s tažením, ohýbání se stlačováním)

Na rozdíl od objemového tváření jsou u ohýbání rozhodující tahová napětí, která obecně musí být menší než pevnost v tahu tvářeného materiálu. Při ohybu často dochází k deformaci průřezu. Tyto průřezy jsou děleny na dvě hlavní skupiny.

- vyšší průřezy: úzké tyče viz obr 2.5 a), u kterých dochází k větší deformaci průřezu
- nižší průřezy: široké pásy viz obr. 2.5 b)

Ohyb úzkých tyčí obdélníkového průřezu:

Vyšší průřezy jsou charakteristické tím, že šířka b je menší než tloušťka s viz obr. 2.5 a). Napětí ve směru šířky σ_2 lze zanedbat. Při prostém ohybu v krajních vláknech na vnější straně je radiální napětí nulové $\sigma_3 = 0$ a napjatost odpovídá jednoosému tahu. Naopak na vnitřní straně jednoosému tlaku.

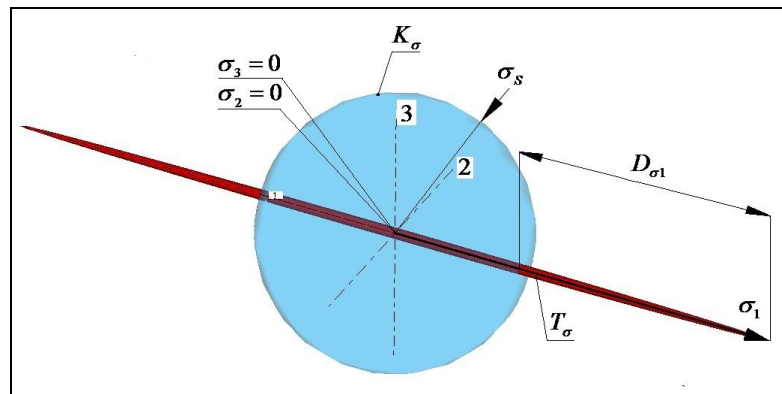
Stav přetvoření pro volný okraj na vnější straně ohybu bude odvozen pomocí tenzoru napětí T_σ (2.1). Tenzor napětí je součet deviátoru napětí D_σ a kulového tenzoru K_σ . Grafické vyjádření pro ohyb úzké tyče je na obr. 2.3.

$$T_\sigma = D_\sigma + K_\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

kde pro volný ohyb úzké tyče platí:

$$K_\sigma = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \sigma_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \frac{\sigma_1}{3} \quad (2.2)$$

$$D_\sigma = \begin{bmatrix} (\sigma_1 - \sigma_s) & 0 & 0 \\ 0 & (-\sigma_s) & 0 \\ 0 & 0 & (-\sigma_s) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

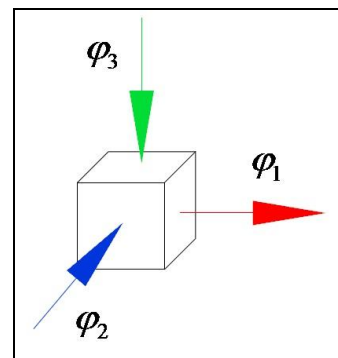


Obr. 2.3: Tenzor napětí pro vnější okraj úzké tyče

Zjištěný výsledný smysl deviátorů napětí v jednotlivých normálových směrech je zřejmý z tab. 2.1, dle které lze vytvořit trojsové schéma přetvoření pro vnější okraj úzké tyče viz obr. 2.4.

Tab. 2.1: Deviátor napětí

Deviátorové složky	smysl
$D_{\sigma 1}$	+
$D_{\sigma 2}$	–
$D_{\sigma 2}$	–



Obr. 2.4: Schéma přetvoření

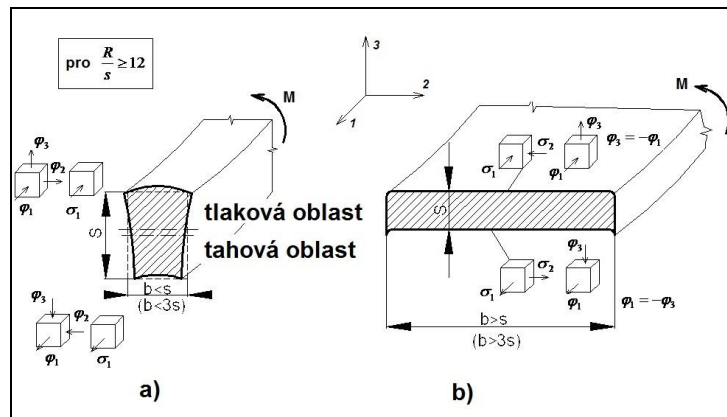
Ze zjištěného schématu přetvoření vyplývá, že šířka ohýbané úzké tyče se na vnější tahové straně zmenšuje a obdobným postupem by bylo zjištěno, že pro vnitřní okraj se naopak zvětšuje. Mezi deformovanými vrstvami je neutrální osa o poloměru ρ_n , v které je nulové napětí. V blízkosti této oblasti se dále nachází vrstva nulové deformace o poloměru ρ_0 , která se při ohýbání neprodlouží ani nezkrátí. Původní osová vrstva ohýbaného materiálu není totožná s neutrální osou, ta se posouvá směrem k tlakovým vrstvám. Kolem neutrální osy se také nachází pásmo pružné deformace, viz obr. 2.2, jejímž důsledkem je nepříznivý vliv odpružení. Pružná deformace i neutrální osa se vyskytuje ve všech ohybech.

Ohýbání širokých pásů:

Při ohýbání nižších průřezů viz obr. 2.5 b) nedochází k deformaci v příčném směru. Příčnou deformaci φ_2 lze vzhledem k velikosti šířky zanedbat a vzniká tak



rovinný stav přetvoření. Při prostém ohybu v povrchových vrstvách platí rovinný stav napjatosti.



Obr. 2.5: Schéma napjatosti a deformace při prostém ohybu tyčí a širokých pásů /2/

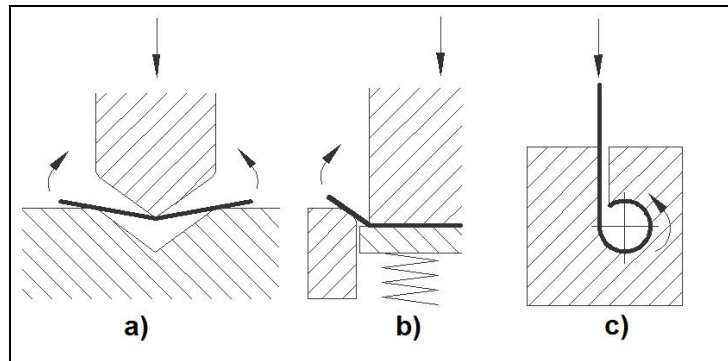
2.1.1.1 Ohýbání dle pohybu nástroje vzhledem k tvářenému materiálu

Ohýbání na lisech

Materiál je tvářen pomocí lisovacího nástroje, který je složen z pohyblivé části ohybníku a pevné části ohybnice. Ohybník koná přímočaré vratné pohyby. Tento způsob ohýbání je vykonáván na mechanických, či hydraulických lisech, nebo na speciálních strojích.

Ohýbadla pro použití na lis mají v porovnání s ostatními nástroji jednoduchou konstrukci, často nemívají vlastní vedení. Tato metoda tváření má mnoho způsobů.

- Ohýbání:** Směr pohybu pohyblivé části nástroje je přibližně shodný se směrem osy úhlu tvořeného rameny ohnutého předmětu. Viz obr. 2.6 a).
- Lemování:** Směr pohybu pohyblivé části je totožný se směrem ohnutého ramena. Viz obr. 2.6 b).
- Zakružování:** Na tvářený materiál je vyvíjen tlak vyvolávající posouvání plechu po zakřiveném povrchu pevné části. Viz obr. 2.6 c).



Obr. 2.6: Způsoby ohýbání na lisech /5/

Ohýbání ve válcích

Nástroje jsou válce, které konají otáčivý pohyb. Při této metodě se druh ohýbání rozeznává dle polohy roviny ohybu vzhledem k ose válců.

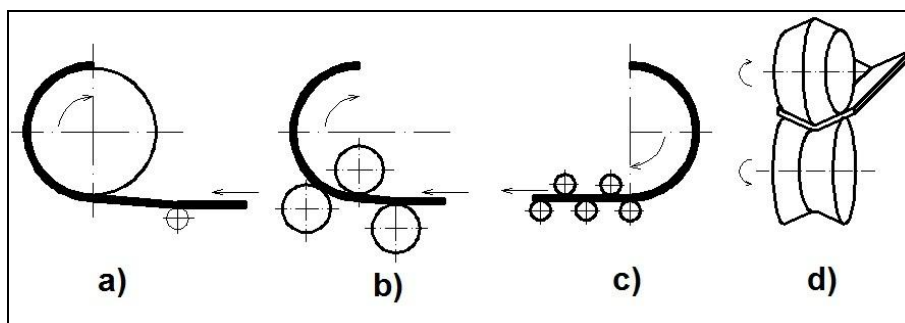
Válcování příčné: Rovina ohýbání je kolmá k ose válců.

a) **navíjení:** - obr. 2.7 a)

b) **zakružování** - obr. 2.7 b)

c) **rovnání:** - obr. 2.7 c)

Válcování podélné: Rovina ohýbání prochází osami dvou válců s příslušným profilem viz obr. 2.7 d).



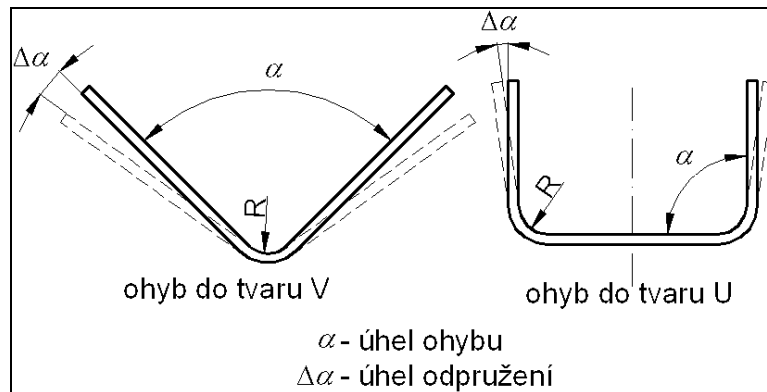
Obr. 2.7: Způsoby ohýbání válcováním /7/



2.1.1.2 Rozdělení dle tvaru ohybu

Rozdělení je viz obr. 2.8

- a) ohýbání do tvaru „V“
- b) ohýbání do tvaru „U“



Obr. 2.8: Rozdělení tvaru ohybu V a U a jejich odpružení /7/

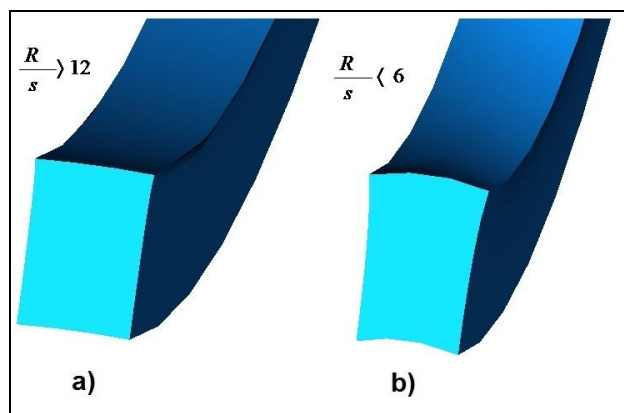
2.1.1.3 Rozdělení dle velikosti poloměru zakřivení

a) ohyb s velkým poloměrem zakřivení při poměrně malém stupni plastické deformace (2.4) viz obr. 2.9 a)

$$\frac{R}{s} \geq 12 \quad (2.4)$$

b) ohyb s malým poloměrem zakřivení při vzniku velké plastické deformace (2.5) viz obr. 2.9 b)

$$\frac{R}{s} \leq 6 \quad (2.5)$$



Obr. 2.9: Deformace průřezu při ohýbání

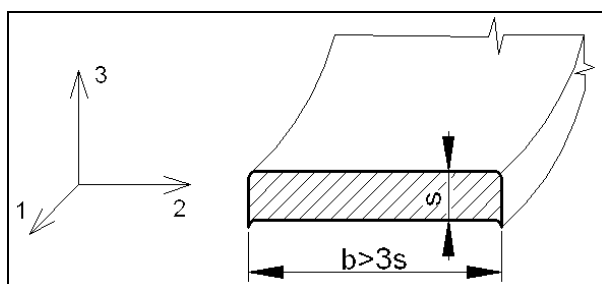


2.1.2 Teorie ohybového momentu a průběh při prostém ohýbání tyčí a pásů

Pro zjednodušenou představu průběhu dějů pružných a plastických deformací bude zanedbáno zpevnění materiálu a bude se předpokládat, že tělesa jsou z ideálně pružně plastického materiálu a z ideálně tuhoplastického materiálu.

Hlavní směry deformace a napjatosti jsou označeny na obr. 2.10

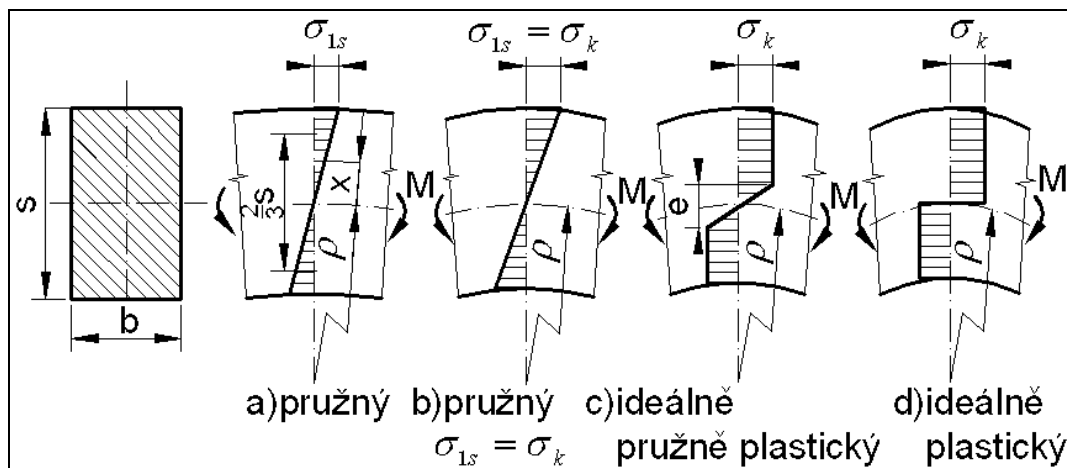
- 1 směr podélný (osový), rovnoběžný s osou ohýbaného materiálu
- 2 směr příčný (šířka materiálu), kolmý na osu ohýbaného materiálu a rovnoběžný s povrchovými přímkami válcovaného povrchu ohybu
- 3 směr radiální, kolmý k vnějšímu i vnitřnímu povrchu ohýbaného materiálu



Obr. 2.10: Označení hlavních směrů

2.1.2.1 Ohýbání úzkých tyčí bez zpevnění

Při ohybu úzkých tyčí obdélníkového průřezu, kde šířka b je značně menší než tloušťka s , se zanedbává napětí působící ve směru šířky materiálu. Předpokladem je, že napjatost odpovídá jednoosému prodlužování vláken na vnější straně ohybu a jednoosému stlačování vláken na vnitřní straně ohybu. Jednotlivé děje jsou rozděleny do čtyř fází průběhu. Viz obr. 2.11



Obr. 2.11: Rozložení napětí ohýbané úzké tyče v jednotlivých fázích ohybu /2/



a) V počáteční fázi ohýbání nastává pružná deformace. Napětí vyvolaná v tvářeném tělese jsou přímo úměrná deformaci. Tato skutečnost vyplývá z Hookova zákona (2.6), kde E je modul pružnosti v tahu. Velikost napětí σ_1 , působící ve vzdálenosti x od osy viz obr. 2.11, se získá pomocí poměrné deformace (2.7) a Hookova zákona (2.6). Poloměr ρ označuje zakřivení střední vrstvy v rovině.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.6)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{x}{\rho} \quad (2.7)$$

$$\sigma_1 = E \frac{x}{\rho} \quad (2.8)$$

Nejvyšší hodnoty napětí σ_{1s} budou v krajních vláknech ohýbaného objektu. Do vztahů (2.7) a (2.8) bude dosazeno (2.9), kde s je tloušťka ohýbaného materiálu viz obr. 2.11.

$$x = \pm \frac{s}{2} \quad (2.9)$$

$$\varepsilon_{1s} = \pm \frac{s}{2 \cdot \rho} \quad (2.10)$$

$$\sigma_{1s} = \pm E \frac{s}{2 \cdot \rho} \quad (2.11)$$

Pro určení hodnoty vnějšího ohybového momentu M je třeba ohybová rovnice (2.12). Odvození vyvolaného ohybového momentu je podle obr. 2.11 a). Po úpravě lze napsat rovnici pro pružný ohybový moment (2.13).

$$\sigma_{1s} = \frac{M}{W} \quad (2.12)$$

$$\Rightarrow M = \frac{1}{2} \cdot \sigma_{1s} \cdot \frac{s}{2} \cdot b \cdot \frac{2}{3} \cdot s$$

$$M = \sigma_{1s} \cdot \frac{b \cdot s^2}{6} = E \cdot \frac{s}{2 \cdot \rho} \cdot \frac{b \cdot s^2}{6} = \frac{E}{\rho} \cdot \frac{b \cdot s^3}{12}$$

$$M = \frac{E \cdot J}{\rho} \quad (2.13)$$

$W = \frac{b \cdot s^2}{6}$ je modulem průřezu v ohybu pro obdélníkový průřez

$J = \frac{b \cdot s^3}{12}$ je moment setrvačnosti průřezu ohýbané tyče vzhledem k neutrální ose



b) Druhá fáze procesu, tzv. fáze plastických deformací, začíná dosažením napětí na mezi kluzu $\sigma_{1s} = \sigma_K$ v krajních vláknech objektu, kde velikost ohybového momentu bude rovna (2.14) viz obr. 2.11 b).

$$M_p = \sigma_{1s} \cdot \frac{b \cdot s^2}{6} = \sigma_K \cdot \frac{b \cdot s^2}{6} \quad (2.14)$$

c) Při následném ohybu a růstu ohybového momentu se postupně zvětšuje hloubka (množství) okrajových deformovaných vrstev, zatímco vrstvy v okolí středu materiálu jsou stále v pružném stavu. Tloušťku vnitřních nedeformovaných vrstev lze teoreticky určit z rovnice (2.8), kde $(x = \frac{e}{2})$ a napětí σ_1 na povrchu materiálu se bude rovnat napětí na mezi kluzu σ_K .

$$e = 2\rho \cdot \frac{\sigma_K}{E} \quad (2.15)$$

Potom ohybový moment ke středu průřezu bude dán rozdílem dvojic sil.

$$\begin{aligned} M &= \frac{b \cdot s^2}{4} \cdot \sigma_K - \frac{b \cdot e^2}{12} \cdot \sigma_K \\ M &= \sigma_K \cdot \frac{b \cdot s^2}{4} \left(1 - \frac{e^2}{3 \cdot s^2} \right) \end{aligned} \quad (2.16)$$

Po dosazení z (2.15) do (2.16), je dosažen obecný průběh ohybového momentu pro ideálně pružně plastický ohyb úzké tyče.

$$M_{pl} = \frac{b \cdot s^2}{4} \cdot \sigma_K \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \cdot \frac{\rho^2}{s^2} \left(\frac{\sigma_K}{E} \right)^2 \right] \quad (2.17)$$

d) Pokud se plastická oblast rozšíří na celou tloušťku ohýbané tyče tj. $e = 0$, ohybový moment dosáhne maximální hodnoty ideálně plastického ohybu.

$$M_{\max} = \sigma_K \cdot \frac{b \cdot s^2}{4} \quad (2.18)$$

Z porovnání vztahů (2.14) a (2.18) plyne, že maximální moment při ideálně plastickém ohybu je o 50% větší než moment na mezi plastického přetvoření, tedy při dosažení meze kluzu v krajních vláknech ohýbané úzké tyče.



2.1.2.2 Ohýbání širokých pásů bez zpevnění

Při ohýbání širokých pásů bez zpevnění je přetvoření ve směru šířky b ztíženo a v podstatě u širokých pásů k němu vůbec nedochází $\varphi_2 = 0$, to je způsobeno velkou šířkou materiálu, který klade napětí proti deformaci v příčném směru σ_2 viz obr. 2.5 b). Dochází pouze k rovinné deformaci, při níž se změna délky vlákna v podélném směru kompenzuje výhradně změnou tloušťky v radiálním směru.

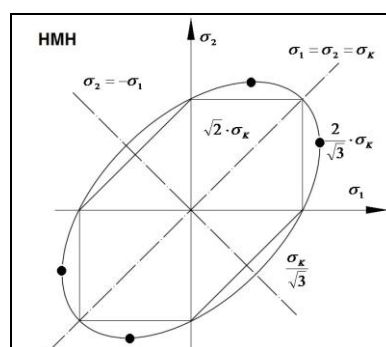
Při ohýbání širokých pásů se mezní hodnoty ohybových momentů M_p a $M_{\max}$ zvětšují o hodnotu $\frac{2}{\sqrt{3}}$ oproti momentům u úzkých tyčí. Tato hodnota zvýšení velikosti ohybového momentu byla odvozena za předpokladu rovinného přetvoření $\varphi_2 = 0$ a rovinného stavu napjatosti $\sigma_3 = 0$. Po využití hypotézy plasticity dle HMH (2.19) a rovnice elipsy (2.20) platí (2.21) a (2.22).

HMH podmínka plasticity:

Plastického stavu je dosaženo v okamžiku, kdy intenzita napětí σ_i je rovna mezi kluzu σ_K .

$$\sigma_i = \sigma_K$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} = \sigma_K \quad (2.19)$$



Obr.2.12: Elipsa plasticity pro rovinnou napjatost /6/

**Rovnice elipsy:**

$$\frac{\sigma_1^2}{\sigma_K^2} + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_K^2} - \frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{\sigma_K^2} = 1 \quad (2.20)$$

$$\sigma_1 = \pm \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_K \quad (2.21)$$

$$\sigma_2 = \pm \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_K \quad (2.22)$$

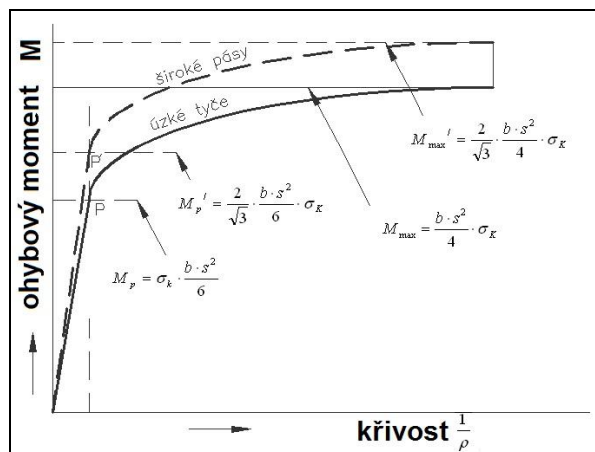
Pokud se bude vycházet z hypotézy plasticity HMM, budou mezní hodnoty ohybových momentů zvýšeny o stejnou hodnotu jako dosažené hodnoty napětí v krajních vláknech ohýbaného tělesa, to je patrné z odvozených vzorců (2.23) a (2.24). Tyto momenty se označují M_p' a $M_{\max}'$.

$$M_p' = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{b \cdot s^2}{6} \cdot \sigma_K \quad (2.23)$$

$$M_{\max}' = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{b \cdot s^2}{4} \cdot \sigma_K \quad (2.24)$$

Ohybové momenty pro široké pásy a pro úzké tyče z ideálně pružně plastických materiálů jsou porovnány na obr 2.13. Pro přehlednost byla zvolena závislost ohybového momentu na převrácené hodnotě poloměru zakřivení, neboli křivosti (2.25).

$$křivost = \frac{1}{\rho} \quad (2.25)$$



Obr. 2.13: Diagram závislosti ohybového momentu na křivosti /2/

2.1.2.3 Napětí při ohýbání

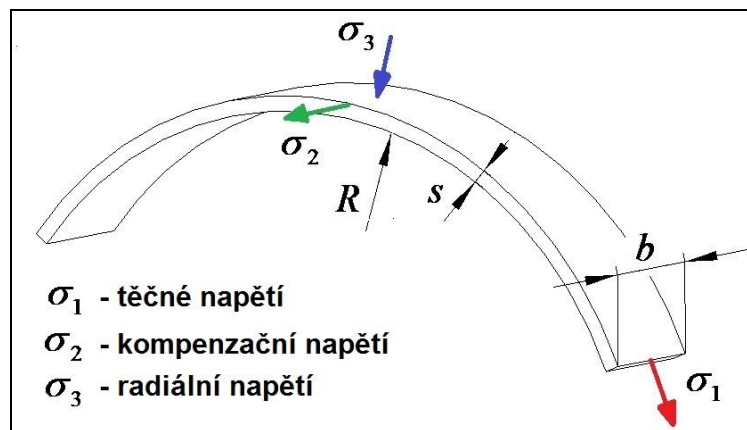
V této části bude vysvětlen ohyb materiálu z hlediska působení napjatosti v ohýbaném objektu. Půjde o řešení nejhoršího možného případu, jedná se o široký pás (2.26) viz obr. 2.14.

Pro zjednodušení se bude předpokládat materiál ideálně tuhoplastický, kdy elastická složka deformace bude nulová $\varepsilon_{el} = 0$, mez kluzu bude konstantní $\sigma_K = konst.$ Velikost ohybu bude dle (2.27).

V tomto stupni křivosti bude docházet v radiálním směru k deformaci průřezu, proto musí působit radiální napětí σ_3 .

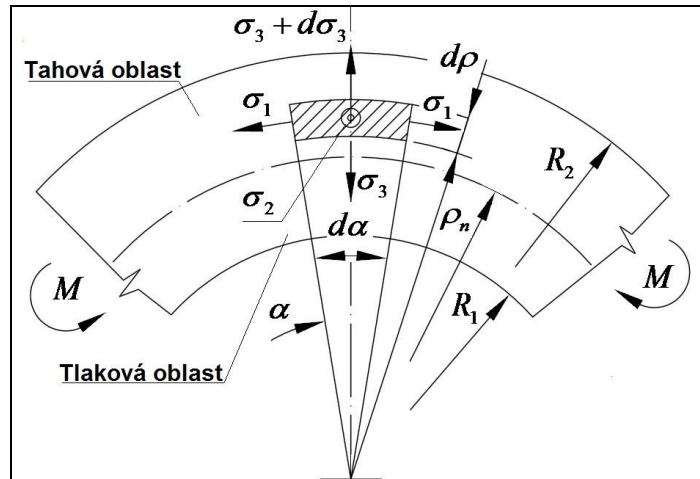
$$b \geq 3s \quad (2.26)$$

$$\frac{R}{s} \leq 12 \quad (2.27)$$



Obr. 2.14: Obecné schéma ohybu

Při řešení napjatosti konkrétního případu bude vycházeno ze schématu na obr. 2.15, kde na vytknutý element působí jednotlivé síly, které musí být v rovnováze. Rovnice rovnováhy (2.28).



Obr. 2.15: Schéma napjatosti při prostém ohybu /2/

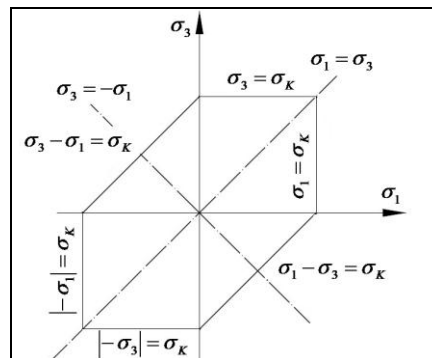
Rovnice rovnováhy pro vytknutý element:

$$(\sigma_3 + d\sigma_3) \cdot [(\rho + d\rho) \cdot d\alpha] \cdot b - \sigma_3 \cdot \rho \cdot d\alpha \cdot b - 2 \cdot \sigma_1 \cdot \sin \frac{d\alpha}{2} \cdot b \cdot d\rho = 0 \quad (2.28)$$

Po úpravě:

$$d\sigma_3 = -(\sigma_3 - \sigma_1) \cdot \frac{1}{\rho} d\rho \quad (2.29)$$

Pro ideálně tuhoplastický materiál v konkrétním případě se bude vycházet z teorie plasticity dle Tresky, viz obr. 2.16.



Obr. 2.16: Teorie plasticity pro rovinnou napjatost dle Tresky /6/

Podmínka plasticity dle Tresky:

$$\sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \sigma_K \quad (2.30)$$

Po dosazení podmínky plasticity (2.30) do upravené rovnice rovnováhy sil (2.29) a následné integraci se získá závislost ve tvaru (2.31). Integrační konstanty se zjistí pomocí okrajových podmínek, viz obr. 2.15. Pro volný povrch je radiální napětí σ_3 nulové.



$$\sigma_3 = \pm \sigma_K \ln \rho + c \quad (2.31)$$

- Pro oblast zatíženou tahovým napětím $\rho \langle R_2; \rho_n \rangle$ dle obr. 2.17:

$$\sigma_3 = \sigma_K \ln \frac{\rho}{R_2} \quad (2.32)$$

Dle Tresky:

$$\sigma_1 = \sigma_K + \sigma_3 = \sigma_K \left(1 + \ln \frac{\rho}{R_2}\right) \quad (2.33)$$

- Pro oblast zatíženou tlakovým napětím $\rho \langle \rho_n; R_1 \rangle$ dle obr. 2.17:

$$\sigma_3 = \sigma_K \ln \frac{R_1}{\rho} \quad (2.34)$$

Dle Tresky

$$\sigma_1 = \sigma_3 - \sigma_K = \sigma_K \left(\ln \frac{R_1}{\rho} - 1\right) \quad (2.35)$$

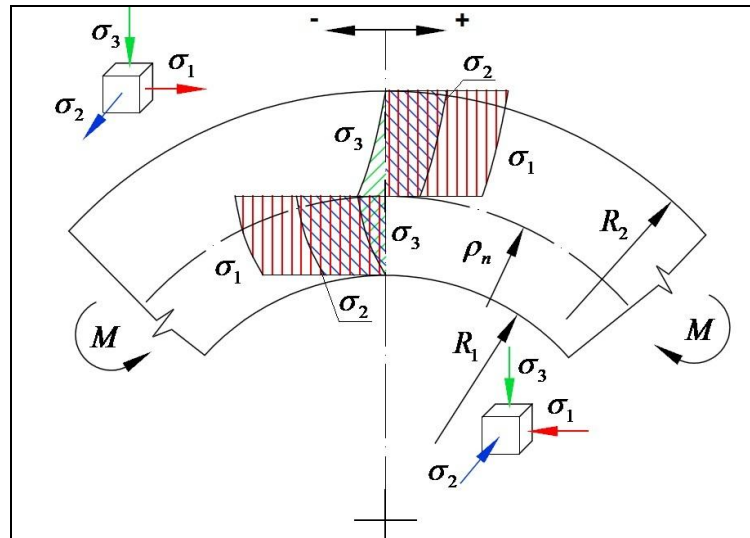
Pro zjištění velikosti kompenzačního napětí σ_2 , působícího v příčném směru, je nutné vycházet z velikosti deformace. U širokých pásů je přetvoření ve směru šířky φ_2 nulové.

$$\varphi_2 = \frac{1}{E} \left[\sigma_2 - \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_3) \right] \quad (2.36)$$

Po úpravě:

$$\sigma_2 = \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_3) \quad (2.37)$$

Odvozené průběhy při prostém ohýbání jsou znázorněny na obr. 2.17. V uvedeném výpočtu byla zanedbána pružná vrstva, která odděluje oblast plastického stlačování od oblasti plastického prodlužování, viz obr. 2.2. Odvozené výsledky odpovídají meznímu stavu deformace. Toto tvrzení lze prokázat integrací obvodových napětí při výpočtu ohybového momentu (2.38).



Obr. 2.17: Průběhy napětí při prostém ohýbání /2/

$$M_{\max}^{\parallel} = b \int_{R_1}^{R_2} \sigma_1 \cdot \rho \cdot d\rho \quad (2.38)$$

Po integraci pro ideálně tuhoplastický materiál s využitím teorie plasticity dle Tresky bude maximální ohybový moment (2.39).

$$M_{\max}^{\parallel} = \frac{b \cdot s^2}{4} \cdot \sigma_K \quad (2.39)$$

Pokud by byla uvažována teorie plasticity HMM pro ideálně tuhoplastický materiál, byl by maximální ohybový moment roven (2.24). Rozdíl použitých teorií plasticity je patrný z obr. 2.12 a obr. 2.16.

2.1.3 Neutrální vrstva (osa)

Neutrální vrstva je hranicí mezi oblastí plastického prodlužování a plastického stlačování. Pokud bude vycházeno z ideálně tuhoplastického materiálu lze poloměr vrstvy vypočítat pomocí radiálního napětí σ_3 . Na poloměru neutrální vrstvy ρ_n jsou radiální napětí stejná. Proto bude platit rovnost vztahů (2.32) a (2.34).

$$\sigma_K \ln \frac{\rho_n}{R_2} = \sigma_K \ln \frac{R_1}{\rho_n} \quad (2.40)$$

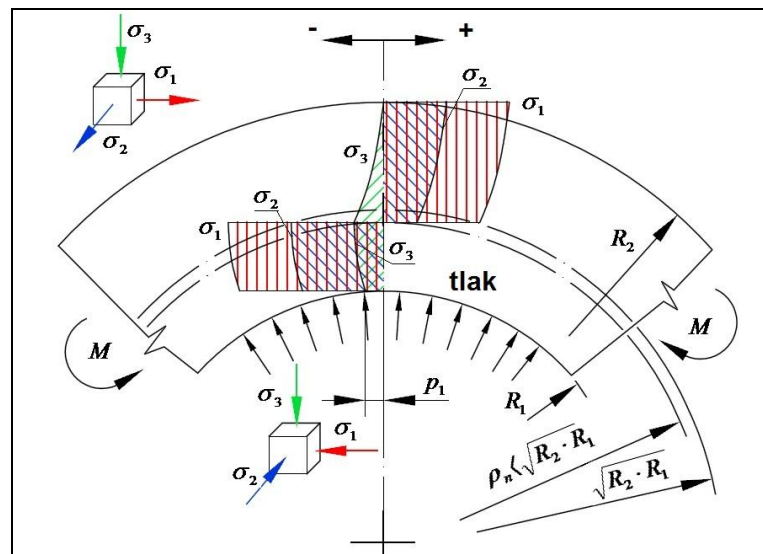
Po úpravě:

$$\rho_n = \sqrt{R_1 \cdot R_2} \quad (2.41)$$

Z odvozeného výrazu je patrné, že s rostoucím zakřivením se neutrální osa přesunuje ze středu k vnitřnímu povrchu ohýbaného pásu. Jedná se o geometrický průměr.

- Nejčastěji se vyskytující případ u ohýbání je tzv. ohýbání s tažením, kdy povrch ohýbaného pásu z vnitřní strany ohybu je namáhán tlakem nástroje p_1 . V tomto případě dochází i ke ztenčení pásu a neutrální vrstva se ještě více posouvá k tlakové části (2.42) viz obr. 2.18 a obr. 2.19.

$$\rho_n < \sqrt{R_1 \cdot R_2} \quad (2.42)$$

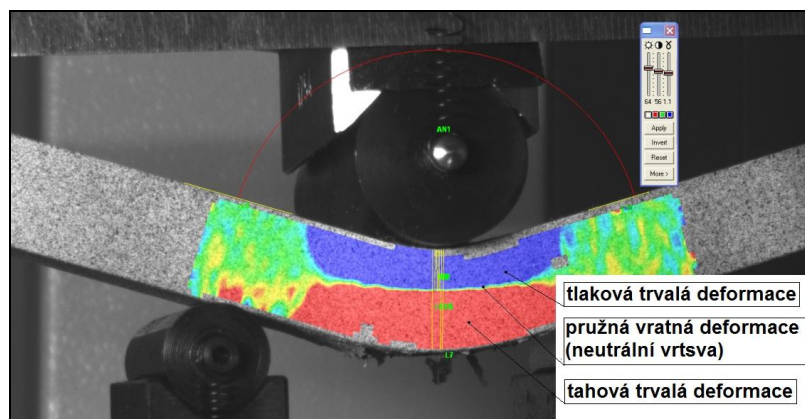


Obr. 2.18: Průběhy napětí při ohýbání s tažením /2/

- Další možný případ nastane, působí-li tlak při podélném stlačování ohýbaného pásu na vnější povrch. Neutrální plocha se posouvá nad hodnotu geometrického průměru (2.43). Tento případ se nazývá ohýbání a stlačování.

$$\rho_n > \sqrt{R_1 \cdot R_2} \quad (2.43)$$

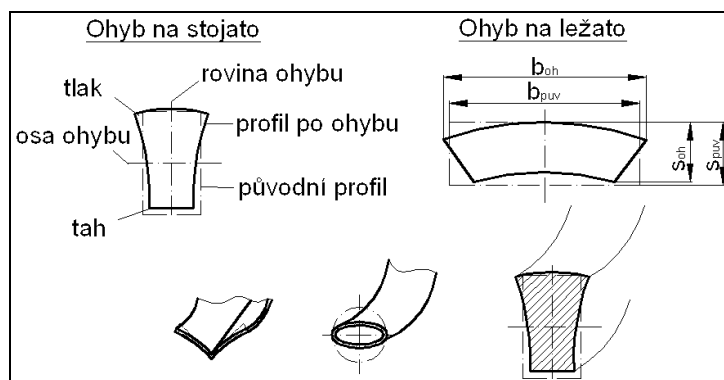
Ve skutečnosti je nutné v každém ohybu rozlišovat tři deformační pásma. Při ohybu jsou napětí v krajních vláknech materiálu opačného smyslu (tah, tlak) a dosahují hodnot trvalé deformace materiálu. V okolí neutrální vrstvy ρ_n tvářeného materiálu jsou tahová a tlaková napětí nižší a dosahují dokonce hodnot nižších než je mez kluzu R_e daného materiálu. Jde o oblast pružné deformace. Tato vratná deformace je znázorněna zelenou barvou na obr. 2.19.



Obr. 2.19: Skutečné posunutí neutrální vrstvy /8/

Pružná oblast má za následek nežádoucí účinek odpružení po odlehčení materiálu. Neutrální osa i pružná oblast se vyskytuje u všech druhů ohybů. Ve skutečnosti má neutrální osa tvar paraboly, je však nahrazována kruhovým obloukem. Její poloha závisí na tloušťce materiálu s a poloměru ohybu R .

Na určení polohy neutrální osy existují i experimentální vzorce, které uvažují vliv deformace ohýbaného průřezu, viz obr. 2.20.



Obr. 2.20 Deformace základních profilů během ohýbání /7/

2.1.4 Plocha nulového prodloužení

Plocha nulového prodloužení má délku (2.44), která se rovná počáteční délce neohnutého pásu. Při prostém ohybu bez osových sil (2.41) nedochází ke změně tloušťky pásu. Naopak při ohybu s osovým tažením pásu (2.42) dochází k ztenčení pásu a při ohybu se stlačováním (2.43) se tloušťka pásu zvětšuje.

$$l_0 = \rho_0 \cdot \bar{\alpha} \quad (2.44)$$

Aby bylo možné vyjádřit délku nulového prodloužení, bude se uvažovat, že plocha výchozího průřezu musí být rovna ploše mezikružové výseče (2.45)



viz obr. 2.21. Tento výraz bude dosazen do (2.44), čímž se po úpravě získá poloměr nulového prodloužení při prostém ohýbání (2.46). Pokud budou působit osově síly při ohybu, lze získat poloměr nulového prodloužení z deformace v ohybu, neboť až do meze pevnosti platí zákon zachování objemu (2.47).

Je tedy patrné, že poloha plochy nulového prodloužení je přímo závislá na změně tloušťky ohýbaného pásu. Pokud známe polohu nulového prodloužení, je možné přímo zjistit hodnotu skutečného přetvoření v libovolné vrstvě (2.48).

$$l_0 \cdot s_0 = \pi(R_2^2 - R_1^2) \frac{\alpha}{2\pi} = \frac{\alpha}{2}(R_2^2 - R_1^2) \quad (2.45)$$

$$\rho_0 = \frac{R_2^2 - R_1^2}{2 \cdot s_0} \quad (2.46)$$

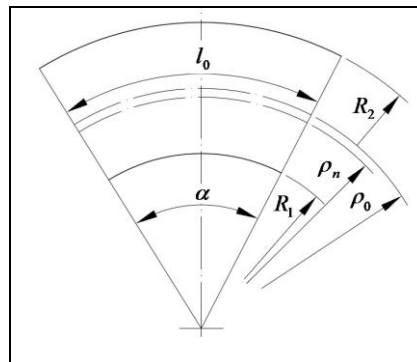
Zákon zachování objemu:

$$\rho_0 \cdot s_0 \cdot b = \rho_s \cdot s_s \cdot b$$

$$\rho_0 = \rho_s \frac{s_s}{s_0} \quad (2.47)$$

Skutečná logaritmická deformace v libovolné vrstvě:

$$\varphi_i = \ln \frac{l_i}{l_0} = \ln \frac{\rho_i \cdot \alpha}{\rho_0 \cdot \alpha} = \ln \frac{\rho_i}{\rho_0} \quad (2.48)$$

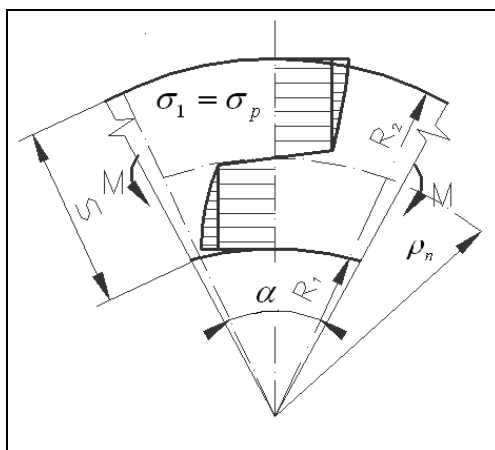


Obr. 2.21: Pro výpočet plochy nulového prodloužení

2.1.5 Ohýbání se zpevněním

Při ohýbání bez zpevnění bylo uvažováno těleso z ideálně pružně plastického a z ideálně tuhoplastického materiálu bez zpevnění s konstantní mezí kluzu.

Ve skutečnosti u materiálů tvářených za studena vzrůstá mez kluzu v závislosti na stupni plastické deformace a dochází ke zpevnění. Proto se zvětšuje i tečné napětí σ_1 , tento nárůst je největší v krajních povrchových vláknech ohybu. Tato vlákna jsou nejvíce deformována, viz obr. 2.22.

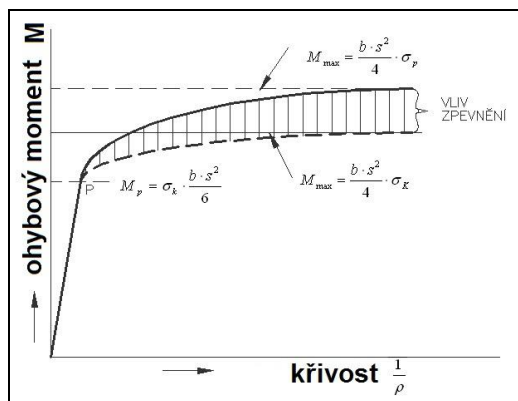


Obr. 2.22: Vliv zpevnění na rozložení tečného napětí /2/

Po vyčerpání plastické deformace dochází k porušení celistvosti. Obecně tedy platí podmínka $\sigma_{1\max} \leq \sigma_p$. Pokud je tato podmínka splněna, nedojde k porušení celistvosti. Přírůstků napětí odpovídá přírůstek ohybového momentu.

Ohybový moment roste s rostoucí plastickou deformací materiálu a tedy obecně je tím větší čím je větší zakřivení, neboli je menší poloměr ohybu viz obr. 2.23. Například pro ohyb úzké tyče bude platit.

$$M_{\max} \cong \frac{b \cdot s^2}{4} \cdot \sigma_p \quad (2.49)$$



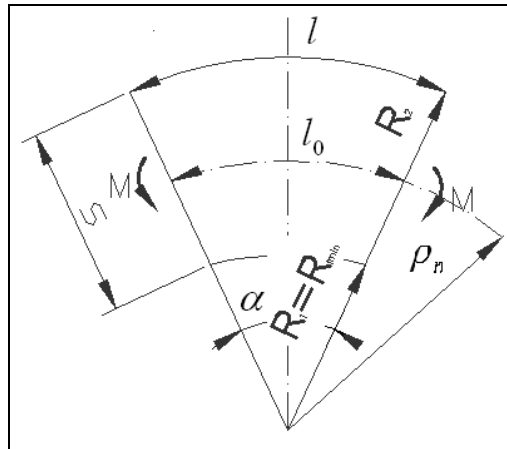
Obr. 2.23: Závislost ohybového momentu na zpevnění tyče /2/

2.1.6 Minimální a maximální poloměr ohybu

a) Ve skutečnosti je ohyb pružně plastický a je možný až do minimálního poloměru ohybu $R_{1\min}$, kdy dojde k porušení na vnější tahové straně. Důvodem je vytvoření tahových podmínek v krajních vláknech, při nichž napětí dosáhne hodnoty



meze pevnosti v tahu R_m . Pokud se bude vycházet ze schématu na obr. 2.24, tak obecně minimální poloměr lze získat z poměrného přetvoření (2.50).



Obr. 2.24: Deformační schéma elementu při ohybu /2/

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{(R_1 + s) \cdot \alpha - \left(R_1 + \frac{s}{2}\right) \cdot \alpha}{\left(R_1 + \frac{s}{2}\right) \cdot \alpha} = \frac{s}{2 \cdot R_1 + s} \quad (2.50)$$

$$R_{1\min} = \frac{s}{2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_{1\max}} - 1 \right) = c \cdot s \quad (2.51)$$

c - koeficient který lze zjistit pomocí odborné literatury pro určité materiály

$R_{1\min}$ - minimální poloměr ohybu vnitřní stěny.

b) Maximální hodnoty poloměru se dosáhne, dojde-li v krajních vláknech právě k trvalé deformaci a to je v okamžiku, kdy napětí dosáhne meze kluzu daného ohýbaného materiálu.

Při tomto výpočtu se bude vycházet z Hookova zákona (2.6) a rovnice (2.50).

$$\varepsilon_{1\min} = \frac{\sigma_K}{E} = \frac{s}{2 \cdot R_{1\max} + s}$$

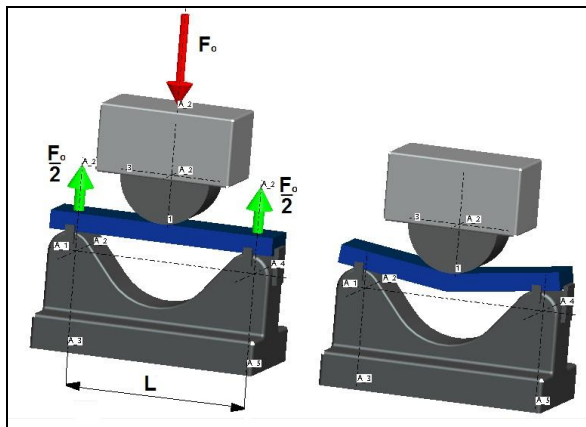
$$R_{1\max} = \frac{s}{2} \cdot \left(\frac{E}{\sigma_K} - 1 \right) \quad (2.52)$$

$R_{1\max}$ - maximální poloměr ohybu vnitřní stěny.



2.1.7 Výpočet potřebné ohýbací síly

Při výpočtu potřebné ohýbací síly se rozlišuje ohyb do tvaru V a ohyb do tvaru U. Pro představu bude uveden výpočet síly ohybu do tvaru V viz obr. 2.25, kde pro zjednodušení bude ohýbaný výrobek uvažován jako nosník se dvěma podporami ve vzdálenosti L zatížený silou uprostřed.



Obr. 2.25: Schéma pro výpočet ohýbací síly

$$M = \frac{F_o}{2} \cdot \frac{L}{2} = \sigma_o \cdot W_o = \sigma_o \cdot \frac{b \cdot s^2}{4} \quad (2.53)$$

$$F_o = \sigma_o \cdot \frac{b \cdot s^2}{L} = R_m \cdot C \cdot \frac{b \cdot s^2}{L}$$

(2.54)

Kde C je součinitel zpevnění, neboli Celiho součinitel a jeho hodnota se získá dle vztahu (2.55).

$$C = 1 + \frac{4 \cdot s}{L} \quad (2.55)$$

V odborné literatuře jsou uvedeny i jiné způsoby výpočtu ohýbací síly.

$$F_o = \frac{2b \cdot s^2 \cdot R_m}{3 \cdot L} \quad (2.56)$$

$$F_o = \frac{b \cdot s \cdot R_m}{2\rho} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \quad (2.57)$$

Z důvodu tření mezi nástrojem a ohýbanou součástí je nutné zvýšit ohýbací sílu přibližně o 30%. Pokud bude zvažována současně i síla kalibrovací (2.58), kde S je plocha kalibrovaného materiálu a q specifický tlak na vyrovnání, potom celková ohýbací síla bude rovna vztahu (2.59).

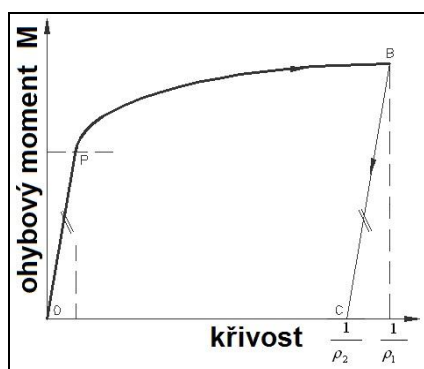
$$F_k = S \cdot q \quad (2.58)$$

$$F_C = 1,3F_o + F_k \quad (2.59)$$

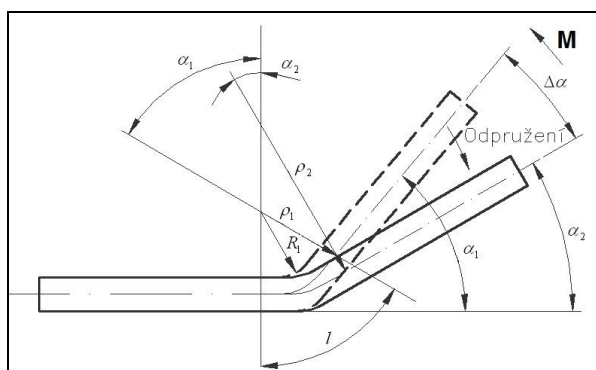
2.2 Odpružení při ohybu [2], [3], [5], [8]

Ohyb za studena doprovází pružně plastické deformace. Kolem střední oblasti průřezu ohýbaného materiálu jsou tahová a tlaková napětí malá, dosahují dokonce hodnot nižších, než je mez kluzu R_e daného materiálu, jedná se tedy o oblast pružné deformace. Tato pružná deformace má za následek nežádoucí děj odpružení po odlehčení materiálu. Výsledný tvar ohnuté součásti po odpružení nesouhlasí s tvarem ohýbadla. Proto při konstrukci ohýbacích nástrojů je třeba na odpružení brát velký zřetel a tento problém řešit v rozborové části, jinak bude docházet ke zbytečným ekonomicko-časovým ztrátám z důvodu další výrobní operace tzv. doohnutí ohýbaného tělesa.

Na obr. 2.23 je znázorněna závislost ohybového momentu na křivosti. Vztahuje se pouze na případ, kdy ohybový moment vzrůstá a dosahuje maximální hodnoty. Pokud se hodnota ohybového momentu začne zmenšovat, dojde k odlehčení. Při tomto ději nedochází k další plastické deformaci, ale nastává zpětná pružná deformace – odpružení, viz obr 2.26.



Obr. 2.26: Vliv odpružení /2/



Obr. 2.27: Schéma odpružení po ohybu /2/

Při zatížení úzké tyče určitou hodnotou ohybového momentu M , který překoná napětí na mezi kluzu, dojde v krajních vláknech k odpovídající trvalé deformaci o úhel α_1 . Po následném odlehčení se projeví odpružení na úhel α_2 viz obr. 2.27. Tato změna je charakterizována i změnou křivosti (2.60). Rozdílem těchto křivostí je pružná deformace (2.61), která byla vyvolaná dle teorie pružnosti ohybovým momentem M při dané ohybové tuhosti EJ dle (2.13).

$$\frac{1}{\rho_1} \Rightarrow \frac{1}{\rho_2} \quad (2.60)$$

$$\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} = \frac{M}{E \cdot J} \quad (2.61)$$



2.2.1 Odpružená křivost pro úzké tyče

Pro odvození odpružené křivosti pro úzké tyče bude dosazena rovnice (2.14) a moment setrvačnosti průřezu ohýbané tyče vzhledem k neutrální ose J do rovnice (2.61).

$$\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} = \frac{2 \cdot \sigma_{1p}}{s \cdot E} \quad (2.62)$$

2.2.2 Odpružená křivost pro široké pásy

$$\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} = \frac{M}{E \cdot J} \cdot (1 - \mu^2) = \frac{2 \cdot \sigma_{1p}}{s \cdot E} \cdot (1 - \mu^2) \quad (2.63)$$

2.2.3 Výpočet úhlového odpružení

Výpočet lze vyjádřit pomocí poloměrů zakřivení ρ_1 a ρ_2 , které byly využity v předešlých rovnicích pro odpruženou křivost pro úzké tyče (2.62) a pro široké pásy (2.63). Za pomoci úhlů v obloukové míře α_1, α_2 a délky středního oblouku l , lze napsat rovnici (2.64), protože odpružení je způsobeno pružnou deformací.

$$\alpha_1 \cdot \rho_1 = \alpha_2 \cdot \rho_2 = l \quad (2.64)$$

Po dosazení do rovnic.

Pro úzké tyče:
$$\Delta\alpha = \frac{M \cdot l}{E \cdot J} = \frac{2 \cdot \sigma_{1p}}{s \cdot E} \quad (2.65)$$

Pro široké pásy:
$$\Delta\alpha = \frac{M \cdot l}{E \cdot J} \cdot (1 - \mu^2) = \frac{2 \cdot \sigma_{1p}}{s \cdot E} \cdot (1 - \mu^2) \quad (2.66)$$

Pro praktický výpočet odpružení je k dispozici celá řada empirických vztahů a grafů. V dnešní době se pro zjištění odpružení využívají i graficko-početní softwary jako je např. PAM-STAMP 2G.

Při modelaci procesu tváření je nejprve nutné vytvořit virtuální nástroj, na němž se bude tvářet výrobek. V první fázi je nutné ověření lisovatelnosti výrobku pro navržený nástroj. Po korektním zadání vstupních hodnot z hlediska procesu i z hlediska tvářeného materiálu lze provést např. komplexní analýzu lisování, napětovo-deformační analýzu, ale i analýzu odpružení.



2.2.4 Hlavní vlivy na děj odpružení

- mechanické vlastnosti materiálu
 - u materiálů s vyšší pevností R_m bude větší odpružení $\Delta\alpha$
- modul pružnosti v tahu E
 - u materiálů s vyšší tuhostí míra odpružení klesá
- poloměr ohybu
 - u součástí s velkým poloměrem ohybu bude odpružení větší
- úhel ohybu
 - u součástí s velkým úhlem ohybu bude odpružení větší
- tloušťka ohýbaného materiálu
 - s rostoucí tloušťkou ohybku bude odpružení menší
- způsob ohýbání
 - s využitím kalibrace se odpružení snižuje
- velikost napětí v oblasti trvalé deformace
 - pokud bude vyšší napětí, bude i větší oblast plastické deformace a tím bude odpružení menší
- poloměr ohybnice
 - s rostoucím poloměrem ohybnice odpružení klesá
- konstrukcí ohýbadla
 - viz kapitola 2.2.5 eliminace odpružení při ohybu

Pokud se budou dodržovat stejné technologické podmínky, může i přesto docházet k rozdílnému odpružení. Tento důvod je zapříčiněn výrobní tolerancí tloušťky tyče, plechu, či pásu a vlivem kolísání mechanických vlastností daného materiálu. Proto by výrobní tolerance rozměrů výlisku neměla klesnout pod toleranci při prostém ohýbání, viz tab. 2.2.

Tab. 2.2: Tolerance úhlu ohybu /9/

MATERIÁL	Poměr poloměru ohybu a tloušťky ohýbaného materiálu $\frac{R}{s}$		
	<1	1 až 2	2 až 4
Měkká ocel, mosaz	$\pm 15'$	$\pm 30'$	$\pm 1^\circ$
Středně tvrdá ocel	$\pm 30'$	$\pm 1,5^\circ$	$\pm 3^\circ$
Tvrdá ocel, polotvrdá mosaz	—	$\pm 3^\circ$	$\pm 5^\circ$



Pro představu jsou hodnoty velikosti odpružení u vybraných materiálů dle poměru poloměru ohybu a tloušťky ohýbaného materiálu uvedeny v tab. 2.3.

Tab. 2.3: Hodnoty úhlu odpružení pro vybrané materiály /7/

Materiál	Poměr $\frac{R}{s}$	
	0,8 až 2	>2
Ocel $R_m \leq 320 [MPa]$	1°	3°
Ocel $R_m = 320 \div 400 [MPa]$	3°	5°
Ocel $R_m \geq 400 [MPa]$	5°	7°
Mosaz měkká	1°	3°
Mosaz tvrdá	3°	5°
Hliník	1°	3°

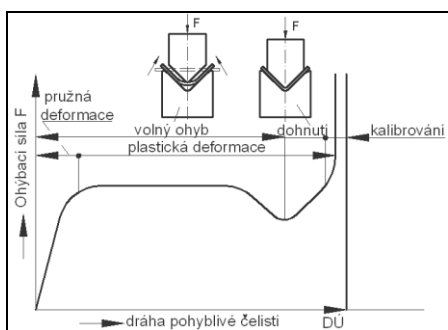
2.2.5 Eliminace odpružení při ohybu

K minimalizaci odpružení, tzv. projevu zpětné pružné deformace, tedy aby bylo dosaženo požadované tvarové a rozměrové přesnosti ohybku, je celá řada způsobů.

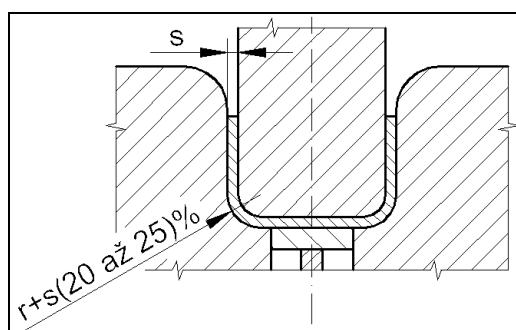
- Výlisek se ohne o něco více, ale tento způsob není vhodný pro hromadnou výrobu. Ohýbaný materiál je definován odpovídajícím chemickým složením v určitém rozmezí a rozdělen do určité skupiny. Proto lze zaručit pouze přibližně stejné mechanické vlastnosti, které mají vliv také na rozdílnost velikosti odpružení.
- Pomocí dolisování. Tento způsob se provádí při volném ohýbání a je spojen s prudkým nárůstem síly viz obr. 2.28. Materiál se lisuje mezi pracovními plochami ohýbadla. Toto dolisování se nazývá kalibrace. Kalibrovací tlak se volí experimentálně v praxi, podle možnosti pracovního stroje a požadavku na výlisek. Kalibrace odpružení zcela neeliminuje, ale podstatně sníží míru tohoto negativního jevu.
- Další způsob je místní plastické přetvoření v místě ohybu. Pomocí poloměru s upravenou ohybnicí viz obr. 2.29. Dochází k většímu zpevnění a snižuje se tak odpružení.
- Pomocí tzv. prolisu, tvarového vyztužení v místě ohybu, např. vytvoření žeber ve směru kolmém k ohybu. Tento způsob mění tvar výlisku. Musí se zhodnotit, jestli prolis nebude překážet. Viz obr. 2.30.



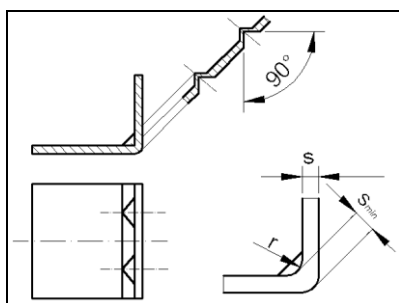
- Pomocí tzv. razící hrany, jedná se o úpravu ohybníku. Způsob je vhodný pro tenké materiály, zpevnění díky razící hraně. Viz obr. 2.31.
- Pomocí podbroušení ohybníku viz obr. 2.32.
- Pružné deformace dna viz obr. 2.33, pomocí úpravy ohybníku a ohybnice. Pružná deformace nastává nejprve u dna, napětí musí splňovat podmínku pružné deformace. Vhodné pro pružné materiály.



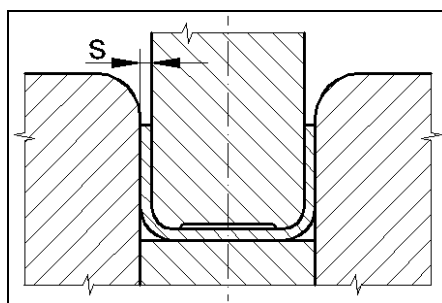
Obr. 2.28: Průběh ohýbací síly /3/, /7/



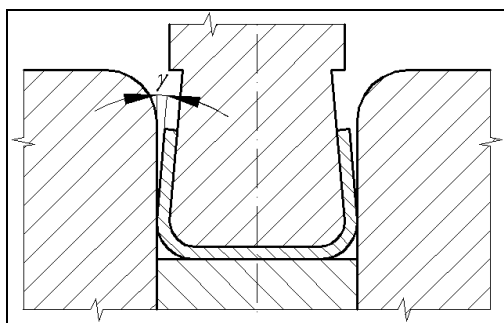
Obr. 2.29: Deformační poloměr /3/, /7/



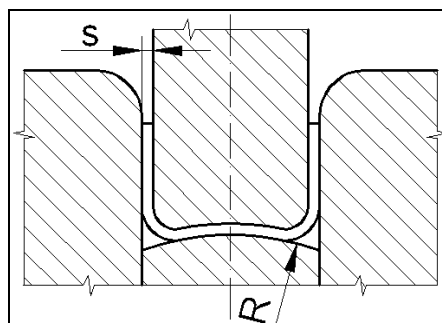
Obr. 2.30: Vyztužujícího žebra /3/, /7/



Obr. 2.31: Razící hrana /3/, /7/



Obr. 2.32: Podbroušení ohybníku /3/, /7/



Obr. 2.33: Zaoblením ohybníku /3/, /7/



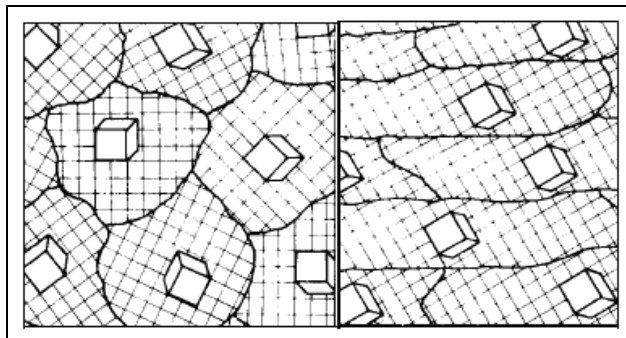
2.3 Anizotropie [3], [9], [10]

Anizotropie je důležitý materiálový ukazatel a také potřebná vstupní hodnota pro matematicko-početní softwar. Definice uvádí, že anizotropie je nestejnomyšlnost vlastností v různých směrech souřadného systému.

Osa x je totožná se směrem válcování, tento směr se v praxi označuje jako směr 0° viz obr. 2.35.

Rozhodující vliv na anizotropii má textura. Textura je výsledkem tváření, ale lze ji podstatně ovlivnit už při lití polotovaru (ingotu).

- **Vláknitá textura** je způsobena především nehomogenitou chemického složení a přítomností vměstků v litém polotovaru.
- **Řádkovitá textura** vzniká uspořádáním strukturních fází při tváření ocelí s vícefázovou strukturou. Tvoří se tzv. řádky např. feritu a perlitu.
- **Deformační textura strukturální** při tváření za studena, dochází i ke zpevnění, může vzniknout u všech materiálů.
- **Deformační krystalografická textura** vzniká při tváření nebo tepelném zpracování a jedná se o uspořádání původně náhodně orientovaných jednotlivých zrn do jisté přednostní orientace. Viz obr. 2.34. Záměrně je vyvolána především u plechů, orientací se zvyšuje pevnost, materiál je odolný proti ztenčování.



Obr. 2.34: Záměrně vyvolaná orientace zrn /10/

- **Anizotropie normálová** (ve směru tloušťky) – Po odebrání vzorků dle obr. 2.35 se zkoumá nerovnoměrnost vlastností v rovině plechu ku rovině kolmé na ni. Způsob měření anizotropie je určen normou ČSN ISO 10113. Po změření parametrů zkušební tyčky bude vyvolána deformace, viz obr. 2.36. Velikost deformace je předepsaná normou dle zkoumaného materiálu. Po prodloužení musí být znovu změřeny parametry. Z naměřených hodnot před a po předepsané deformaci lze vypočítat normálovou anizotropii dle vztahu (2.66). Jeho hodnota vypovídá, kolikrát

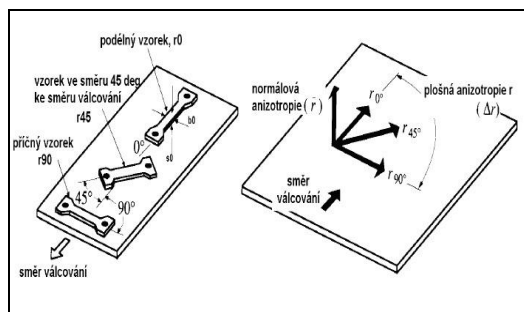


více se daný materiál tváří ve směru šířky než ve směru tloušťky materiálu. Střední hodnota se vypočítá dle vztahu (2.67).

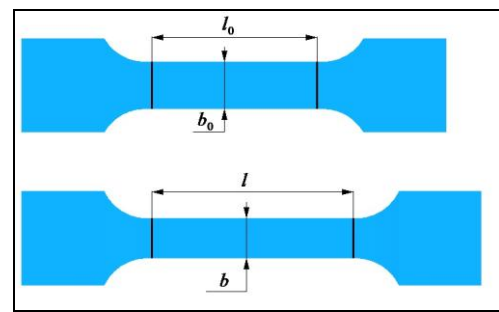
$$r_{(0,45,90)} = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{l_0 \cdot b_0}{l \cdot b}} \quad (2.66)$$

$$r_s = \frac{1}{4}(r_0 + 2r_{45} + r_{90}) \quad (2.67)$$

Z hlediska tvařitelnosti a hlubokotažnosti je výhodné, je-li koeficient normálové anizotropie r_s co největší. Pro špičkové hlubokotažné materiály je střední normálová anizotropie větší než hodnota dva.



Obr. 2.35: Označení dle směru válcování /10/



Obr. 2.36: Zkušební tyčka

- **Anizotropie plošná** (v rovině plechu) - hodnotí se jako změna mechanických vlastností v závislosti na směru odebrání zkušební tyčky. Pro její určení je nutné znát normálovou anizotropii ve všech třech směrech. Je příčinou vzniku cípů a pro tváření je výhodné, je-li plošná anizotropie co nejmenší (2.68).

$$\Delta r = \frac{1}{2}(r_0 - 2r_{45} + r_{90}) \quad (2.68)$$

2.4 Statická zkouška tahem EN ISO 6892-1 [2], [3], [6]

Nejrozšířenější normalizovaná statická zkouška. Využívá se u všech technických materiálů, pomocí ní jsou zjišťovány některé základní hodnoty potřebné pro výpočet konstrukčních prvků a volbu vhodného materiálu. Zkoušky tahem se zpravidla nedělají přímo na vyrobené součásti, ale na zkušebních tyčkách, jejichž tvary jsou normalizované. Norma udává i podmínky prostředí, při kterých se zkouška provádí. To je z důvodu porovnatelnosti a důvěryhodnosti dosažených výsledků.



Nejdůležitější části trhacího stroje jsou snímače síly a dráhy. Pro statické zkoušky se používají tenzometrické snímače a pro dynamické děje se využívají kapacitní. Cejchovaný tenzometrický snímač je propojen s počítačovým zařízením přes AD převodník, který pracuje v rozsahu ± 10 V. K naměření správných výsledků se musí minimalizovat tzv. šum měření, proto se musí zvolit vhodný rozsah velikosti tenzometrického snímače pro danou zkoušku. Pro měření prodloužení Δl se nejčastěji v laboratořích používají extenzometry (dotykové, optické, laserové).

Před upnutím zkušební tyčky do upínacích čelistí je nutné zjistit původní hodnotu průřezu tyčky. Po upnutí a následném spuštění trhacího stroje do pracovního chodu dochází k posuvu příčnicku. Rychlost posuvu příčnicku odpovídá napětovému růstu za časovou jednotku, která je daná normou. Přes tenzometrický snímač se měří vyvolaná tahová síla F a přes extenzometr se měří prodloužení tyčky. Zkouška probíhá nejčastěji až do porušení celistvosti. Výstup je tzv. smluvní diagram, který udává závislost napětí R na poměrné deformaci ε viz obr. 2.37.

Základní hodnoty získané z tahové zkoušky:

- obecně smluvní napětí

$$R = \frac{F}{S_0} \quad (2.69)$$

- mez pevnosti v tahu R_m

$$R_m = \frac{F_{\max}}{S_0} \quad (2.70)$$

- prosté prodloužení Δl

$$\Delta l = l_U - l_0 \quad (2.71)$$

- poměrné prodloužení

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_U - l_0}{l_0} \quad (2.72)$$

- tažnost

$$A_x = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100 = \frac{l_U - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad (2.73)$$

- kontrakce

$$Z = \frac{S - S_0}{S_0} \cdot 100 \quad (2.74)$$

- mez v kluzu R_e , $R_{p0,2}$, $R_{eH} \div R_{eL}$

$$R_e = \frac{F_K}{S_0} \quad (2.75)$$



Odvozené ukazatele:

- ukazatel hlubokotažnosti

$$UH = \frac{R_e}{R_m} \quad (2.76)$$

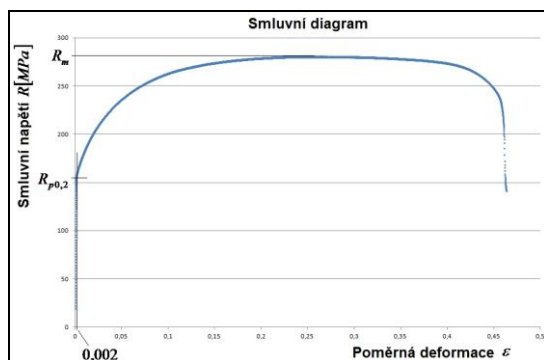
- komplexní ukazatel tvařitelnosti

$$KUT = \frac{R_e}{R_m} \cdot A_x \quad (2.77)$$

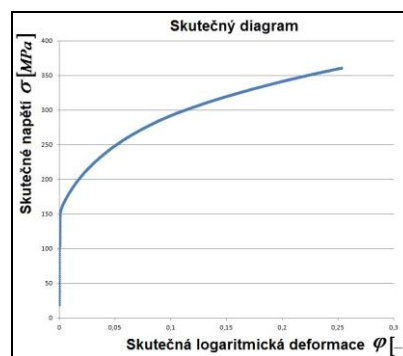
- zásoba plasticity, kde koeficient k je volen dle materiálu.

$$ZP = k \cdot (R_m - R_e) \cdot A_x \quad (2.78)$$

Průběh smluvního diagramu s nevýraznou mezí kluzu $R_{p0,2}$ viz obr. 2.37.



Obr. 2.37: Smluvní diagram



Obr. 2.38: Skutečný diagram

Skutečné hodnoty zohledňují i změnu průřezu S při homogenní deformaci. Korektní přepočít ze smluvních naměřených hodnot na skutečné hodnoty platí pouze do smluvní meze pevnosti R_m , protože do této hodnoty je deformace homogenní v celé části zkoumané tyčky a tedy platí zákon zachování objemu (2.79). Skutečný diagram na obr. 2.38 zobrazuje závislost skutečného napětí σ (2.80) na skutečné logaritmické deformaci φ (2.82) a tato závislost se označuje křivka zpevnění.

- zákon zachování objemu:

$$l_0 \cdot S_0 = l \cdot S \quad (2.79)$$

- obecně skutečné napětí

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (2.80)$$



- po rovnosti vztahů (2.69) a (2.80) s využitím (2.79) bude skutečné napětí

$$\sigma = R \cdot \frac{l}{l_0} = R \cdot (1 + \varepsilon) \quad (2.81)$$

- skutečné logaritmické prodloužení

$$\varphi = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{\Delta l + l_0}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (2.82)$$

Pro využití mechanických vlastností materiálů pro simulační softwary nestačí znát pouze hodnotu přechodu do plastického stavu tzv. mez kluzu, dále pevnost v tahu a deformaci, ale je nutné matematicky popsat průběh závislosti skutečného napětí na skutečné logaritmické deformaci. Pro výpočet průběhu se používá metoda nejmenších čtverců a pro kovy se využívá regresivní mocninná funkce (2.83).

$$\sigma = C \cdot \varphi^n \quad (2.83)$$

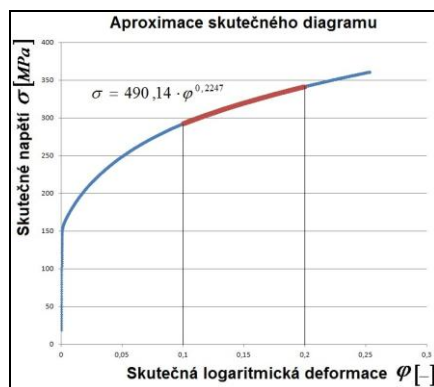
C - míra deformačního odporu

n - koeficient deformačního zpevnění, který vyjadřuje schopnost materiálu k plastickým deformacím (čím větší, tím homogennější a dobře tvárný)

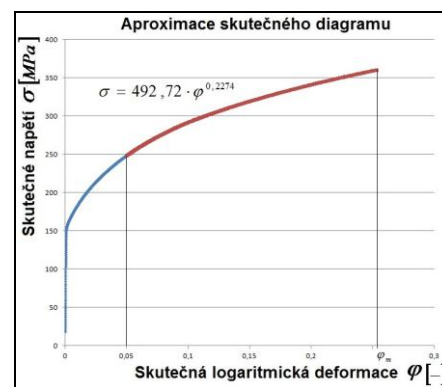
Podle normy pro statickou zkoušku tahem se aproximuje skutečný průběh v rozmezí (2.84) jako je příklad na obr. 2.39. Pro numerické simulace se aproximace uskutečňuje v rozmezí (2.85) viz obr. 2.40.

$$\varphi \in \langle 0,1; 0,2 \rangle \quad (2.84)$$

$$\varphi \in \langle 0,05; \varphi_m \rangle \quad (2.85)$$



Obr. 2.39: Aproximace dle normy



Obr. 2.40: Aproximace pro simulace

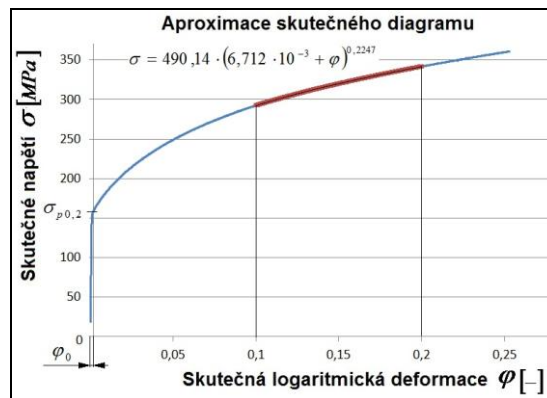
Podle aproximace (2.83) při malých deformacích bude docházet k chybě. Pro odstranění nepřesnosti bude posunut počátek závislosti o hodnotu φ_0 viz obr. 2.41, tím bude upraven i vztah do tvaru (2.86).

$$\sigma = C \cdot (\varphi_0 + \varphi)^n \quad (2.86)$$



Pro zjištění velikosti posunutí φ_0 bude využit vztah (2.87), kdy průběh naměřené závislosti prochází osou skutečného napětí v hodnotě $\sigma_{p0,2}$.

$$\varphi_0 = \sqrt[n]{\frac{\sigma_{p0,2}}{C}} \quad (2.87)$$



Obr. 2.41: Aproximace s posunutím

2.5 Optické systémy [12]

Základem optických systémů je tzv. fotogrammetrie, což je vědní obor zabývající se určováním tvarů, rozměrů a polohy zkoumaného objektu v prostoru ze snímků pořízených bez přímého proměrování. Obecně jde o obor zabývající se zpracováním informací z fotografických snímků. Moderní optické systémy se uplatňují v celé řadě různých oborů, jako je například medicína, geodzie, kartografie, strojírenství a atd. U všech oborů je obdobný postup, jedná se o snímání objektu CCD kamerami nebo digitálními fotoaparáty a pořízené snímky se dále příslušným speciálním softwarem zpracují a vyhodnotí. Optické systémy se uplatňují jak u rovinných, tak i prostorových objektů.

2.5.1 Skenovací optické systémy

Slouží k digitalizaci, tedy k měření objektů. Skenovací systémy jsou dotekové a bezdotekové. Dotekové měřicí systémy jsou velmi přesné, ale proměrování celého objektu je časově náročné. Pro bezdotekové měření existují přístroje 3D skener ATOS, přenosný optický systém TRITOP nebo REVSCAN, kterými lze měřit a vytvářet polygonální síť pracovního nástroje nebo odměřit odchylky reálného výrobku od simulovaného návrhu. Hlavní výhodou bezdotekového způsobu je rychlost měření.



3D skener ATOS

Mobilní bezdotykový optický 3D skener firmy GOM viz obr. 2.42 určený pro nejrůznější aplikace. Má vysokou výkonnost, velké rozlišení a širokou flexibilitu měřících objemů. Konkrétně se využívá na skenování poškozených tvarových vložek, celých sestav lisovacích nástrojů a vstřikovacích forem.

- hlavní přednosti:
 - vysoké rozlišení
 - mobilita
 - jednoduchost ovládání
 - velikost a hmotnost objektu neomezena
 - lze měřit i lesklé povrchy
- Výstupy z digitalizace:
 - optimalizovaná polygonální síť (STL)
 - mrak bodů
 - obrysové a kontrastní křivky
 - barevné mapy odchylek od CAD modelu
 - protokol měření
- Hlavní oblasti využití dat:
 - kontrola kvality
 - výroba prototypů
 - virtuální realita
 - simulace vstřikování plastů
 - simulace tažení plechů

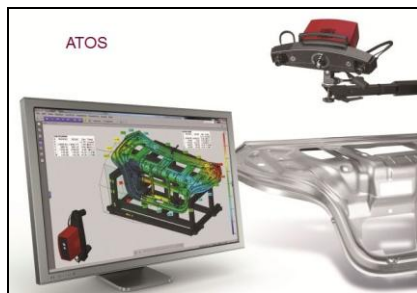
Systém TRITOP, REVscan

Přenosný optický měřicí systém určený k přesnému bezkontaktnímu měření polohy diskrétních bodů a viditelných značek na měřeném objektu viz obr 2.43. Mobilní technologie nabízí efektivní měření pro aplikace kontroly kvality a digitalizace.

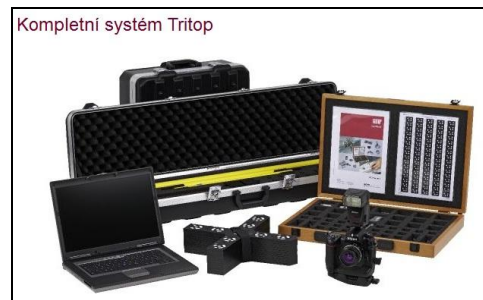
- hlavní přednosti
 - vysoká mobilita a rychlý přenos dat
 - flexibilita
 - jednoduchost ovládání



- definice souřadného systému
 - měření i měkkých materiálů (PUR pěna)
- Výstupy z digitalizace
- 3D souřadnice diskrétních bodů
 - 2D řezy mrak bodů
 - optimalizovaná polygonální síť (STL)
 - obrysové křivky
 - grafický a textový protokol měření
- oblasti využití dat:
- kontrola kvality
 - reverzní inženýrství
 - deformační analýzy
 - spolupráce se systémem ATOS



Obr. 2.42: 3D skener Atos /12/



Obr. 2.43: 3D skener Tritop /12/

2.5.2 Optické systémy pro měření 3D deformací

Slouží k měření především reálných 3D deformací, kde výsledkem je barevná mapa rozložení deformace na samotném objektu. Zatížení může být statické nebo dynamické. Patří sem systémy, jako jsou TRITOP DEFORMATION, ARAMIS, ARGUS, PONTOS.

ARGUS

Argus je bezkontaktní optický systém pro měření 3D deformací plechu při lisovacím procesu.

Na testovaný vzorek se nejprve elektrochemicky naleptá mřížka bodů, na objektech, na kterých bude předpokládána velká deformace se volí rozteč bodů menší a naopak. Mřížka se deformuje zároveň s tvářením plechového dílu.

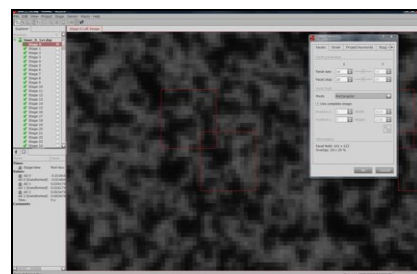


Plech je snímán digitálním fotoaparátem. Po vylisování je plech snímán z různých úhlů. Orientace snímků se provádí pomocí tzv. kalibračních kamenů, viz obr. 2.44. Tyto snímky jsou dále analyzovány pomocí image processingu a výsledky transformovány do 3D souřadnic bodů mřížky. Z hlediska deformace mřížky lze rozložit velikost samotné deformace dle barevné stopy a zároveň i analyzovat změnu tloušťky materiálu.

- hlavní přednosti:
 - mobilita
 - flexibilita
 - velký rozsah měření
 - rozsah měření deformace (od 0,5%)
 - vysoká přesnost a hustota dat
 - přehledná analýza výsledků

- Výstupy z měření:
 - hodnoty 3D posunutí
 - hodnoty 3D deformace
 - změny tloušťky materiálu
 - porovnání velikosti deformace vůči FLC
 - grafické a tabulkové výstupní protokoly

- oblasti využití:
 - ověřování simulace tažení
 - optimalizace procesu tváření
 - detekce oblastí s kritickou deformací
 - optimalizace lisovacích nástrojů



Obr. 2.44: Deformovaná síť pro Argus /12/ Obr. 2.45: Kontrastní vzor – pattern /12/



ARAMIS

Bezkontaktní měřicí systém firmy GOM pro měření reálných 3D deformací, který se skládá ze dvou CCD kamer. Výsledkem je barevná mapa rozložení deformací na objektu zatěžovaném buď staticky, nebo dynamicky. Proces měření může být spouštěn v pravidelných intervalech, nebo externím signálem (ruční ovladač).

Před samotným snímáním se musí dle velikosti zkoumaného objektu vytvořit tzv. pracovní prostor pomocí kalibračních destiček. V tomto prostoru bude snímána a vyhodnocována tvářecí operace. Dále se musí na zkoumaném objektu vytvořit kontrastní vzor tzv. pattern viz obr. 2.45. Samotný postup pro vytvoření patternu je jednoduchý. Na odmaštěný povrch se nanese sprejem souvislá bílá podkladová vrstva a po částečném ztuhnutí se dále aplikuje z větší vzdálenosti černá akrylátová barva sprejem. Před samotným měřením se zařízením viz obr. 2.46 vytvoří snímek a podle naneseného kontrastního vzoru rozdělí zkoumaný obraz na fazetky o předem dané velikosti a přiřadí jim stupeň šedi. Plochy fazetek se zároveň překrývají. Pattern se deformuje spolu se zatěžovaným objektem, tím se také mění poloha sledovaných fazet na každém zaznamenaném snímku. Z pořízených snímků jsou pomocí image processingu vypočteny 3D souřadnice bodů ležících na povrchu objektu. Při vyhodnocování dochází k porovnání odpovídajících bodů v jednotlivých úrovních zatížení a systém vypočítá v okamžiku zatížení 3D posuvy a následně tvar deformovaného objektu a 3D deformace viz obr 2.47.

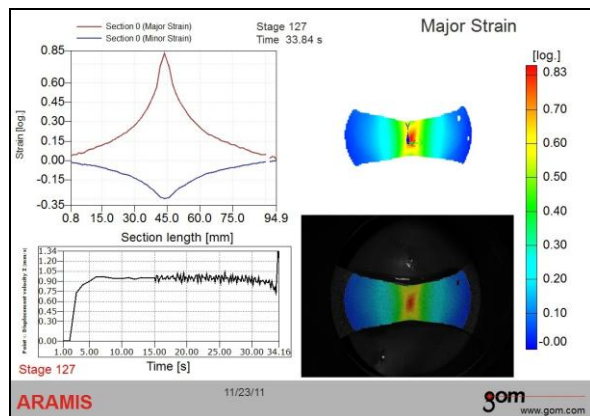
- hlavní přednosti:
 - mobilita
 - flexibilita
 - rozsah měření dle kalibračních destiček
 - rozsah měření deformace (od 0,05%)
 - jednoduchá příprava objektu
 - přehledná analýza výsledků
- Výstupy z měření:
 - hodnoty 3D posunutí bodů na povrchu
 - hodnoty 3D posunutí v radiálním směru
 - změny tloušťky materiálu
 - porovnání velikosti deformace vůči FLC
 - grafické a tabulkové výstupní protokoly



- oblasti využití:
- zkoušky materiálu
 - testování nových materiálů
 - výpočty stability
 - dimenzování součástek
 - optimalizace procesu tváření (FLC)



Obr. 2.46: Aramis zařízení



Obr. 2.47: Příklad výstupního protokolu



3 Experimentální část

3.1 Cíle experimentální části

Téma diplomové práce bylo vytvořeno ve spolupráci s firmou CDS holding s.r.o., kde úkolem experimentální části bylo analyzovat výrobní proces ohýbání pro blatník šasi vysokozdvizného vozíku firmy STILL WAGNER. Při výrobě blatníku dochází k rozměrovým odchylkám od požadovaných rozměrů daných výkresovou dokumentací. Tvar výrobku je vidět na obr. 3.1.



Obr. 3.1: Vyráběný blatník

Řešení diplomové práce lze shrnout do následujících bodů:

➤ analýza současného technologického postupu

Před započítím vlastního experimentu byl proveden rozbor současného technologického postupu výroby blatníku šasi. Byla zjišťována kinematika pohybu hydraulického lisu, používaná velikost kalibrační síly a geometrie současného nástroje, která se stanovovala pomocí 3D scanneru REVscan. Dále se zjišťovala mikrostruktura a tvar zrn oceli S235JR dle ČSN EN 10025-2 válcovaného plechu o jmenovitém rozměru 12 mm, používaného k výrobě výlisek.

➤ zjištění mechanických hodnot tvářeného materiálu

Pro zjištění, zda výlisek z numerické simulace v softwaru PAM-STAMP 2G odpovídá rozměrům výlisek ze současného procesu, bylo nutné zjistit přesné mechanické vlastnosti ohýbaného materiálu a jeho normálovou anizotropii. Tyto mechanické vlastnosti byly měřeny na zkušebních tyčkách vyrobené z odebrané části tvářeného plechu.



➤ simulace současného stavu

V rámci experimentální části byla z dat naměřených při reálném průběhu procesu vytvořena simulace současného výrobního postupu v softwaru PAM-STAMP 2G, která zároveň uvažuje odpružení ohýbaného materiálu. Popis materiálového chování je založen na Hillově formulaci podmínky plasticity se směrově závislou anizotropií plechu. V simulaci byl materiál definován pomocí křivky zpevnění podle Krupkowského.

➤ porovnání reálného stavu s numerickou simulací

Z vytvořené numerické simulace vznikl výlisek, u kterého byla provedena rozměrová analýza. Kontrolní rozměry výlisku byly porovnávány s kontrolními rozměry skutečných výlisků, které byly vytvořeny ze stejné tabule plechu jako vzorky pro zjišťování mechanických vlastností tvářeného materiálu. Rozměry skutečných výlisků byly měřeny pomocí 3D scanneru REVscan.

➤ návrh opatření pro změnu tvaru nástroje pomocí PAM-STAMP 2G

Po ověření shodnosti rozměrů skutečných a počítačově nasimulovaných dílů bylo možné v další části experimentu využít simulaci pro návrh nové kontury výrobního nástroje pro blatník šasi, který bude lépe splňovat požadavky výrobních výkresů v porovnání se stávajícím řešením. Nemělo by tudíž docházet k odchylkám od požadovaného rozměru.

Vyráběné blatníky jsou zobrazeny na obr. 3.2 a jsou tvářeny pomocí ohýbacího nástroje na hydraulickém lise, viz obr. 3.3.



Obr. 3.2: Vyráběný levý a pravý blatník



Obr. 3.3: Ohýbací nástroj



3.2 Analýza současného technologického postupu

3.2.1 Technologický postup výroby blatníku

Blatník je vyráběn z tabule plechu o rozměrech 1500x3000 mm z oceli označené S235JR dle ČSN EN 10025-2. Chemické složení a vlastnosti tvářeného materiálu dle normy jsou uvedeny v tab. 3.1. Tloušťka plechu je 12 mm, mezní úchytky rozměrů plechů z nelegovaných ocelí kontinuálně válcovaných za tepla se řídí podle ČSN EN 10051.

Tab. 3.1: Chemické složení, základní mechanické a technologické vlastnosti tvářeného materiálu S235JR EN 10025-2 [14]

Chemické složení v % hmot. Pro $s = 12[mm]$	C_{max}	Mn_{max}	Si_{max}	P_{max}	S_{max}	N_{max}
	0,19	1,50	-	0,045	0,045	0,014
Mechanické vlastnosti pro zkoušky v podélném směru, pro výrobky jmenovité tloušťky $s = 12[mm]$.	Minimální mez kluzu $R_{p0,2}[MPa]$					
	235					
	Pevnost v tahu $R_m[MPa]$					
	360 až 510					
	Minimální tažnost v % $(L_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0})$					
	26					
Technologické vlastnosti	Vhodný pro tváření za studena i za tepla, svařitelnost zaručená					

Postup výroby:

- Řezání plazmou z tabule plechu dle výrobního výkresu viz příloha 1, ve směru válcování plechu viz obr. 3.4, náhodná kontrola rozměrů.
- Ruční broušení od opalů.
- Očištění povrchu ve vzduchové tryskací komoře, povrch po tryskání viz obr. 3.5.
- Uložení výpalku do nástroje pomocí zakládacích dorazů
- Ohnutí a eliminace odpružení kalibrační silou o velikosti 140 [t] v ohýbacím nástroji na hydraulickém lise



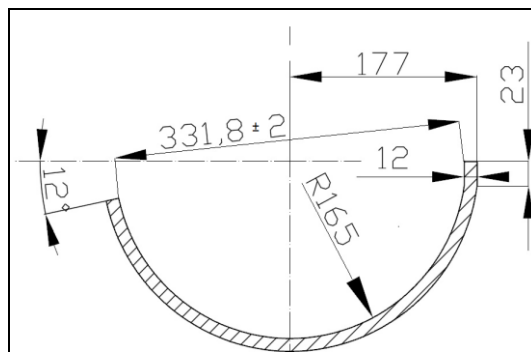
Obr. 3.4: Řezání plazmou



Obr. 3.5: Výpalek po tryskání v komoře

3.2.2 Měření skutečných rozměrů výrobního nástroje

Pro přesné změření parametrů dvoudílného nástroje pro výrobu blatníku šasi o rozměrech viz obr. 3.6, byl použit optický systém REVscan. Tento systém patří do skupiny bezdotykového měření. Samotný optický systém se skládá z počítačového zařízení s nainstalovaným skenovacím softwarem a ze speciálního měřicího zařízení, který obsahuje dvě kamery a laser třídy jedna, který umožňuje z bezpečnostního hlediska trvale možný pohled do svazku laserového paprsku. Před každou kamerou je červený filtr a čtyři červené ledky viz obr. 3.7.



Obr. 3.6: Řez blatníku šasi



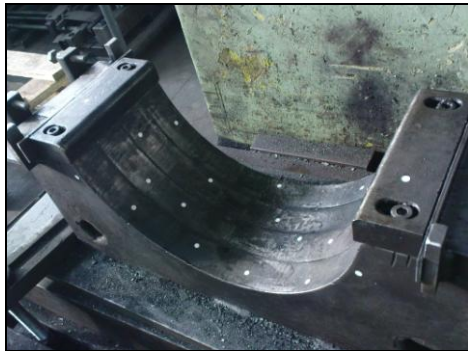
Obr. 3.7: Měřicí zařízení REVscan

Postup skenování měření se rozděluje do pěti základních fází:

- Kalibrace pomocí skleněné kalibrační desky, která musí mít stejné sériové označení jako měřicí přístroj.
- Měřený objekt se polepí referenčními body, viz obr. 3.8.
- Při začátku měření se rozsvítí červené ledky, které zaměří referenční nalepené body a určí podle nich polohu skeneru, viz 3.9.



- Při samotném měření se pomalým pohybem objíždí kontura sledovaného objektu a dle velikosti objektu se upraví v softwaru velikost pracovního prostoru.
- Výpočet v softwaru.



Obr. 3.8: Referenční body na nástroji



Obr. 3.9: Zaměření referenčních bodů

Postup skenování byl aplikován na spodní část tvářecího nástroje viz obr. 3.9 a stejný postup měření byl také aplikován na horní část nástroje, viz obr. 3.10 a obr. 3.11.

Výstup měření je dán jako mrak bodů ve formátu stl viz obr. 3.12 a obr. 3.13, z kterého lze vytvořit složité polygonální síť nebo lze proložit mrak bodů základními geometrickými útvary.



Obr. 3.10: Zaměření referenčních bodů



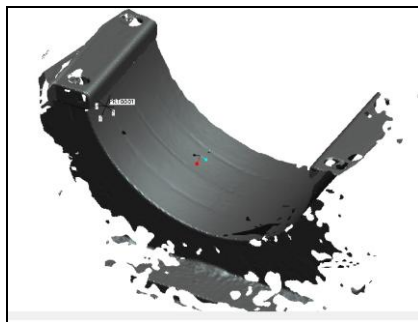
Obr. 3.11: Měření kontury ohybníku

Po proložení geometrickými útvary vznikne plošná kontura zkoumaného prvku, s níž po převedení do formátu igs nebo stp lze pracovat dále v CAD systémech. Pro zjištění jmenovitého rozměru a jeho standardní odchylky byl použit software Geomagic studio 12, kde pro grafickou přehlednost odchylek od jmenovitého rozměru byly použity barevné stopy, což je patrné na obr 3.16.

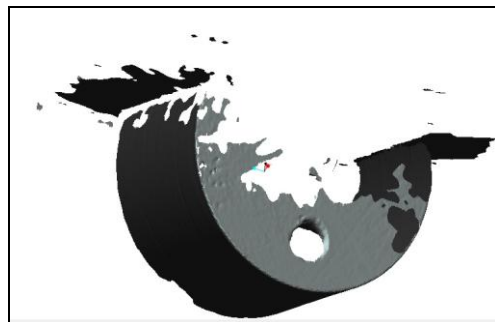


Grafické znázornění odchylky od jmenovitého rozměru u pohyblivé části tvářecího nástroje je přiloženo v příloze 2. Ze získaných výsledků měření je patrné, že standardní odchylka tvaru celého tvářecího nástroje se pohybuje v rozmezí tří desetin milimetru.

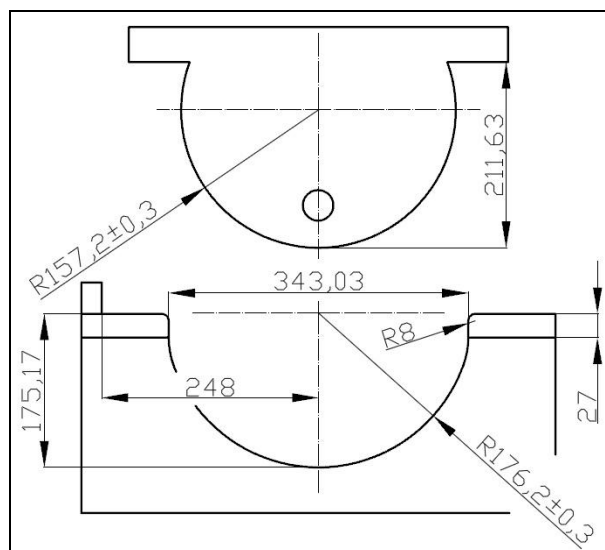
Pomocí bezdotykového optického systému 3D skeneru REVscan byly získány přesné rozměry lisovacího nástroje pro blatník šasi vysokozdvizného vozíku, které jsou patrné na obr. 3.14. Naměřené rozměry byly využity pro simulaci tvářecího procesu.



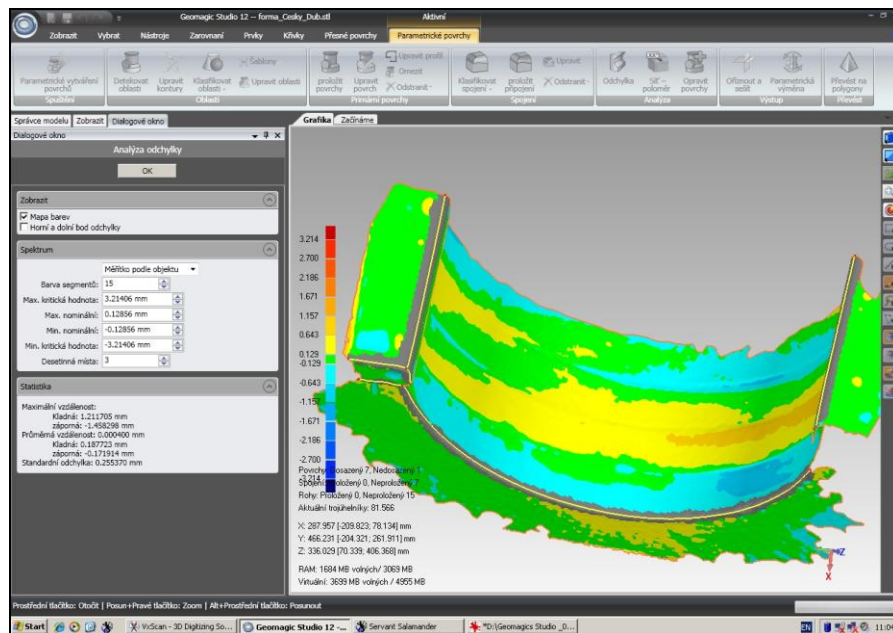
Obr. 3.12: Mrak bodů ohybnice



Obr. 3.13: Mrak bodů ohybníku



Obr. 3.15: Skutečné rozměry současného



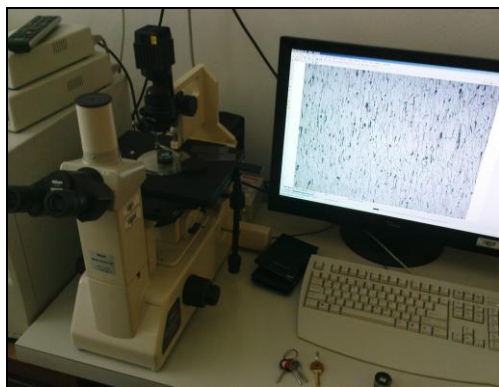
Obr. 3.16: Rozměrová analýza v softwaru Geomagic Studio 12

3.2.3 Tvar zrna oceli S235JR

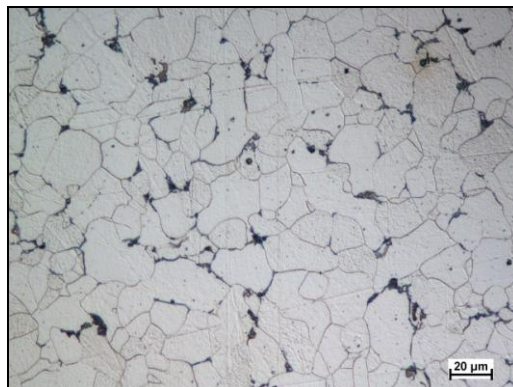
Ocel S235JR má dané chemické složení podle ČSN EN 10025-2, ale norma nevypovídá nic o stavu a tvaru zrna.

Za účelem studia tvaru zrna během tváření byly zhotoveny výbrusy ze zkušebních tyček pro tahovou zkoušku. Broušení a leštění vzorků bylo provedeno na poloautomatické brusce Phoenix Beta za použití sady brusných papírů a leštící diamantové suspenze. Na závěr se provedlo naleptání vzorků Nitalem pro zviditelnění struktury, která se zkoumala pomocí optického mikroskopu Nikon Epiphot 200 viz obr. 3.17 s využitím Nomarského kontrastu pro zvýšení plastičnosti obrazu.

Vzorky byly pozorovány při zvětšení 200x a 500x a snímány kamerou Nikon DS-5M-U1 a tyto snímky byly elektronicky zpracovány. Při pozorování nedeformované oceli byla zjištěna mikrostruktura, kde feritická zrna jsou lemována místy žilkami zrn perlitu a jsou doprovázena oxidickými vměstkami, viz obr. 3.18. Dle množství a velikosti zrn se jedná o jemnozrnnou strukturu.

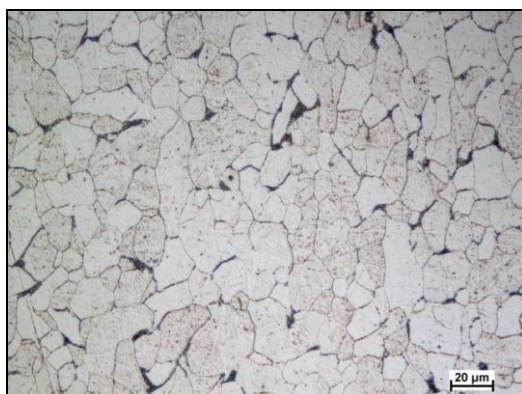


Obr. 3.17: Optický mikroskop

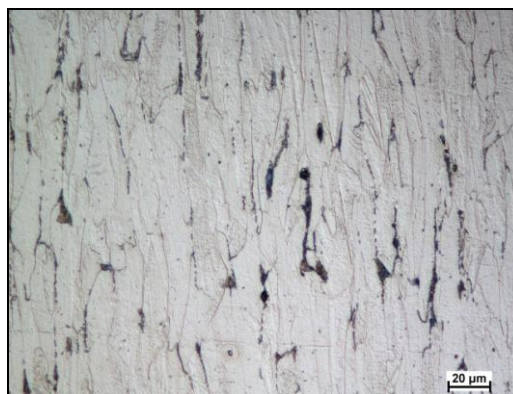


Obr. 3.18: Ocel S235J 500x

Při zkoumání získaných snímků z podélného průřezu přetržené tyčky lze i podle tvaru zrna rozlišit dvě deformační oblasti tváření, které vzniknou během statické zkoušky v tahu. Jedná se o oblast homogenní deformace, která je zachycena na snímku viz obr. 3.19 a oblast lokální nehomogenní deformace viz obr. 3.20.



Obr. 3.19: Homogenní deformace 500x



Obr. 3.20 Lokální deformace 500x

3.3 Měření mechanických vlastností materiálu

Pro vytvoření korektní simulace procesu se musí vycházet ze skutečných mechanických vlastností ohýbaného materiálu. Proto z tabule plechu byla oddělena část materiálu s označením směru válcování. Z této oddělené části byly obrobena zkušební tyčky požadovaného tvaru a rozměru ve směru 0° , 45° , 90° viz obr. 3.21 pro statickou zkoušku tahem. Pro každý směr bylo obrobena osm zkušebních tyček.

Pro statickou zkoušku tahem bylo z každé skupiny vzorků (0° , 45° , 90°) náhodně vybráno a otestováno pět tyček na stroji TIRAtest 2300 viz obr. 3.22.



Po zpracování naměřených hodnot byly získány odpovídající průběhy závislosti smluvního napětí na poměrné deformaci a skutečného napětí na skutečné logaritmické deformaci.



Obr. 3.21: Frézování zkušební tyčky

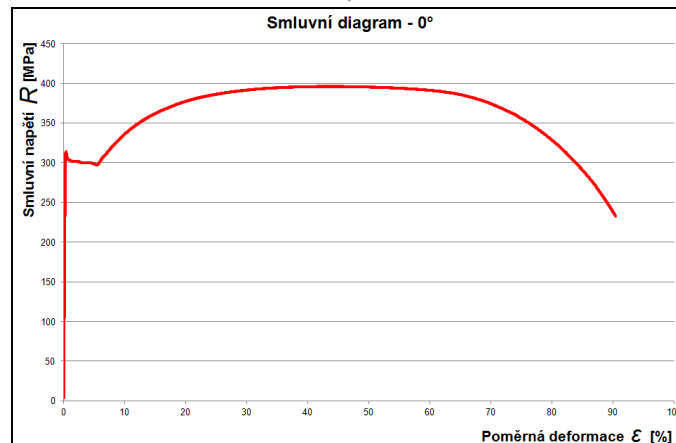


Obr. 3.22: Statická zkouška tahem

Pro srovnání s informacemi o charakteru materiálu, které jsou zaznamenány v tab. 3.1, byly naměřené smluvní hodnoty mechanických vlastností uvedeny v tab. 3.2. Na obr. 3.23 je znázorněn průběh tahové křivky pro použitý materiál. Dobře patrná je z něho tzv. Lüdersova prodleva v oblasti meze kluzu.

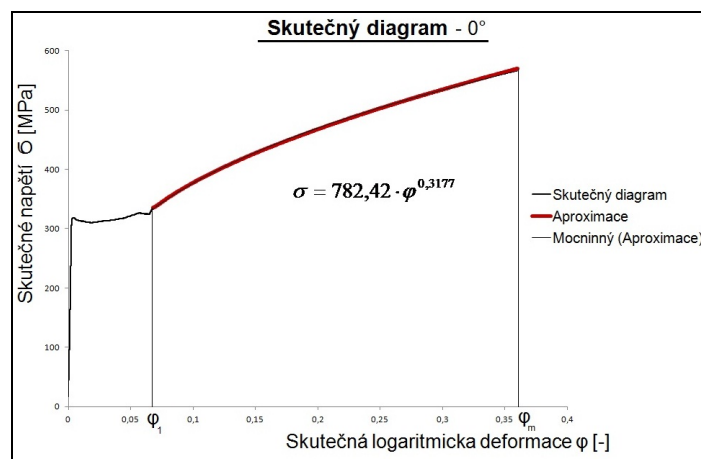
Tab. 3.2 Smluvní hodnoty

	Mez pevnosti	Mez kluzu horní	Mez kluzu dolní	Homogenní tažnost	Tažnost
	R_m [MPa]	R_{eH} [MPa]	R_{eL} [MPa]	A_{H50mm} [%]	A_{50mm} [%]
0°	$395 \pm 2,7$	320 ± 2	$299 \pm 2,1$	$43,5 \pm 0,3$	$89 \pm 0,4$
45°	$392 \pm 2,1$	$331 \pm 2,3$	$309 \pm 1,6$	$43 \pm 0,2$	$88,7 \pm 0,3$
90°	385 ± 2	315 ± 2	$300 \pm 1,7$	$41,8 \pm 0,3$	$88 \pm 0,3$



Obr. 3.23: Smluvní diagram zkušební tyčky 0°

Pro simulace smluvní diagram není potřebný, proto byl přepočten na diagram skutečný dle vztahů (2.81) a (2.82). Dále byly provedeny ze skutečného diagramu aproximace pomocí mocninné funkce (2.83) viz obr. 3.24.



Obr. 3.24: Aproximace skutečného diagramu u tyčky 0°

Všechny výsledky byly zprůměrovány a zaznamenány v tab. 3.3. Z naměřené závislosti je patrné, že u materiálu S235JR dle ČSN EN 10025-2 se projevuje deformační stárnutí, které je způsobeno interakcí intersticiálně uložených cizích atomů v mřížce, u oceli je to především vlivem dusíku a uhlíku.



Tab. 3.3: Pevnostní charakteristika

Deformační odpor C [MPa]	771,15
Koeficient zpevnění n	0,3202
Offsetová deformace φ_0	0,0766
Pevnostní charakteristika	$\sigma = 771,15 \cdot (0,0766 + \varphi)^{0,3202}$

Na ostatních devíti zkušebních tyčkách byla měřena normálová anizotropie v jednotlivých směrech r_0 , r_{45} , r_{90} . V první fázi měření bylo nutné odměřit šířku b_0 a délku l_0 . Použitá měřidla byla Abbeho komparátor, viz obr. 3.25, a digitální úchylkoměr. Jednotlivé tyčky byly následně protaženy na trhačím stroji o hodnotu 20% poměrné deformace a byly změřeny změny parametrů b a l viz obr. 3.26. Po dosazení do vzorce (2.66) a vypočtení průměrných hodnot v jednotlivých směrech byly získány výsledky, shrnuté v tab. 3.4.



Obr. 3.25: Abbeho komparátor



Obr. 3.26: Zkušební tyčky před a po deformaci

Tab. 3.4: Normálová anizotropie

	r	Průměr r
0°	0,900472	0,902 ± 0,001
	0,901924	
	0,904647	
45°	0,864882	0,876 ± 0,01
	0,88322	
	0,880306	
90°	1,039233	1,03 ± 0,02
	0,998097	
	1,049292	



3.4 Numerická simulace současného stavu

3.4.1 Numerická simulace v softwaru PAM-STAMP 2G [1]

Numerickou simulací je myšlena aplikace metody konečných prvků (MKP) na řešení problematiky plošného tváření výlisků s využitím odpovídajících rychlostních, posuvových a kontaktních okrajových podmínek. Simulace lisování je specifická úloha, která pracuje s geometrickou a materiálovou nelinearitou. Okrajové podmínky výpočetní úlohy jsou proměnné v čase. Z toho vyplývá náročnost na výpočetní čas a na hardwarové vybavení.

Software PAM-STAMP 2G (PM) patří do skupiny CAE aplikace, které podporují širokou řadu strojírenských disciplín či jevů. PM je specializovaný software pro simulace plošného tváření jako jsou technologie hluboké tažení, ohýbání, lisování do pryže, hydroforming plechů i trubek a atd.

Automaticky navazuje na CAD model nástrojů, který je při vkládání pomocí generátoru převeden ve výpočtovou síť CAE modelu. Výpočtová síť přístřihu či výpalku plechu je vytvořena v prostředí grafického preprocesoru i s potřebnými okrajovými, kontaktními a zatěžujícími podmínkami.

Časově integrační schéma řešení pohybové rovnice rovnováhy vnitřních a vnějších sil využívá explicitní formulace metody konečných prvků. Samotný řešič plně uvažuje s nelineární deformační historií přístřihu či výpalku plechu. Popis materiálového chování je založen na Hillově formulaci podmínky plasticity se směrově závislou anizotropií plechu.

Se znalostí deformační historie zahrnuje do výpočtu PM i kritéria porušování soudržnosti materiálu plechu v průběhu tváření. Výsledky prvního tahu deformace se přenáší do následující operace, kde se zohledňuje deformace v tloušťce plechu i deformačně napěťový stav výlisku. S touto deformační historií pracuje PM i na počátku nežádoucí zpětné deformace při odpružení.

K vytvoření procesu lisování je nutné mít určité znalosti a data. Seznam, který je uveden níže, obsahuje všechny informace, které jsou zapotřebí k simulaci procesu lisování.

- Soubor obsahující CAD data kontury nástrojů
- Soubor obsahující CAD data přístřihu plechu
- Orientace nástrojů vůči směru lisování

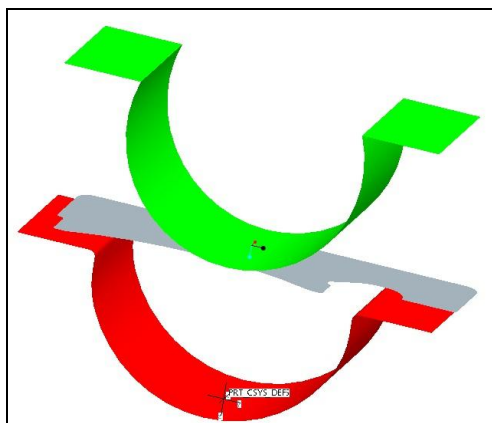


- Kinematika lisovacího procesu
- Přítlačná síla přidržovače či přidržovací tlak (při použití přidržovače)
- Součinitel tření mezi nástroji a přístřihem nebo výpalkem
- Kalibrační síla či kalibrační tlak (využití nejčastěji při ohýbání)
- Materiálové charakteristiky tvářeného plechu
 - Měrná hmotnost
 - Youngův modul pružnosti E
 - Tloušťka výpalku s
 - Poissonova konstanta μ
 - Součinitel normálové anizotropie r
 - Směr válcování
 - Křivka zpevnění (Deformační odpor, koeficient zpevnění, offsetová deformace)
 - Křivka mezního přetvoření daného materiálu

Jak je poznamenáno v prvních bodech, je doporučováno pro vlastní simulaci generovat geometrie nástrojů v souřadném systému v CAD softwarech jako je Creo či Catia a pro samotný přenos ze softwaru se používají data nejčastěji ve formátu igs či stp.

3.4.2 Postup pro vytvoření simulace výrobního procesu

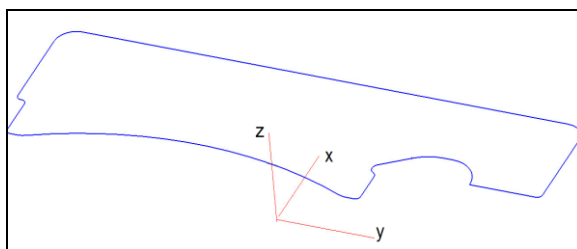
Pro zpřesnění výpočtového modelu bylo v softwaru PM pracováno se skutečnými naměřenými daty ve formátu igs, které byly naměřeny pomocí 3D skeneru REVscan předchozí kapitole. Po vytvoření plošných kontur nástrojů byl použit CAD software Creo, ve kterém byl přiřazen nástrojům i souřadný kartézský systém viz obr. 3.27, kde osa z je osa tváření. Kontury byly následně vloženy do výpočtového softwaru PM pro objemové tváření a s těmito nástroji se dále pracovalo pro vytvoření korektní simulace.



Obr. 3.27: Plošné kontury v softwaru Creo

V první fázi bylo nutné definovat vlastnosti tvářeného materiálu z hlediska geometrie a deformačních vlastností, které byly získány pomocí statických zkoušek. V simulaci byl materiál definován dle křivky zpevnění podle Krupkowskiho. Pro zvolený model definice křivky zpevnění materiálu je nutné znát pevnostní charakteristiky, které jsou uvedeny v tab. 3.3, a hodnoty normálové anizotropie, které jsou uvedeny v tab. 3.4.

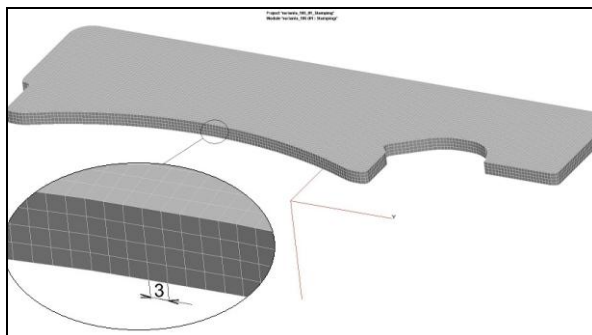
Následným krokem bylo vytvoření objemového tělesa z plošné kontury tvářeného plechu, protože při prvotním vkládání do systému PM se pracuje pouze s plošnými tvary. Pro zkonstruování objemového tělesa se musí vytvořit obrys plošné kontury výpalku, viz obr. 3.28.



Obr. 3.28: Obrys plošné kontury výpalku



Tento obrys se definuje jako objemový plech, ke kterému se následně přiřadí tloušťka materiálu a zároveň i deformační síť o určité velikosti. V tomto konkrétním případě se deformační síť skládala z jednotlivých elementů o velikosti strany 3 [mm], viz obr. 3.29.



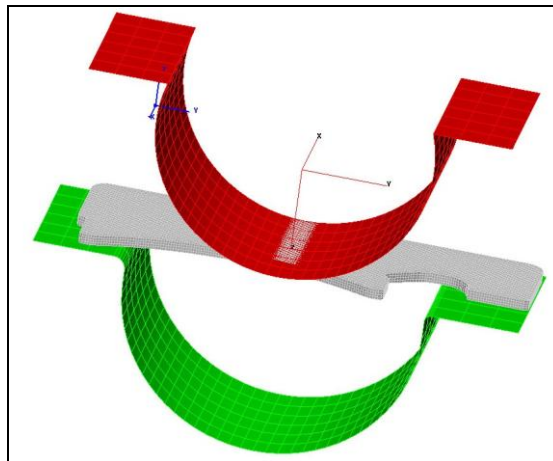
Obr. 3.29: Deformační síť

Dalším krokem programování simulace je definice činných částí nástroje. V tomto kroku se jednotlivým předdefinovaným nástrojům v PM přiřadí plochy, které byly vloženy do softwaru. Horní pohyblivá část nástroje se určí jako tažník, dolní část nástroje jako tažnice.

Dále se musí definovat kinematika pohybu nástroje. Kinematika pohybu beranu odpovídá současnému stavu tvářecího procesu, která byla zjištěná ve firmě CDS holding s.r.o.

Hodnota odpružení je výrazně ovlivněna velikostí kalibrační síly. Z toho důvodu byla ve firmě zjištěna reálná velikost kalibrační síly a ta byla použita do simulace, aby odpovídala současnému stavu. Při současném nastavení se na hydraulickém lise používá pojistný ventil, který zajistí velikost kalibrační síly a zároveň chrání hydraulický lis před přetížením. Maximální síla, která v tomto konkrétním nastavení lze na lise dosáhnout, je 1400 [kN]. Ukončení simulace se v příslušné části pracovního stromu nastaví jako ukončení výpočtu dosažením maximální síly.

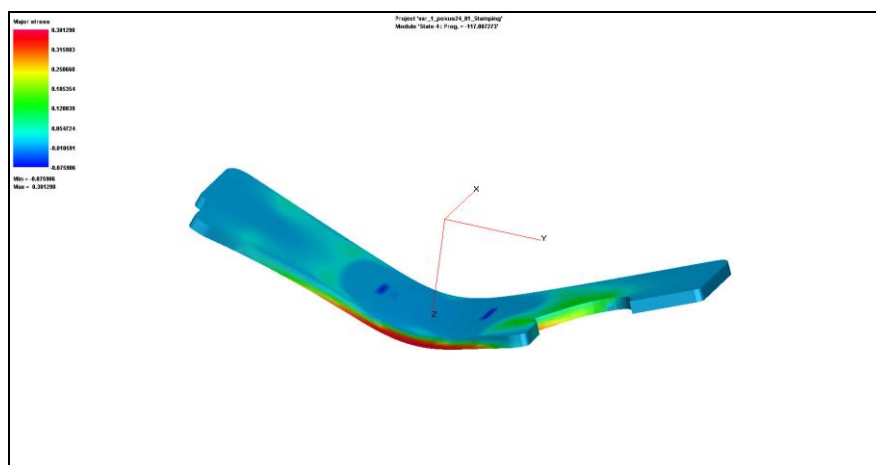
V reálném případě pracovní zdvih začíná 150mm před dotykem tažníku s výpalkem, který je založený pomocí základacích dorazů na dolní části nástroje. Pro numerickou simulaci je tento počátek procesu zanedbatelný. Simulace tedy začíná v okamžiku, kdy se dotkne horní pohyblivý nástroj založeného výpalku, což je výchozí bod simulace. Toto nastavení se nazývá tzv. napozicování. Při tomto pokynu v softwaru PM se určí jednoznačné pozice obou nástrojů vůči výpalku při započetí výpočtu. Na pracovní ose z se seřadí nástroje a ohýbaný plech na dotyk v pořadí tažník – výpalek – tažnice viz obr. 3.30.



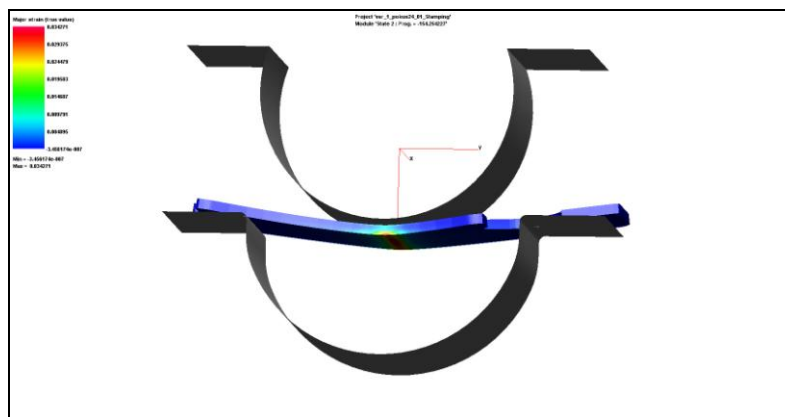
Obr. 3.30: Pozice při začátku výpočtu

Při každém ohybu dochází k nepříznivému vlivu zpětné pružné deformace tzv. odpružení. I přesto, že se využívá poměrně vysoká kalibrační síla, odpružení se eliminuje pouze z části. Proto se tento vliv nesmí zapomenout vnést do výpočtového modelu. Pomocí přednastavených aplikací byl na ohybek aplikován explicitní výpočet odpružení.

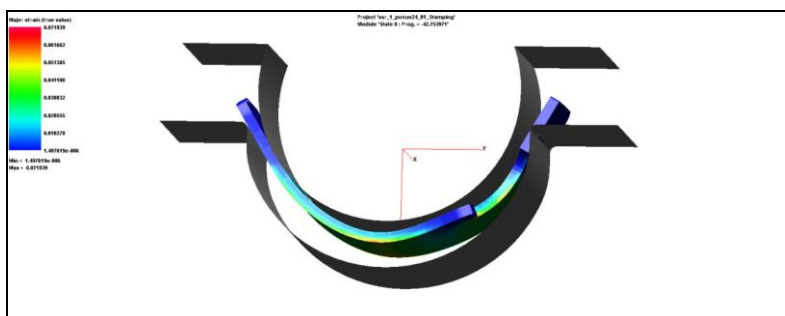
Po spuštění výpočetního cyklu lze v jeho průběhu sledovat pomocí grafických map dění v tvářeném tělese. Na obr. 3.31 je například vyvolané napětí v hlavním směru tváření. Průběh deformace v matematickém modelu skutečného procesu je zachycen na obr. 3.32 a na obr. 3.33.



Obr. 3.31: Vyvolané napětí



Obr. 3.32: Vyvolaná deformace na začátku tváření



Obr. 3.33: Vyvolaná deformace v průběhu tváření

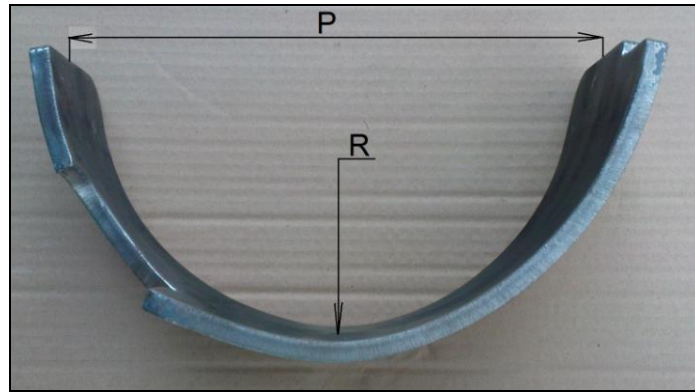


Obr. 3.34: Průběh výpočtu odpovídá tvářecímu procesu

3.5 Porovnání reálného stavu s numerickou simulací

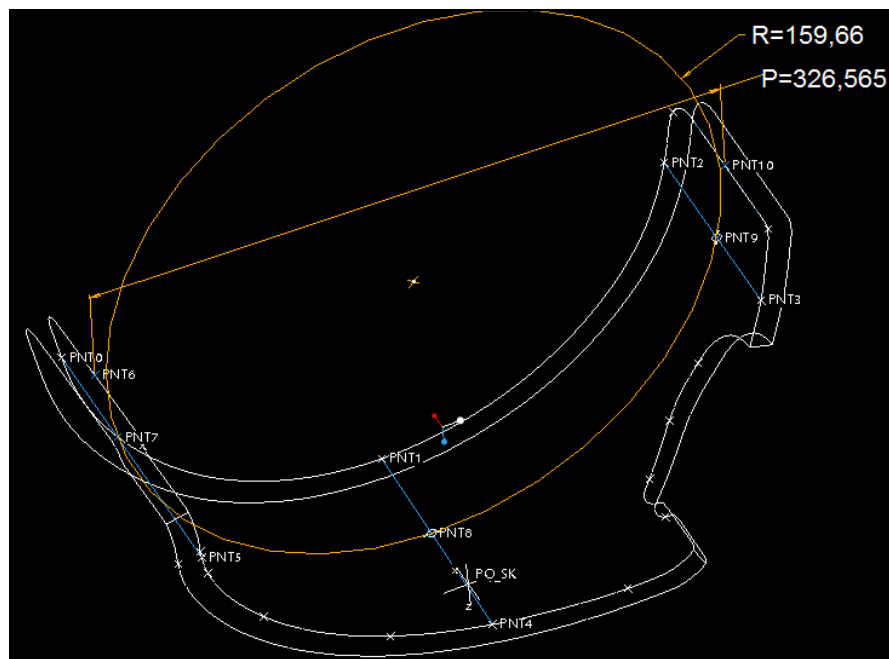
3.5.1 Rozměry výlisku po simulaci

Aby bylo možné porovnat matematický model se skutečným výliskem, bylo nutné přeměřit rozměry vypočteného ohybku. Jako kontrolní rozměry byly určeny dva hlavní parametry, vnitřní rádius R a rozměr rozevření výlisku P viz obr. 3.35. Tyto rozměry předepisuje výkresová dokumentace a jsou důležité pro následný montážní celek.



Obr. 3.35: Kontrolní rozměry

Pro zrealizování rozměrové analýzy byla vytvořena v softwaru PM obrysová kontura, která byla po převedení do formátu igs vložena do CAD softwaru Creo. Zde poté proběhlo proměření rozměrů jak u výlisku, u něhož se neuvažoval vliv odpružení, tak u dílu se započítaným odpružením. Průběh měření kontrolních rozměrů je patrný viz obr. 3.36. Změřené hodnoty jsou zaznamenány v tab. 3.5.



Obr. 3.36: Měření v softwaru Creo

Tab. 3.5: Kontrolní rozměry matematického modelu

Výpalek $t=12,15$ [mm]	R [mm]	P [mm]
Před odpružením	157,59	322,103
Po odpružení	159,66	326,565



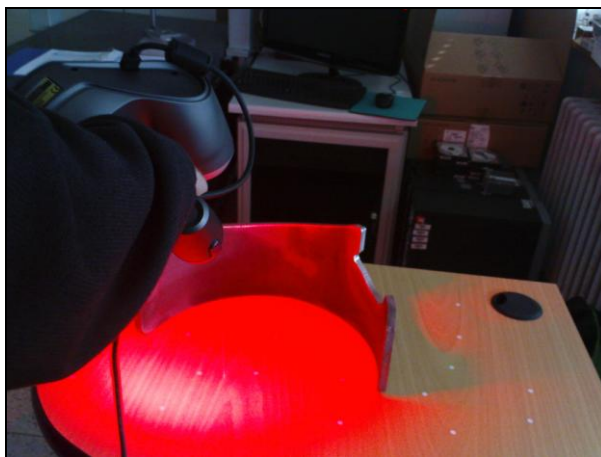
Tyto rozměry, které byly získány z numerické simulace, se budou porovnávat s rozměry reálných výlisků a na základě shody či neshody bude ověřena vhodnost použitého modelu simulace a nastavení parametrů.

3.5.2 Měření výlisku ze skutečného procesu

Pro naskenování skutečného tvaru a rozměrů výlisků byl zvolen 3D skener REVscan. Tento systém byl využit především z důvodů vysoké mobility, rychlého přenosu dat a jednoduchosti ovládání. Přesnost skenování uvádí výrobce systému v řádech setin, což pro měřený prvek bylo dostačující.

Pro zjištění standardní odchylky rozměrů ohybku byl použit software Geomagic Studio 12 a dále pro změření kontrolovaných rozměrů byl použit software Creo.

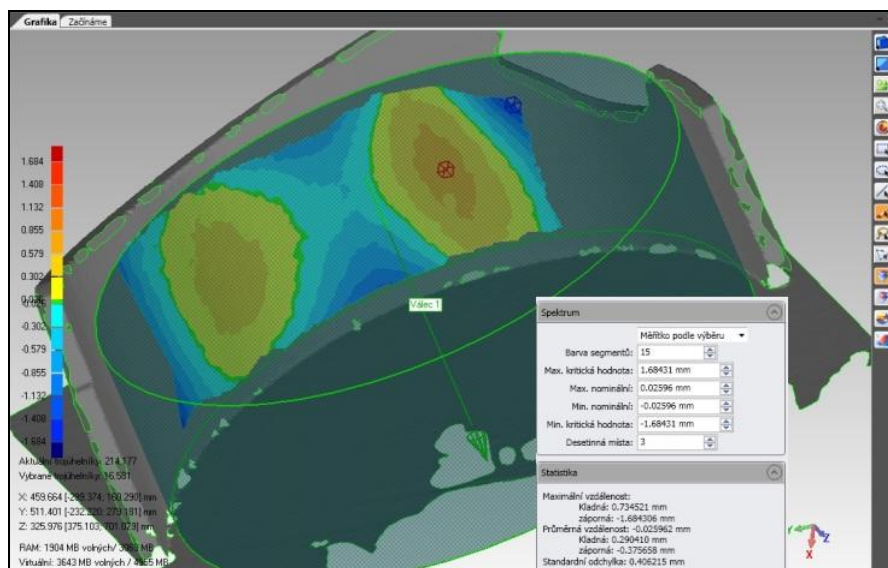
Na samotném začátku měření byl výlisek položen na vodorovnou desku pracovního stolu. Okolo zkoumaného prvku se nalepily referenční body. Pro tyto body platí, že jejich minimální viditelný počet pro skenování v každém okamžiku či při každé poloze měřicí hlavy musí být čtyři. Po kontrolním zaměření, kdy si software případně vyžádá více referenčních bodů, bylo uskutečněno samotné skenování, viz obr. 3.37.



Obr. 3.37: Skenování výlisku

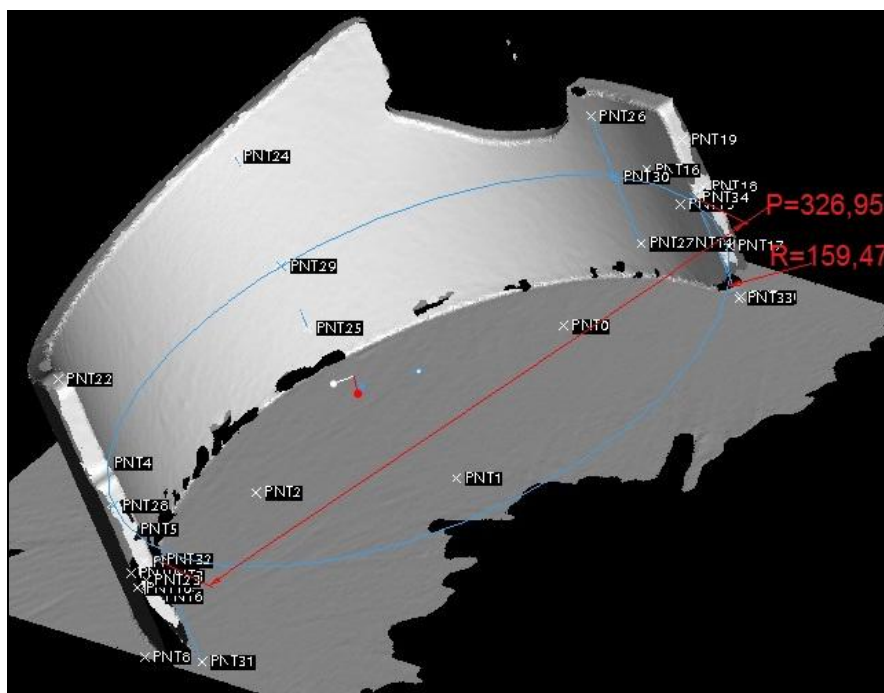
Po vytvoření skutečného 3D obrazu výlisku ve formátu stl byl tento mrak bodů převeden do softwaru Geomagic Studio 12, kde byly zjištěny odchylky od jmenovitého rozměru, viz obr. 3.38.

Pomocí tohoto softwaru byly soubory naskenovaných blatníků převedeny do formátu igs, se kterými bylo dále pracováno v programu Creo.



Obr. 3.38: Zjištění odchylek od jmenovitého rozměru v softwaru Geomagic Studio

Zde bylo provedeno měření kontrolních veličin stejným způsobem jako u vytvořené simulace výlisku, viz obr. 3.39. Přeměřované blatníky byly vyrobeny ze stejného plechu, z kterého byly odebrány vzorky pro získání hodnot materiálových vlastností.



Obr. 3.39: Měření v softwaru Creo

Porovnáváné rozměry pro ověření možnosti využití PM při návrhu nové kontury nástroje pro blatník šasi dle výkresové dokumentace jsou zaznamenány v tab. 3.6.



Tab. 3.6: Kontrolní rozměry skutečného výlisku

č.	R [mm]	P [mm]	t [mm]
1	$159,47 \pm 0,42$	326,95	12,16
2	$159,78 \pm 0,48$	327,365	12,14
3	$159,66 \pm 0,40$	326,806	12,15
Průměr	$159,64 \pm 0,43$	$327,04 \pm 0,24$	$12,15 \pm 0,01$

3.5.3 Zhodnocení získaných výsledků

Kontrolní rozměry virtuálního výlisku viz obr. 3.36, které byly měřeny po vytvoření simulace současného výrobního procesu v softwaru PM, jsou uvedeny v tab. 3.5 a porovnávaly se s kontrolními rozměry reálných výlisků vyráběných na současném používaném nástroji. Rozměry reálného výlisku byly naměřeny v rámci předchozí kapitoly, kde byla provedena digitalizace a po následné rozměrové analýze jsou hodnoty uvedeny v tab. 3.6.

Po porovnání hodnot lze konstatovat, že tvar ohybku vytvořeného v softwaru PM a ohybku získaného ze skutečného výrobního procesu sobě odpovídá a rozměry výrobku jsou shodné. Vytvořená simulace odpovídá reálnému procesu a lze ji označit jako korektní. Použitý výpočtový model bude použit pro numerickou simulaci nového nástroje, u kterého bude korigován tvar.

Ze změřených parametrů je také patrné, že vyrobený tvar a rozměr výlisku nesplňují výkresovou dokumentaci. Doposud získané výsledky i s požadovanými rozměry jsou pro přehlednost uvedeny v tab. 3.7. Na základě této skutečnosti by bylo vhodné změnit konturu nástroje a pro odzkoušení vhodné varianty využít opět specializovaný software PM.

Tab. 3.7: Hodnoty kontrolních rozměrů

	R [mm]	P [mm]
Výrobní výkres	165	$331,8 \pm 2$
Současný stav	$159,64 \pm 0,43$	$327,04 \pm 0,24$
Simulace	159,66	326,565



3.6 Optimalizace výrobního procesu

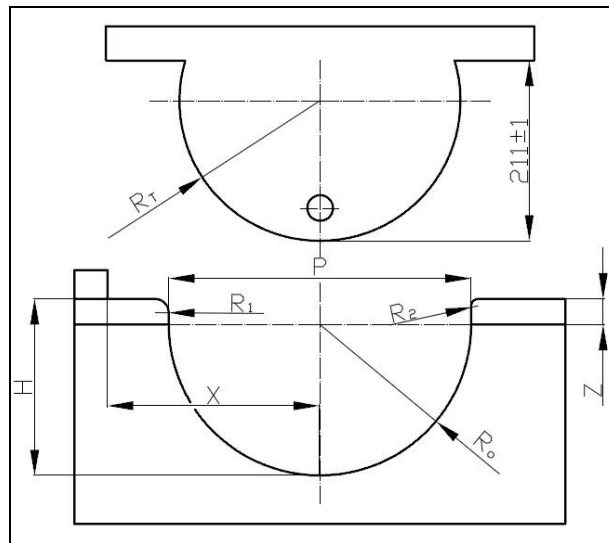
Záměrem předcházející části experimentu diplomové práce bylo ověřit, zda software PM dokáže vytvořit korektní simulaci technologie ohýbání tzv. širokých pásů. Po potvrzení shodnosti kontrolních rozměrů výlisku ze současného nástroje a z vytvořené simulace, která vznikla na základě rozměrové analýzy používaného nástroje, kinematiky reálného procesu a zjištěných materiálových dat, byl software PM použit pro návrh nové kontury nástroje. Hlavní důvod pro vytvoření nové kontury výrobního nástroje je snížení počtu dodatečných dorovnávacích operací. Předpokladem bylo, že po korekci tvarové vložky nástroje dojde ke změně rozměrů výlisků, které budou odpovídat požadované toleranci na výrobním výkrese.

K vytvoření návrhu nového nástroje se vycházelo z naměřených hodnot kontrolních rozměrů výlisku, které byly zjištěny pomocí simulace a ověřeny na reálném výlisku. Tyto kontrolované rozměry jsou menší než tolerance požadovaného rozměru. K dosažení požadovaných rozměrů, které jsou uvedeny ve výrobním výkrese, viz příloha 1, se u první korekce nástroje vycházelo ze skutečných hodnot kontrolních rozměrů. Reálná hodnota rozevření, tedy rozměr P , má po simulaci současného stavu $326,565 \text{ [mm]}$ a požadovaná hodnota je $331,8 \pm 2 \text{ [mm]}$, z čehož je patrné, že rozdíl hodnot se liší o 5 [mm] . Na základě zjištěné rozdílové hodnoty byl o tuto hodnotu zvětšen rozměr mezi ohybovými destičkami. Další korekce nástroje proběhla u rozměru tažníku původního nástroje o poloměru $157,59 \text{ [mm]}$, kde po odpružení ohybku bylo zjištěno, že se od požadovaného poloměru R liší skutečný poloměr o hodnotu 5 [mm] . Předpokladem bylo, že pokud daný rádius se zvětší o 5 [mm] , mohl by poloměr být v toleranci požadovaného rozměru. Pro tyto navržené změny rozměrů nástroje byla vytvořena nová simulace se stávajícím nastavením. Z této simulace byly kontrolní rozměry výlisku porovnávány s výrobním výkresem výlisku a bylo vyhodnoceno, zda změny nástroje jsou vyhovující nebo nevyhovují. Bohužel tvar a rozměry výlisku v tomto případě byly nevyhovující. Následující postup pro zjištění vhodných rozměrů tvářecího nástroje spočíval ve vytvoření kombinace změn jednotlivých rozměrů, které jsou uvedeny na obr. 3.40 a jejich hodnoty jsou zaznamenány v tab. 3.8.

K ověření tvaru a rozměrů výlisku z provedené korekce nástroje slouží právě numerická simulace, v níž je možné virtuálně měnit jednotlivé parametry nástroje při zachování stejného nastavení. To je hlavní výhoda numerických metod oproti experimentální metodě. V tomto konkrétním případě numerická simulace umožnila



vytvořit přibližně třicet variant. Jednotlivé numerické simulace byly nastaveny se stejnou kinematikou a velikostí kalibrační síly jako současný proces.



Obr. 3.40: Měření v softwaru Creo

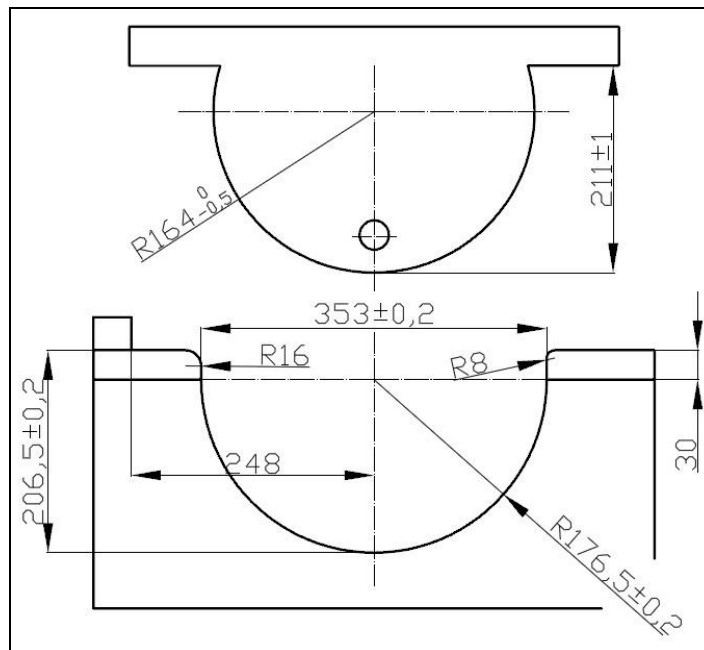
Tab. 3.8: Kombinace rozměrů nástroje

Parametry [mm]	1	2	3	4
R_T	162,5	163	163,5	164
P	347	350	353	355
H	190	200,5	206,5	208
Z	27	30	33	35
X	246	248	250	252
R_1	8	9	12	16
R_2	8	9	12	16
R_0	176	176,5	177	177,5

Po provedení přibližně třiceti simulačních výpočtů, kde jednotlivé numerické simulace byly nastaveny se stejnou kinematikou a velikostí kalibrační síly jako současný proces, byla zvolena konkrétní varianta. Korigované rozměry tvářecího

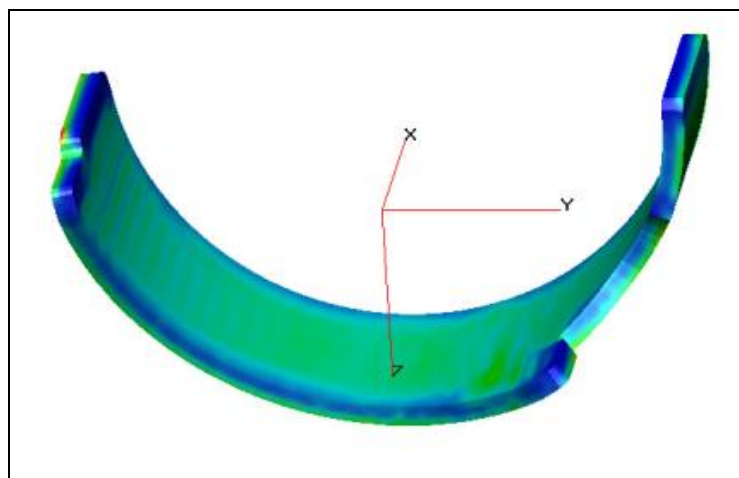


nástroje pro zvolenou variantu jsou patrné na obr. 3.41. Velikost kontrolních rozměrů výlisku splňuje toleranci požadovaných rozměrů.

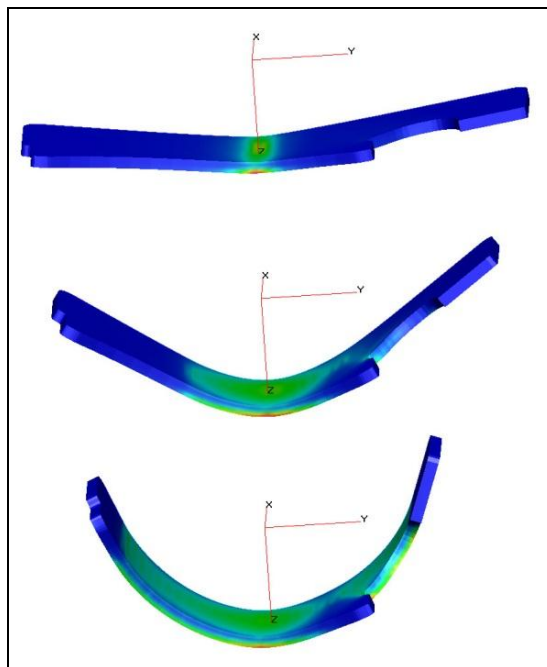


Obr. 3.41: Doporučené rozměry nového tvářecího nástroje

Kromě odlišných rozměrů kontury výpalku z hlediska vybrání byly na výrobním nástroji vytvořeny rozdílné poloměry ohybových hran. Tato konstrukční úprava byla aplikována z důvodu nesymetrie výpalku, kde tužší strana bude lépe klouzat do nástroje. Změna rozměrů by měla zaručit požadovaný tvar, viz obr. 3.42, dle výrobního výkresu viz příloha 1. Průběh hlavní deformace při lisování blatníku šasi pro vysokozdvíhový vozík je zachycen na obr. 3.43.

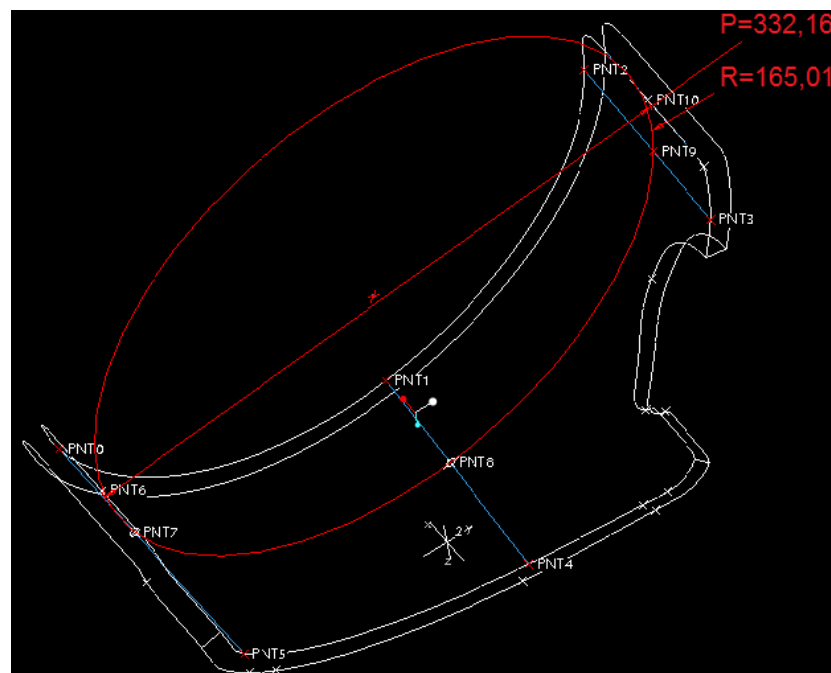


Obr. 3.42: Výlisek požadovaného tvaru



Obr. 3.43: Průběh hlavní deformace

Měření kontrolních rozměrů výlisků probíhalo obdobným způsobem jako v předchozích případech, kde z výlisku vytvořeného v softwaru PM se vytvořil obrys a ten byl exportován ve formátu igs do CAD softwaru Creo viz obr. 3.44, kde byly rozměry změřeny. Nejprve byl změřen tímto způsobem výlisek bez odpružení a poté s odpružením. Získané rozměry výlisku z vybrané varianty po korekci tvářecího nástroje jsou uvedeny v tab. 3.9.



Obr. 3.44: Měření v softwaru Creo



Tab. 3.9: Kontrolní rozměry matematického modelu

Výpalek $t=12,15$ [mm]	R [mm]	P [mm]
Před odpružením	164,04	329,06
Po odpružení	165,01	332,16
Požadavek	165	$331,8 \pm 2$

Po ověření shodnosti rozměrů skutečných a počítačově nasimulovaných dílů bylo možné v této části experimentu využít software PM pro návrh nové kontury výrobního nástroje pro blatník šasi. Po vytvoření nové kontury nástroje v CAD softwaru Creo s rozměry, které jsou znázorněny na obr. 3.41, byla vytvořena simulace se stávajícím reálným nastavením hydraulického lisu. Po proměření kontrolních rozměrů ohybku po simulaci je možné konstatovat, že po výrobě nového nástroje dle navržené kontury by tvářené výlisky měly splňovat požadavky výrobních výkresů, a nemělo by tudíž docházet k odchylkám od požadovaných rozměrů.



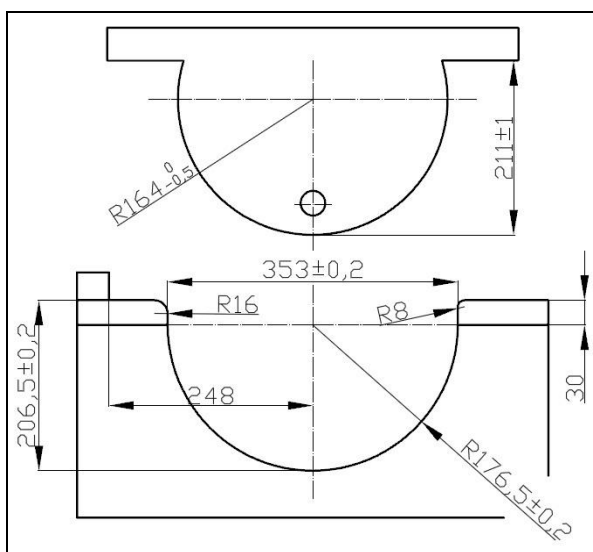
4 Závěr

Na základě zadání firmy CDS holding s.r.o. byla realizována analýza výrobního procesu ohýbání pro blatník šasi vysokozdvizného vozíku firmy STILL WAGNER. Blatník je vyráběn z oceli S235JR dle ČSN EN 10025-2 o tloušťce plechu 12mm.

Nejprve byly zjištěny technologické podmínky reálného procesu, jako je velikost používané kalibrační síly, kinematika pohyblivé části nástroje, skutečné rozměry nástroje a mechanické vlastnosti používané oceli.

Rozměry nástroje byly měřeny pomocí digitalizace bezkontaktním optickým zařízením 3D skener REVscan. Mechanické vlastnosti tvářeného materiálu byly měřeny na trhacím stroji TIRAtest 2300 na zkušebních tyčkách vyrobených ze stejné tabule plechu jako výlisky, na kterých byly odměřovány jejich skutečné rozměry. Ze zjištěných technologických parametrů a skutečných rozměrů současného nástroje byla vytvořena pomocí softwaru PAM-STAMP 2G numerická simulace. Výsledkem numerické simulace byl výlisk, na kterém byly změřeny kontrolní rozměry, které jsou důležité pro následný montážní celek. Tyto zjištěné hodnoty byly porovnány s kontrolními rozměry skutečných výlisků vyrobených na současném tvářecím nástroji. Rozměry výlisků byly měřeny pomocí optického systému 3D skener REVscan. Porovnané hodnoty rozměrů byly shodné a lze numerickou simulaci použít pro konstrukční úpravu nového nástroje.

Na základě této skutečnosti byla provedena virtuální korekce tvářecího nástroje. Při prvním návrhu tvaru nástroje se vycházelo z rozdílů hodnot rozměrů mezi výrobním výkresem a výliskem z numerické simulace.



Obr. 3.45: Doporučené rozměry nového tvářecího nástroje



Z nově vytvořené simulace vyplynulo, že rozměry výlisku neodpovídají požadované rozměrové toleranci. Z toho důvodu bylo nutné vytvořit další numerické simulace, v nichž se upravovaly některé z parametrů nástroje. Z jednotlivých variant byla zvolena ta, která nejlépe odpovídala požadavkům výrobního výkresu, viz obr. 3.45. Lze předpokládat, že výlisky vyrobené v nástroji zhotoveném dle těchto parametrů by měly splňovat tvar a toleranci požadovaných rozměrů.

Na základě doporučené změny tvaru nástroje řešené v diplomové práci probíhá v současné době výroba nového nástroje ve firmě CDS holding s.r.o.



5 Seznam použité literatury

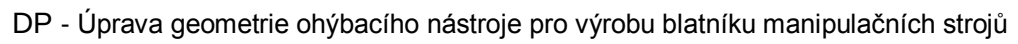
- [1] SOLFRONK, P.: Využití simulačních programů při optimalizaci výroby výlisku z plechu. In *Mezinárodní vědecké sympozium katedry tváření a plastů, 14.-15. září 2004*. Liberec : TU v Liberci, 2004, s. 99-104. ISBN 80-7083-856-6.
- [2] FOREJT, M.: *Teorie tváření*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 1992. ISBN 80-214-0415-9.
- [3] KIRSCHNER, V.: *Stanovení vlivu mechanických hodnot materiálu na velikost odpružení, [Bakalářská práce]*. Liberec : TUL, 2009.
- [4] HAŠEK, V.: *Základy tváření kovů*. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1969.
- [5] MARCINIAK, Z.: *Teorie tváření plechů*. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1964. ISBN 04-275-64.
- [6] TMĚJ, J., MIKEŠ V.: *Teorie tváření*. Liberec : Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1981. ISBN 80-7083-011-5
- [7] LENFELD, P.: *Technologie II. - 1. část*. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2005. ISBN 80-7372-020-5.
- [8] LANGER, J.: *Rozložení deformace materiálu při volném ohybu, [Bakalářská práce]*. Liberec : TUL, 2011.
- [9] HOLINA, J.: *Určení mezních stavů a velikosti odpružení při ohýbání pevnostního plechu, [Diplomová práce]*. Liberec : TUL, 2003.
- [10] HRUBÝ, J.: březen 2009.
<http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Texty/11Anizotrop.pdf>
- [11] CHALOUPECKÝ, V.: *Technologie II*. Liberec : Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1985. ISBN 55-807-84.
- [12] ŘASA, J., LEINVEBER, J., VÁVRA, P.: *Strojírenská technologie 1*. Praha : SNTL, 2000. ISBN 04-251-81.
- [13] <http://www.gom.com/>
- [14] <http://prirucka.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/techprir/tycovaocel/EN10025/S235JRG2/>

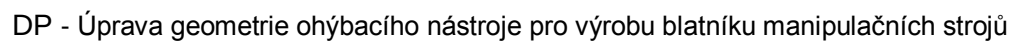


6 Seznam příloh

Příloha 1: Výrobní výkres blatníku

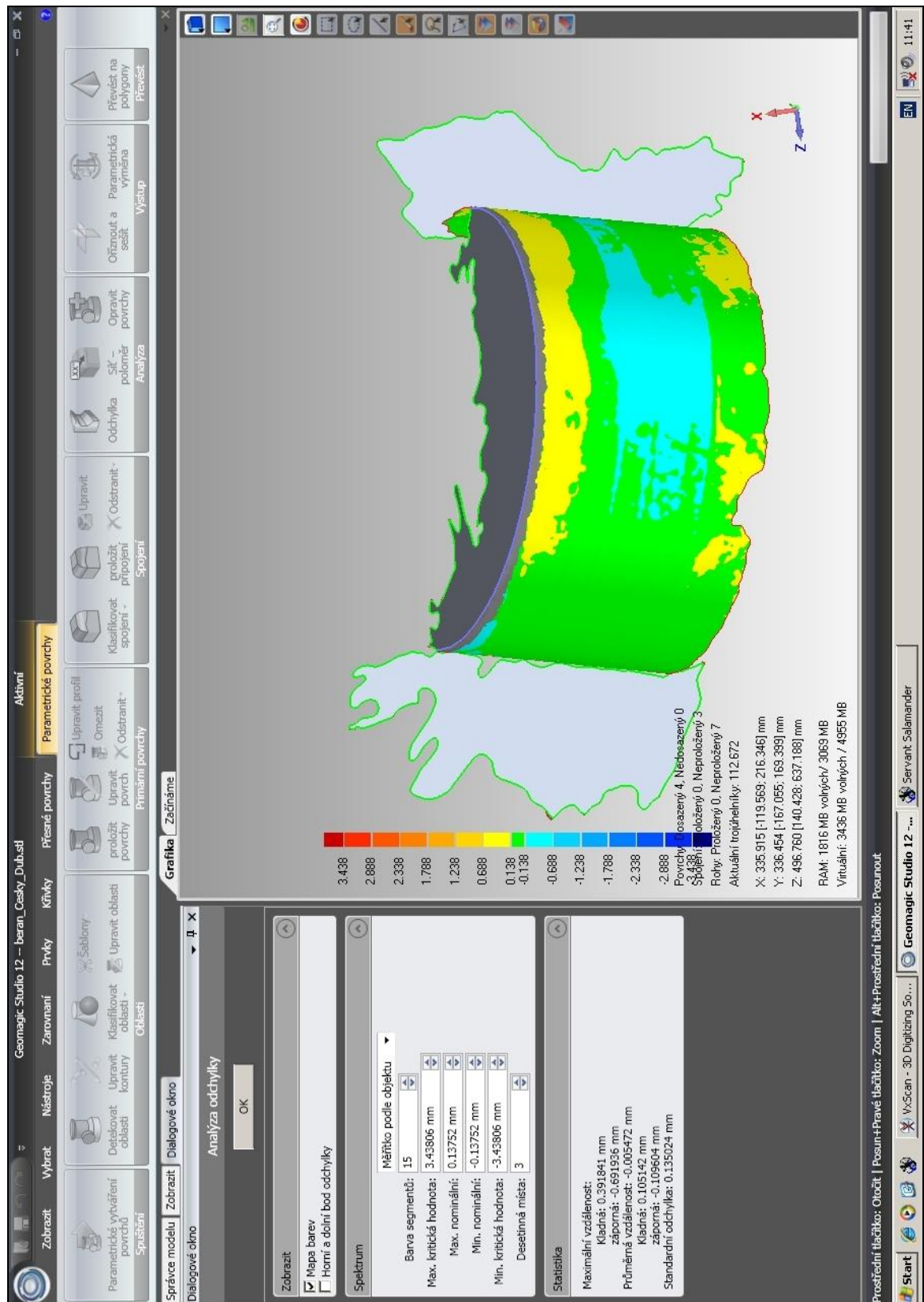
Příloha 2: Velikost odchylky od jmenovitého rozměru horní části nástroje

[illegible]





Příloha 2: Velikost odchylky od jmenovitého rozměru horní části nástroje



Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. O právu autorském, zejména 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnou-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL, v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které TUL vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 25. 5. 2012

Podpis:

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I use inform TUL of this fact, in this case TUL has the right to seek that I pay the expense invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Datum: 25. 5. 2012

Signature: