

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav strojírenské technologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MODIFIKACE CHARPYHO KLADIVA A METODIKA MĚŘENÍ

Autor: Bc. Lukáš Nikodým

Studijní obor: Výrobní a materiálové inženýrství

Vedoucí práce: Ing. František Tatíček, Ph.D.

Praha 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne

.....
podpis

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval pánům Ing. Františkovi Tatíčkoví, Ph.D. a Ing. Martinovi Kubelkovi za vedení této diplomové práce, za poskytnutí odborných podkladů a konzultací a za jejich cenné rady a připomínky vedoucí k jejímu vypracování.

Zvláštní poděkování patří také mým rodičům a celé rodině, která mě motivovala a podporovala nejen při tvorbě diplomové práce, ale během celého mého studia.

Anotace

Tato diplomová práce je zaměřena na problematiku plošného tváření. Poskytuje základní teoretické informace, které slouží k hlubšímu poznání a pochopení této technologie se zaměřením na problematiku rychlosti deformace. Praktická část je zaměřena na sledování vlivu rychlosti deformace na citlivost materiálu na zkušebním zařízení modifikovaného Charpyho kladiva. Zařízení bylo osazeno novým snímacím systémem a v práci je proveden jeho popis. Na experimentálním zařízení bylo provedeno široké spektrum zkoušek pro zmapování co největšího počtu průběhů experimentů. Na základě získaných poznatků byla po realizaci zkoušek vytvořena metodika zkoušení na tomto zařízení.

Klíčová slova

Plošné tváření, tvařitelnost, plastická deformace, rychlost deformace.

Annotation

This master's thesis is focused on sheet metal forming. It provides basic theoretical information for understanding and deeper acquaintance with this technology, focusing on issues of strain rate. The practical part is focused on monitoring the effects of strain rate on the sensitivity of material on the testing machine - modified Charpy hammer. The machine was fitted with a new sensor system and in this thesis also includes its description. On the testing machine broad range of tests were done in order to obtain the largest possible number of the courses of experiments. Based on this knowledge after realization all the tests the measurement methodology of testing at this machine was created.

Key words

Sheet metal forming, formability, strain rate.

Obsah

Seznam použitých symbolů	9
Seznam základních veličin.....	9
Seznam ostatních zkratek	11
1. Úvod.....	12
2. Teoretická část.....	14
2.1 Základní principy tváření.....	14
2.1.1 Tváření za studena	15
2.1.2 Plastická deformace.....	16
2.2 Tvařitelnost	17
2.2.1 Zkoušení tahem.....	18
2.2.2 Ukazatele tvařitelnosti za studena	18
2.2.3 Rozdělení tvařitelnosti	21
2.2.4 Technologické zkoušky hlubokotažnosti plechů.....	22
2.3 Faktory ovlivňující tvařitelnost.....	24
2.3.1 Metalurgické faktory.....	26
2.3.2 Termomechanické faktory	27
2.3.3 Stav napjatosti	27
2.4 Rychlost deformace.....	28
2.4.1 Rychlost deformace v praxi.....	29
2.5 Hodnocení tvařitelnosti – FLD diagram.....	30
2.6 Experimentální zařízení	33
2.6.1 Konstrukce experimentálního zařízení	33
2.6.2 Nástroje.....	34
2.6.3 Fyzikální popis zkoušky	35

2.7	Zkušební materiály	36
2.7.1	Materiál DC06+ZE50/50-B-PO (dále jen DC06)	36
2.7.2	Materiál Docol 1200	38
2.7.3	Korozivzdorná ocel 17 241.....	39
3.	Praktická část	41
3.1	Původní snímací systém experimentálního zařízení	41
3.1.1	Snímač síly – K–Shear akcelerometr	41
3.1.2	Úhlový potenciometr	42
3.1.3	Naměřené hodnoty a vyhodnocení původního snímacího systému	43
3.2	Modifikace snímacího systému.....	45
3.2.1	Snímač síly – polovodičový tenzometr	45
3.2.2	Systém pro měření na experimentálním zařízení.....	47
3.2.3	Testovací měření snímače síly	53
3.3	3D skenování nástrojů.....	54
3.3.1	Skenování na optickém 3D skeneru.....	55
3.3.2	Skenování s ručním 3D laserovým skenerem	57
3.4	Měření na experimentálním zařízení	59
3.4.1	Měření deformace při různých hodnotách zesílení.....	59
3.4.2	Měření deformace při různých úhlech nástroje	71
3.5	Návrh metodiky zkoušení na experimentálním zařízení.....	78
3.5.1	Příprava přístřihu	78
3.5.2	Zakládání přístřihu do přidržovače	79
3.5.3	Zakládání přidržovače a nastavení softwaru	79
3.5.4	Provedení zkoušky	79
3.5.5	Vyhodnocení měření.....	79
4.	Závěr	80

Použitá literatura a informační zdroje	82
Seznam příloh	84

Seznam použitých symbolů

Seznam základních veličin

σ	Napětí	[MPa]
ε	Poměrná deformace	[-]
R_m	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
R_e	Mez kluzu	[MPa]
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu	[MPa]
A_{80mm}	Tažnost zkušební tyče délky 80 mm	[%]
Z	Kontrakce	[%]
r	Součinitel plastické anizotropie	[-]
φ_b	Skutečná deformace ve směru šířky vzorku	[-]
φ_t	Skutečná deformace ve směru tloušťky vzorku	[-]
r_m	Střední hodnota součinitele plastické anizotropie	[-]
Δr	Součinitel plošné anizotropie	[-]
C	Materiálová konstanta	[-]
n	Exponent deformačního zpevnění	[-]
n_m	Střední hodnota exponentu deformačního zpevnění	[-]
ZP	Zásoba plasticity	[N.mm.mm ⁻³]
KUT	Komplexní ukazatel tvažitelnosti	[-]
A_H	Homogenní tažnost	[%]
A_C	Celková tažnost	[%]
IT	Index tvažitelnosti	[-]

d	Průměr tažníku	[mm]
D	Průměr tažnice	[mm]
h	Velikost prohloubení plechu	[mm]
m	Součinitel tažení	[-]
D_p	Průměr přístřihu	[mm]
T_k	Kritická teplota	[°C]
$\dot{\varphi}$	Rychlost deformace	[s ⁻¹]
φ	Stupeň deformace	[-]
t	Čas	[s]
Δl	Změna délky zkušební tyče	[-]
l_0	Původní délka zkušební tyče	[-]
v	Rychlost pohybu nástroje	[mm.s ⁻¹]
l	Dráha nástroje v daném okamžiku	[mm]
k_p	Přetvárná pevnost	[MPa]
U	Napětí	[V]
F	Deformační síla	[kN]
F_{max}	Maximální deformační síla	[kN]

Seznam ostatních zkratk

<i>C</i>	Obsah uhlíku	[%]
<i>P</i>	Obsah fosforu	[%]
<i>S</i>	Obsah síry	[%]
<i>Mn</i>	Obsah manganu	[%]
<i>Ti</i>	Obsah titanu	[%]
<i>Fe</i>	Obsah železa	[%]
<i>Si</i>	Obsah křemíku	[%]
<i>Nb</i>	Obsah niobu	[%]
<i>Al</i>	Obsah hliníku	[%]
<i>V</i>	Obsah vanadu	[%]
<i>Cr</i>	Obsah chromu	[%]
<i>Ni</i>	Obsah niklu	[%]
<i>ÚST</i>	Ústav strojírenské technologie	
<i>FLD</i>	Forming Limit Diagram, diagram mezního přetvoření	
<i>FLC</i>	Forming Limit Curves. křivky mezní tvařitelnosti	
<i>CAD</i>	Computer Aided Design	
<i>ATOS</i>	Advanced Topometric Sensor	

1. Úvod

V dnešní době je ve všech oblastech průmyslu snahou minimalizace výrobních nákladů při zachování či dokonce zvyšování kvality vyráběných dílů v zároveň co možná nejkratším výrobním taktu. Tento trend nabývá svého využití a dá se říci, že i nepostradatelnosti především v hromadné výrobě.

Typickým příkladem hromadné výroby je automobilový průmysl a výroba karosářských dílů automobilů, kdy je během velmi krátkého lisovacího taktu výrobní linky vyráběná část karoserie hotová. Díly karoserie jsou obvykle vyráběny především technologií hlubokého tažení. A právě v této oblasti je stále velký potenciál pro optimalizaci výrobního procesu vedoucí zpravidla ke snižování výrobního času či co možná nejvyšší eliminaci výrobních defektů, kterými mohou být při lisování různé trhliny, zvlnění, mechanická poškození povrchu či nepřipustná ztenčení plechu.

V současné době je u automobilů velmi populární tzv. dynamický design, který je charakteristický ostrými hranami a přechody na karoserii. Ty jsou velmi oblíbené u zákazníků, jinak tomu už však je v praxi u výrobců a technologů, kteří se zabývají výrobou těchto dílů karoserie, jelikož každá ostrá hrana sebou při výrobě nese zvýšené riziko defektu, nejčastěji trhliny. Tomu nenahrává ani trend používání plechů čím dál menších tloušťek, což je opět krok vedoucí ke snížení výrobních nákladů.

Za účelem stabilizace výrobního procesu je stále více žádoucí sledování jednotlivých faktorů, které mají vliv na proces výroby výlisku a to především těch, jejichž vliv je největší, či se dá nejsnadněji popsat.

Ve své diplomové práci se budu detailněji věnovat faktoru, který není snadno popsateľný, ale jeho význam se v současné úrovni poznání stále zvyšuje a tím faktorem je rychlost deformace a její vliv na citlivost materiálu, kdy v praxi může při tváření za studena dojít k lokální změně mechanických vlastností materiálu v tvářené oblasti, které v krajním případě může vést až k porušení materiálu.

Pro tento účel bylo na ÚST ČVUT v Praze navrženo a zkonstruováno experimentální zařízení pracující na principu Charpyho kladiva, které díky své unikátní

konstrukci umožňuje sledovat chování materiálu při různých rychlostech deformace. Zařízení navíc umožňuje sledovat chování materiálu při podmínkách, které odpovídají lisovacímu procesu. Jedním z cílů této diplomové práce je vytvoření metodiky sledování deformace zkušební vzorku na tomto experimentálním zařízení.

Dalším cílem je modifikace stávajícího snímacího systému, kdy především původní snímač síly akcelerometr K-Shear se ukázal jako nevhodný a bude nahrazen polovodičovým tenzometrem. Pro sledování a vyhodnocování měření na experimentálním zařízení byl vytvořen speciální software, který bude také blíže popsán.

Ověření metodiky zkoušení na experimentálním zařízení bude provedeno v rámci několika měření, které budou provedeny na zkušebních vzorcích ze tří různých materiálů (feritická ocel DC06, martenzitická ocel Docol 1200 a korozivzdorná ocel 17 241). Jednotlivé materiály budou blíže popsány v teoretické části této diplomové práce. Další měření budou provedena při různém nastavení úhlu kladiva, neboli při různých rychlostech deformace.

Ve spolupráci se Škoda Auto, a.s. bude provedeno vytvoření 3D modelů všech nástrojů experimentálního zařízení pomocí technologie 3D skenování. Získaná data se v budoucnosti použijí k vytvoření simulací reálného lisovacího procesu, při kterých je možné jednoduše sledovat schopnost výrobního procesu.

Tato diplomová práce by zároveň měla sloužit k hlubšímu poznání problematiky technologie tváření za studena a problémů s tím spojených.

2. Teoretická část

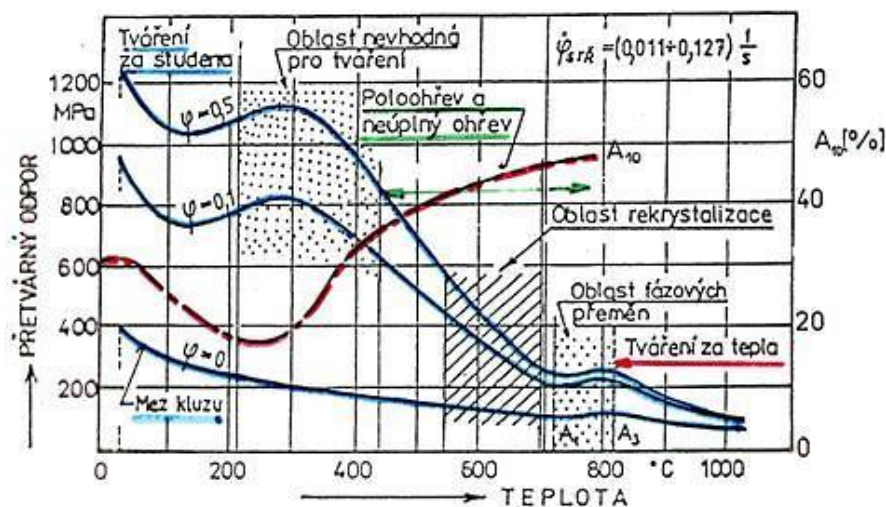
V této kapitole popíší základní principy tváření, především tváření za studena, problematiku tvařitelnosti a plastické deformace včetně jejich mechanismů. Dále rozdělím faktory ovlivňující tvařitelnost a zaměřím se především na jeden z nich a to vliv rychlosti deformace na citlivost materiálu. Poté popíší experimentální zařízení včetně materiálu použitého pro experimenty popsané v praktické části této práce.

2.1 Základní principy tváření

Principem tváření materiálu je, že působením vnějších sil vznikají v tvářeném tělese napětí, která po překročení meze kluzu tvářeného materiálu vyvolávají plastickou deformaci, přičemž nesmí dojít k porušení soudržnosti tvářeného tělesa.

Při zpracování kovových materiálu tvářením využíváme jejich plasticitu (schopnost přetváření), aniž dojde k porušení materiálu (vyčerpání plasticity). Při tváření materiálu dochází nejen k trvalým změnám tvaru a rozměrů výchozího polotovaru, ale i k fyzikálním změnám materiálu, které se projevují strukturálními změnami a tím i změnami fyzikálních a mechanických vlastností.

Při rozdělení tvářecích procesů podle teploty (viz obr. 1) může tento výrobní proces probíhat za tepla nebo za studena. Rozhodujícím faktorem je v tomto případě teplota rekrytalizace, kdy tváření za studena probíhá pod rekrytalizační teplotou a naopak tváření za tepla probíhá nad teplotou rekrytalizace materiálu.



Obrázek 1: Rozdělení tvářecích procesů podle teploty [1]

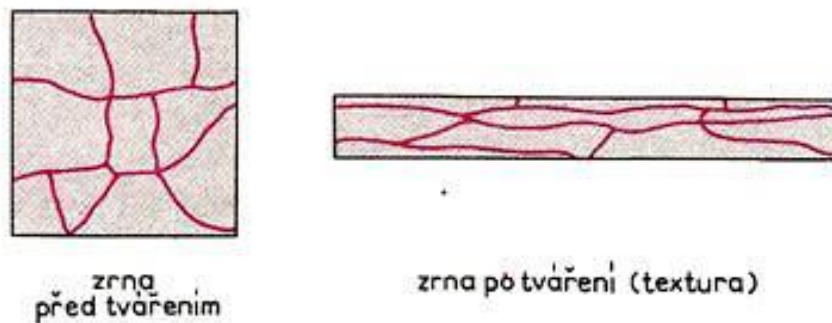
Technologii tváření můžeme dále rozdělit dle stavu napjatosti, kdy rozlišujeme tváření objemové (kování, válcování, protlačování atd.) a tváření plošné (válcování plechů, tažení plechů, stříhání atd.). Já se dále ve své práci zaměřím a detailněji popíši technologii plošného tváření za studena.

2.1.1 Tváření za studena

Má diplomová práce se zabývá problematikou technologie hlubokého tažení, tedy technologií tváření za studena, které se budu dále podrobněji věnovat.

Při tváření za studena neboli pod teplotou rekrytalizace (přibližně 0,4 teploty tání kovu) probíhá zároveň deformační zpevňování materiálu. Během plastické deformace dochází k toku materiálu, kdy se zrna deformují ve směru tváření, vytváří se deformační textura (viz. obr. 2) a dochází k anizotropii mechanických vlastností.

Zpevněním materiálu se zvyšuje jeho mez pevnosti a mez kluzu, ale zároveň klesá tažnost. Tu lze obnovit rekrytalizačním žháním, čímž materiál získá zpět svou schopnost být plasticky tvářen.



Obrázek 2: Změna tvaru zrn v důsledku tváření [1]

Mezi hlavní výhody tváření za studena patří lepší kvalita povrchu výlisku (nedochází k okujení), přesnější rozměrové tolerance a lepší mechanické vlastnosti zpevněním. Naopak nevýhodou je nutnost používat velké tvářecí síly, nerovnoměrné zpevňování, omezená tvárnost materiálu a nižší tvarová složitost výlisků.

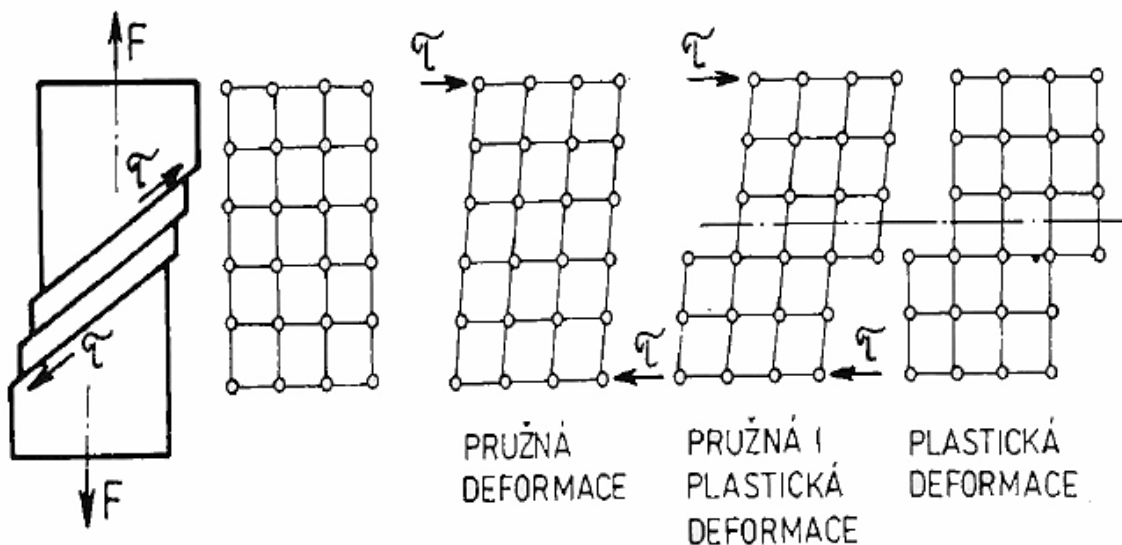
2.1.2 Plastická deformace

Plastická deformace je podstatou technologie tváření. K plastické deformaci dochází při zatížení tělesa vnějšími silami nad platnost Hookeova zákona, kdy přestává platit lineární závislost mezi napětím a deformací. Při zatěžování mechanickou silou dochází k nevratné změně tvaru tělesa i po odlehčení při zachování krystalické struktury.

V reálných kovových materiálech se plastická deformace vždy realizuje pohybem dislokací neboli čárových poruch. Dislokace vznikají již v metalurgické fázi přípravy (při tuhnutí) a dále při dalším zpracování tváření. Nejčastějším deformačním mikromechanismem je skluz, doplňujícím mikromechanismem uplatňujícím se zvláště při vysokých rychlostech deformace a nízkých teplotách je dvojčatění. [3]

2.1.2.1 Skluz

Je základním mechanismem plastické deformace, který se realizuje ve skluzovém systému, jenž tvoří skluzové (krystalografické) roviny a směry. Jedná se o posuv tenké vrstvy krystalu proti druhé (viz obr. 3) ve směrech, kde maximální smykové napětí dosáhne kritické hodnoty. Rovina skluzu je zpravidla nejhustěji obsazena atomy a směr skluzu je totožný se směrem nejhustěji obsazenými atomy. Dobrou tvařitelnost kovů zajišťuje existence minimálně pěti nezávislých kluzových systémů. [5]

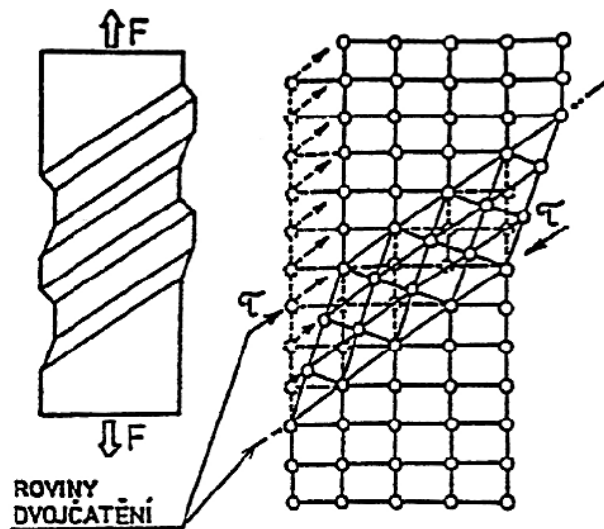


Obrázek 3: Schematické znázornění skluzu [2]

2.1.2.2 Dvojčatění

Projevuje se natočením jedné části mřížky vůči druhé kolem roviny symetrie (viz obr. 4). Natočená část je dále deformována skluzem. Ke tvorbě dvojčatění dochází při zvýšené deformační rychlosti (např. tváření výbuchem).

Jedná se o zvláštní případ koordinovaného skluzu, kdy se atomy přemísťují o zlomky meziatomových vzdáleností. Deformace kovu nemůže být vysoká, jelikož dochází ke značnému zpevnění materiálu. [4]



Obrázek 4: Schematické znázornění dvojčatění [2]

2.2 Tvařitelnost

Jedná se o nejdůležitější technologickou vlastnost materiálu v problematice tváření oceli, a proto bych se o ní rád zmínil trochu podrobněji.

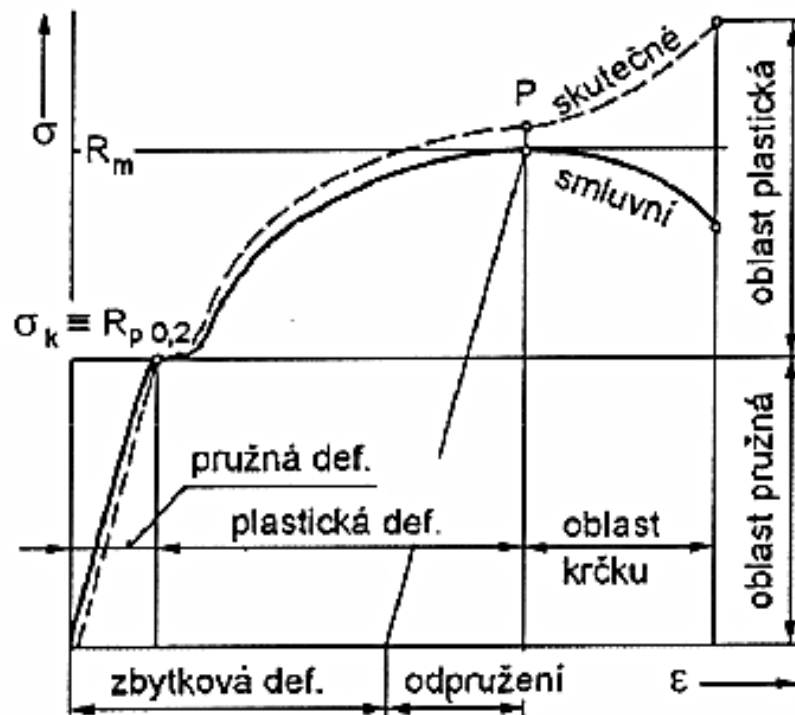
Tvařitelnost je podmíněna plastičností (tvárností) materiálu. Plastičnost materiálu je jeho schopnost trvale měnit svůj tvar při působení vnějších sil, aniž by došlo k porušení tvářeného tělesa. Při tváření materiálu je hlavním úkolem předejít mezním stavům a porušení soudržnosti materiálu vhodnou volbou tvářecích podmínek.

Pokud má materiál nízkou hodnotu tvařitelnosti, může se během procesu hlubokého tažení porušit – tzv. dojde k vyčerpání plasticity. Řídicím mechanismem porušení materiálu je nejčastěji ztráta stability, na kterou navazuje v závěrečné fázi porušení tvárný lom, který probíhá napříč krystalickými zrny.

2.2.1 Zkoušení tahem

Základní a nejčastěji používaná mechanická zkouška pro zjištění základních mechanických vlastností materiálu, které jsou označovány jako ukazatele tvařitelnosti, je zkoušením tahem při pokojové teplotě. Tato zkouška je upravena normou ČSN EN ISO 6892-1. [12]

Princip tahové zkoušky spočívá v jednoosém zatěžování zkušební vzorku až do jeho přetržení a jejím výstupem je pracovní diagram závislosti napětí σ [MPa] na prodloužení zkoušeného vzorku ϵ [-] (viz obr. 5), ze kterého získáme jak charakteristiky pevnosti (mez pevnosti R_m [MPa] a mez kluzu R_e [MPa], resp. $R_{p0,2}$ [MPa]), tak charakteristiky plastičnosti (tažnost A_{80mm} [%] a kontrakce Z [%]). [7]



Obrázek 5: Pracovní diagram tahové zkoušky [2]

2.2.2 Ukazatele tvařitelnosti za studena

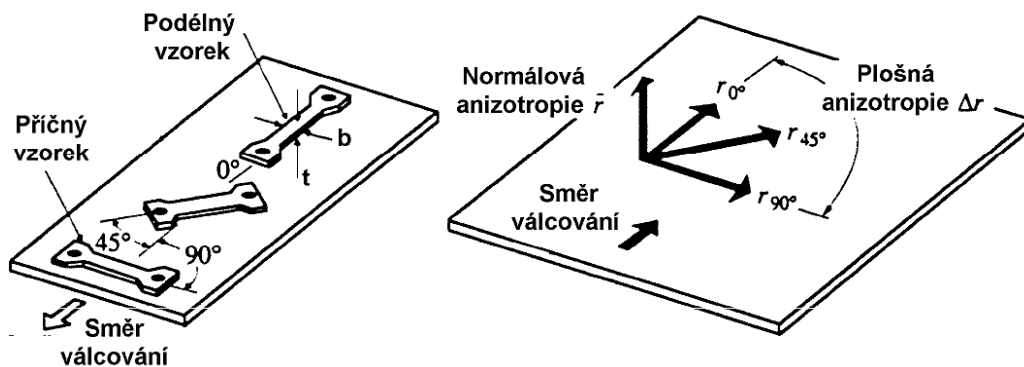
Jak již bylo řečeno, ukazatele tvařitelnosti a tedy i samotná tvařitelnost za studena je zjišťována při základních mechanických zkouškách (např. zkoušení tahem). Výstupem těchto zkoušek jsou informace o mechanických vlastnostech materiálu a jeho vhodnosti ke tváření neboli tzv. ukazatele tvařitelnosti, které nyní blíže popíši.

a) Poměr smluvní meze kluzu a meze pevnosti ($R_{p0,2}/R_m$)

Měl by se pohybovat v rozmezí $0,6 < R_{p0,2}/R_m < 0,8$, ale obecně platí, že čím menší poměr $R_{p0,2}/R_m$, tím lepší tvařitelnost (zvětšuje se oblast, kde může docházet k plastické deformaci). Tento předpoklad však platí výhradně pro již zmíněnou tahovou zkoušku. V reálném lisovacím procesu se může stát, že hodnota $R_{p0,2}$ se bude blížit hodnotě R_m a může se dokonce stát, že $R_{p0,2}$ dosáhne vyšší hodnoty, než je mez pevnosti. [2]

b) Součinitel plastické anizotropie r

Tento parametr je definován normou ČSN ISO 10113 a vyjadřuje poměr skutečné deformace šířky ϕ_b ke skutečné deformaci tloušťky ϕ_t při jednoosém zatěžování. Vyjadřuje nerovnoměrnost mechanických vlastností v rovině plechu ve směru jeho tloušťky. Hodnota r závisí na směru působící síly vzhledem ke směru válcování (viz. obr. 6).



Obrázek 6: Princip odebrání vzorků pro zkoušku tahem s ohledem na směr válcování [2]

Velikost součinitele plastické anizotropie udává schopnost materiálu odolávat ztenčení při tažení. Má význam jako ukazatel hlubokotažnosti. Čím je její hodnota vyšší, tím je materiál vhodnější pro hluboké tažení. Jako ukazatel tvařitelnosti se pro plastickou (normálovou) anizotropii užívá střední hodnota:

$$r_m = 0,25 (r_0 + 2 \cdot r_{45} + r_{90}) \quad [-]$$

Plošná anizotropie, která vyjadřuje nebezpečí vzniku cípatosti výtažku je definována vztahem:

$$\Delta r = 0,5 (r_0 + 2 \cdot r_{45} + r_{90}) \quad [-]$$

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

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

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

Čím nižší je hodnota Δr a vyšší střední hodnota normálové anizotropie r_m , tím méně dochází ke ztenčování stěny výtažků a plech je vhodnější k hlubokému tažení. [2] [11] [23] [25]

c) Exponent deformačního zpevnění n

Spolu s R_m je považován za nejdůležitější ukazatel technologické tvařitelnosti při plošném tváření a jeho stanovení je definováno normou ČSN ISO 10275. [26]

Vyjadřuje schopnost materiálu rovnoměrně se plasticky deformovat a stanovuje se ze vztahu:

$$\sigma = C \cdot \varphi^n \quad [\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}]$$

Exponent deformačního zpevnění je stejně jako součinitel anizotropie závislý na směru válcování, proto se určuje ve třech směrech vzhledem ke směru válcování (0° , 45° a 90°). Jako ukazatel tvařitelnosti materiálu se tak používá střední hodnota dána vztahem:

$$n_m = 0,5 (n_0 + 2 \cdot n_{45} + n_{90}) \quad [-]$$

Obvyklá hodnota n pro nízkouhlikové oceli je $n_m = 0,17 \div 0,24$

- Směrné hodnocení tvařitelnosti: [2] [11]

$n_m < 0,215$ nízká tažnost

$n_m = 0,215 \div 0,25$ dobrá tažnost

$n_m > 0,25$ vynikající tažnost

d) Zásoba plasticity ZP

Je nejvíce používaným ukazatelem tvařitelnosti. Zásoba plasticity je definována jako množství práce potřebné k plastické deformaci 1 mm^3 v oblasti rovnoměrné deformace. Vypočítá se ze vztahu:

$$\text{ZP} = \frac{3}{4} \cdot (R_m - R_{p0,2}) \cdot A_H \quad [\text{N}\cdot\text{mm}\cdot\text{mm}^{-3}]$$

$$\text{kde } A_H = 100 \cdot (e^n - 1) \quad [\%]$$

e) Komplexní ukazatel tvařitelnosti KUT

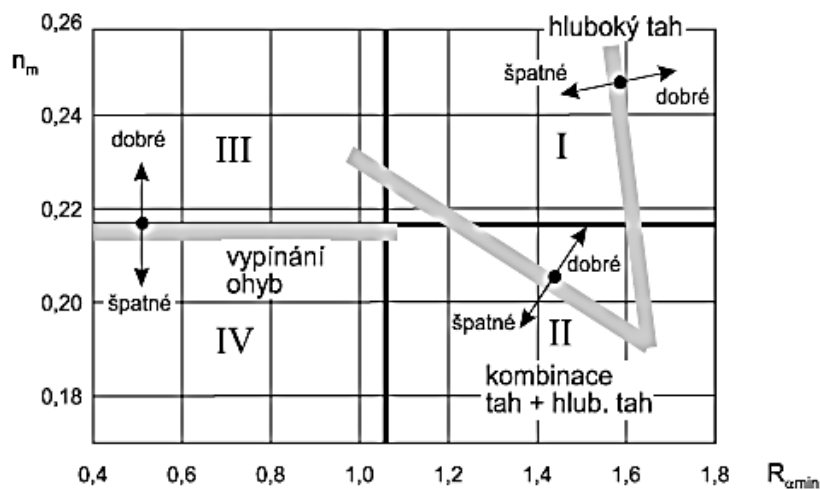
$$KUT = R_m/R_{p0,2} \cdot A_C \quad [-]$$

f) Index tvařitelnosti IT

Dle Lankorda a Lileta se jako ukazatel tvařitelnosti užívá také tzv. index tvařitelnosti, který je dán vztahem:

$$IT = r \cdot n_m \cdot 1000 \quad [-]$$

Materiály s velmi dobrou plastičností mají $IT \geq 300$. [2]



Obrázek 7: Diagram tvařitelnosti podle Lileta [11]

Diagram tvařitelnosti podle Lileta (viz. obr. 7) je rozdělen na 4 oblasti: [11]

- I. oblast je vhodná pro nejsložitější tažné operace
- II. oblast s převládající tlakovou deformací
- III. oblast s převládající tahovou deformací
- IV. oblast nevhodná pro hluboké tažení

2.2.3 Rozdělení tvařitelnosti

a) Technologická tvařitelnost

Specifikuje již určité podmínky tváření (válcování, kování, lisování, atd.) a vyjadřuje schopnost k určitým plastickým deformacím do porušení celistvosti v daných

technologických podmínkách. V literatuře je též dle způsobu tváření uváděna jako válcovatelnost, kovatelnost, atd. [6]

b) Metalurgická tvařitelnost

Je součástí technologické tvařitelnosti. Vyjadřuje vliv metalurgických činitelů na tvařitelnost za daných termomechanických podmínek (teplota a rychlost deformace).

Jak už bylo zmíněno, během tváření se jednotlivá zrna protahují ve směru hlavní deformace, čímž se mění jejich tvar, nikoliv však objem a dochází ke vzniku deformační textury. Důležitými faktory jsou chemické složení, čistota a krystalická struktura tvářeného materiálu. [2]

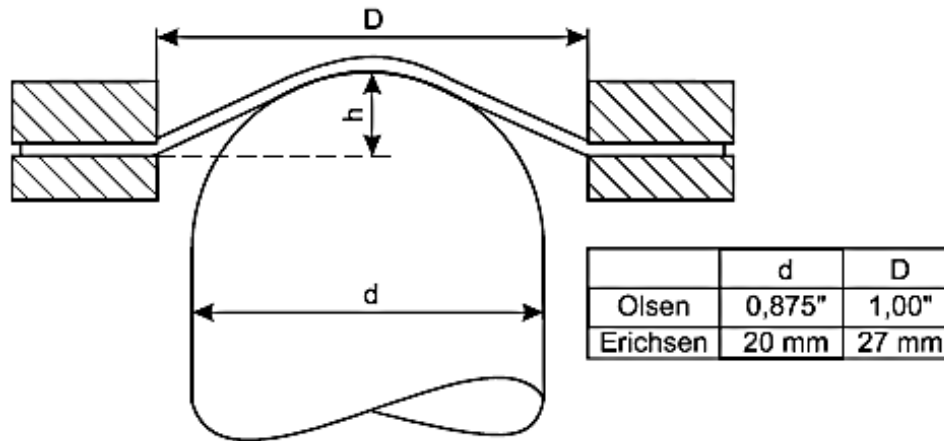
2.2.4 Technologické zkoušky hlubokotažnosti plechů

Vhodnost plechu k určité technologii tváření se dá zjistit pomocí technologických zkoušek materiálu. Těchto zkoušek existuje velká škála, např. zkouška hloubením podle Erichsena, zkouška kalíškovací, zkouška na rozšiřovaném otvoru podle Siebela a Pompa, zkouška klínová, zkoušky tažením v kuželové tažnici, atd. Každá zkouška zohledňuje různé deformační stavy, které probíhají při reálném procesu tváření. V této kapitole stručně popíši 2 v praxi nejpoužívanější technologické zkoušky. [13]

2.2.4.1 Zkouška hloubením podle Erichsena

Používá se k technologickému určení vhodnosti plechů k hlubokému tažení. Během zkoušky je modelováno tažení plechu za dvojsoého tahu. Zkouška je v Evropě známa jako Erichsenova a normalizována dle ČSN 42 0406, ale v USA je známa jako Olsenova.

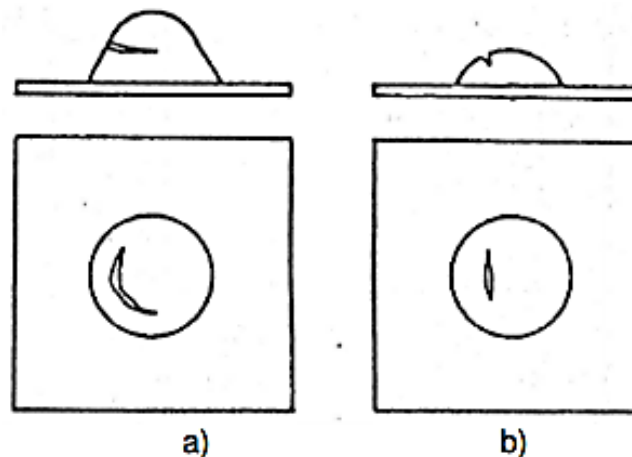
Princip zkoušky je znázorněn na obrázku 8, kdy se zkoušený vzorek plechu upne mezi přidržovač a tažnici a tažník ve tvaru koule o průměru 20 mm se rovnoměrně posouvá do středu plechu a vytváří prohloubení, které se sleduje až do vzniku první trhliny, kdy zkouška končí.



Obrázek 8: Schéma zkoušky hloubením [11]

Ukazatel vhodnosti plechu k hlubokému tažení se určuje podle velikosti prohloubení plechu. To je závislé nejen na materiálu, ale i na tloušťce plechu. Po ukončení zkoušky se hodnotí také směr a hrubost povrchu důlků. Ta je ukazatelem vhodnosti zrna plechu. Podle tvaru trhliny také můžeme rozpoznat, zda je plech vhodný pro hluboké tažení či nikoliv (viz. obr. 9).

- a) trhlina na plechu, který je typický pro hluboké tažení
- b) trhlina na plechu nevhodném pro hluboké tažení

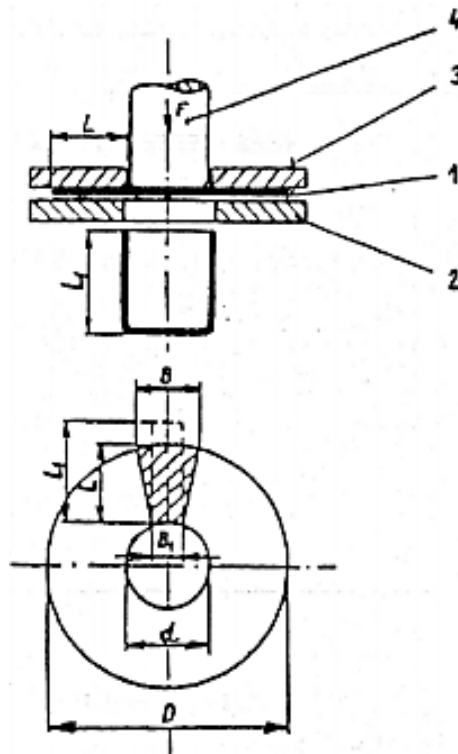


Obrázek 9: Tvar trhliny při Erichsenově zkoušce hloubením pro různé materiály [13]

Výhodou této zkoušky je její jednoduchost, rychlost a nenáročnost na přípravu vzorků. Nevýhodou je, že nepodává informaci o anizotropii mechanických vlastností zkoušeného plechu. Při ručním zatěžování jsou naměřené výsledky do jisté míry ovlivněny obsluhou zařízení, protože hloubka h je závislá na rychlosti a plynulosti posuvu tažníku. [11] [13]

2.2.4.2 Zkouška kalíškovací

Tato zkouška (známá také jako zkouška AEG, Schmidtova nebo Swiftova) věrně modeluje proces hlubokého tažení (viz. obr. 10) a používá se zejména pro hodnocení hlubokotažnosti tenkých plechů. Ukazatelem tvařitelnosti je součinitel tažení $m = d/D$, kde d znamená průměr tažníku a D je experimentálně zjištěný maximální průměr kruhového přístřihu, ze kterého lze vytvořit kalíšek (výtažek) bez porušení. Této zkoušky se využívá zejména u rotačně symetrických součástí.



Obrázek 10: Princip kalíškovací metody [13]

1 – zkušební vzorek, 2 – tažnice, 3 – přidržovač, 4 - tažník

Výhodou zkoušky je, že díky cípatosti výtažků lze hodnotit anizotropii mechanických vlastností zkoušeného plechu. Za nedostatek zkoušky lze považovat, že nejsou dosud normovány rozměry vzorků, což vede k vyššímu rozptylu srovnatelných výsledků. [11] [13]

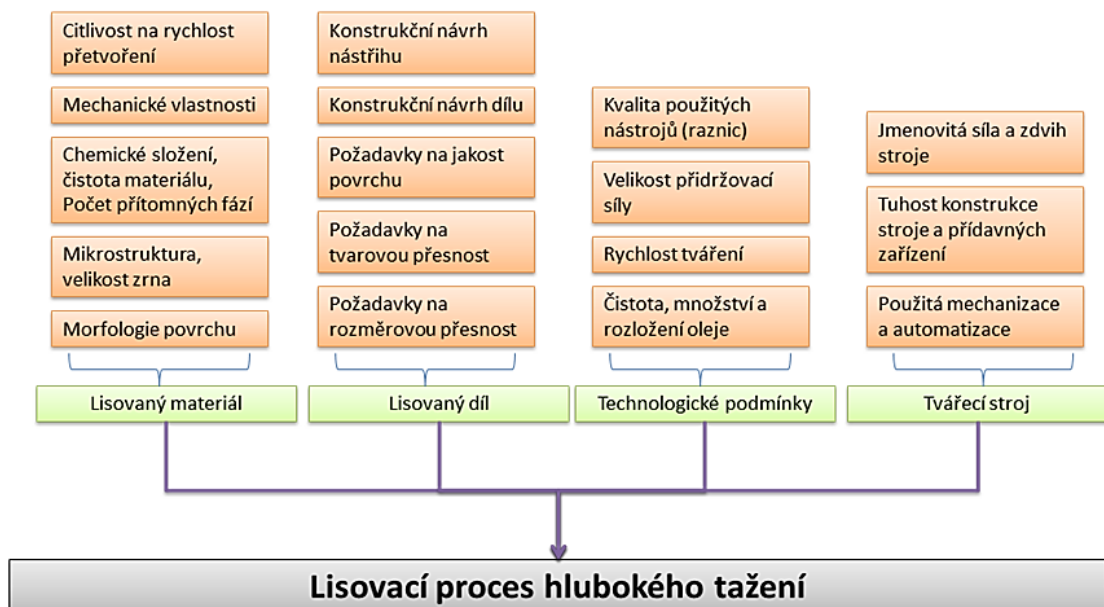
2.3 Faktory ovlivňující tvařitelnost

Tvařitelnost oceli za studena je umožněna fyzikální podstatou struktury tvářeného kovu a dále významně ovlivněna řadou metalurgicko-technologických

výrobních faktorů jako jsou chemické složení, čistota, výrobní způsob a struktura oceli, způsob technologického tvářecího pochodu nebo podmínky tváření (tvářecí nástroje, stav povrchu, tření, rychlost, stav napjatosti atd.). [6]

Během procesu hlubokého tažení je rovinný přístřih přetvořen v duté těleso. Jedná se o prostorový ohyb, kdy dostáváme nerozvinutelný tvar bez podstatného zeslabení tloušťky plechu. V automobilovém průmyslu je tvar výtažku většinou složitý a nepravidelný, což obnáší i složitý tvar tažníku a tažnice a často i brzdící lišty a přidržovače. Stav napjatosti a přetvoření jsou tím pádem na výlisku rozloženy nerovnoměrně a tím je materiál při výrobě podroben celkovému přetvoření. [7]

Proces hlubokého tažení je charakteristický vysokými tvářecími silami, které jsou závislé na požadované síle k přetvoření materiálu. Dále na velikosti tření, které je vyvolané tlakem přidržovače a na odporu materiálu vyvolaném na hraně tažnice. Nelze opomenout ani další faktory jako mazání nebo brzdící lišty. Výrazný vliv na celý proces má nejen tvářený materiál, ale i materiál tvářecího nástroje. Všechny parametry ovlivňující proces hlubokého tažení a výslednou kvalitu výlisku jsou přehledně shrnuty a rozděleny na obrázku 11. [2] [7]



Obrázek 11: Základní vlivy ovlivňující kvalitu lisovacího procesu [7]

Všechny tyto faktory lze rozdělit do čtyř hlavních skupin, které dále stručně popíši. Jsou to faktory metalurgické, termomechanické, technologické a stav napjatosti.

2.3.1 Metalurgické faktory

- **Krystalická struktura** – tvařitelnost je podmíněna počtem kluzových rovin a směrů
 - nejlepší tvařitelnost mají kovy s krychlovou plošně středěnou mřížkou, následuje krychlová prostorově středěná a nejnižší tvařitelnost mají kovy s šesterečnou těsně uspořádanou mřížkou [2]
- **Chemické složení oceli** – vyjadřuje vliv všech prvků (základní, legovací, speciální, plyny, nečistoty atd.) v oceli na tvařitelnost
 - závisí na složení vsázky, vedení tavby a dezoxidaci
- **Strukturní stav oceli** – litý nebo protvářený
 - makrostruktura – orientace, velikost zrn (čím menší velikost zrn, tím lepší tažnost a tvařitelnost), vady, nehomogenity
 - mikrostruktura – charakter zrn, hranice zrn, mikročistota
 - je ovlivněn chemickým složením, výrobou a odléváním oceli, teplotním a deformačním režimem při tváření, způsobem ochlazování i tepelným zpracováním
- **Tepelně aktivované děje** – závisí na difuzních schopnostech tvářené oceli a termomechanických podmínkách tváření
 - ovlivňují především průběh zpevňování a uzdravování a mají rozhodující vliv na deformační schopnosti oceli
 - kinetiku a mechanismus tepelně aktivovaných dějů ovlivňují primární (chemické složení, strukturní stav oceli a dislokační struktura) a sekundární činitelé (termomechanické podmínky tváření a délka difuzní dráhy)
- **Způsob dezoxidace** – ovlivňuje především obsah plynů v oceli, složení a způsob výskytu vměstků, makrovady (dutiny, póry) a jakost hranic zrn [6]

2.3.2 Termomechanické faktory

- **Rychlost deformace** – vysoká rychlost deformace může zvýšit aktuální teplotu kovu během tváření, jelikož se deformační práce mění na teplo a tím může dojít ke snížení tvařitelnosti
 - s rostoucí rychlostí deformace rovněž roste modul pružnosti, který jinak klesá s rostoucí teplotou
 - s rostoucí deformační rychlostí se zvyšuje kritická teplota T_k , což snižuje oblast tváření za studena [2]
- **Velikost deformace** – celkový průběh deformace, velikost jednotlivých deformací a časový průběh deformací
- **Historie deformace** – vyjadřuje kumulaci zpevnění při neúplném průběhu dynamického a postdynamického uzdravení [6]

2.3.3 Stav napjatosti

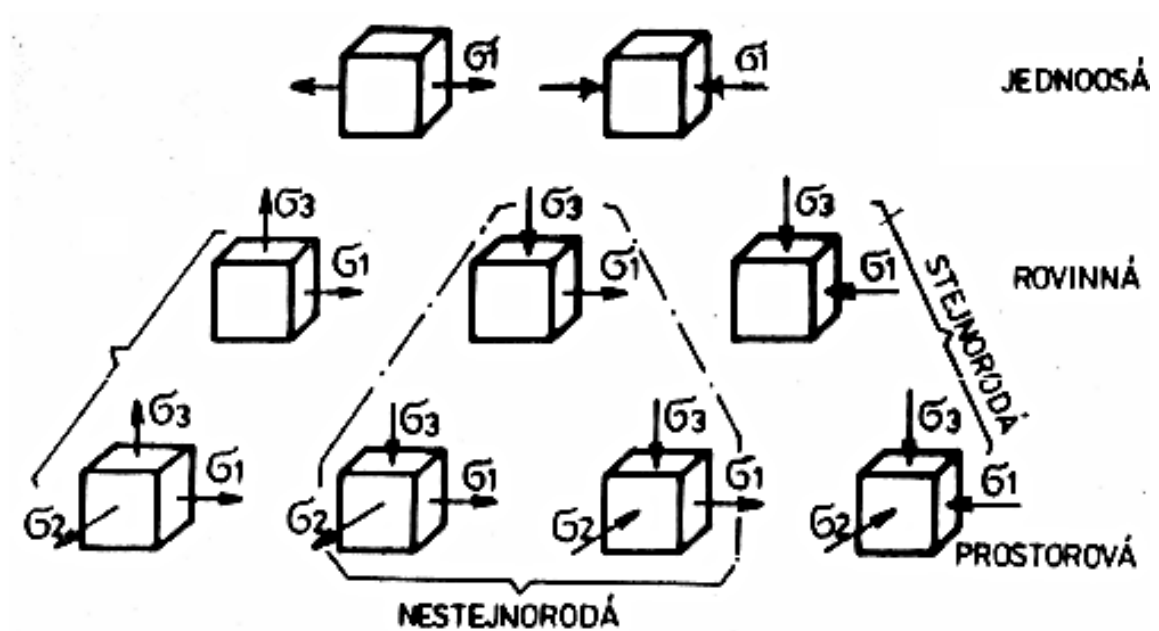
Hlavní faktor, který zásadním způsobem ovlivňuje tvařitelnost materiálu. Je charakterizován velikostí a typem převažujících napětí, která způsobí dosažení plastického stavu.

Plošné tváření je charakterizováno neustáleným rovinným stavem napjatosti. Zahnuje celou škálu technologií (hluboké tažení komplexní tažení, ohýbání plošné i prostorové,...), při kterých se skutečný stav napjatosti na jednotlivých stádiích procesu mění od jednoosého tahu, přes smyk, ke kombinaci tahu a tlaku a dvojosému tahu. Technologie jsou ohraničeny hlubokým tažením a vypínáním. Většina technologií tažení v sobě kombinuje v různé míře obě operace.

Tvařitelnost materiálu roste s podílem tlakových napětí, naopak s rostoucím podílem tahových složek napětí se zvyšuje náchylnost materiálu ke křehkému, převážně interkrystalickému lomu.

Nejlepší tvařitelnost je pro všestranný tlak, nejhorší v případě všestranného tahu. Existuje celkem 9 schémat stavu napjatosti (viz. obr. 11), na kterých šipka ven

představuje tahové napětí a šipka dovnitř napětí tlakové. Plošné tváření je charakterizováno neustáleným rovinným stavem napjatosti. [2]



Obrázek 11: Schémata stavu napjatosti [2]

2.4 Rychlost deformace

Rychlost deformace je definována změnou stupně deformace $d\varphi$ za jednotku času dt :

$$\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt} \quad [s^{-1}]$$

Změnu stupně deformace lze vyjádřit jako poměr změny délky dl k délce původní l_0 :

$$d\varphi = \frac{dl}{l_0} \quad [-]$$

V reálných technologických procesech je rychlost deformace proměnnou veličinou, a tedy se nerovná rychlosti pohybu nástroje. Například pro tahovou zkoušku platí vztah:

$$\dot{\varphi} = \frac{v}{l} \quad [s^{-1}]$$

Kde v je rychlost pohybu nástroje a l je dráha nástroje v daném okamžiku.

V technologické praxi se pohybuje rozsah deformačních rychlostí $\dot{\varphi}$ od 10^{-1} do 10^{-3} s^{-1} . Zvýšená rychlost deformace urychluje kinetiku rekrystalizace. Zkracuje se doba průběhu zotavovacích dějů, takže materiál má během a po tváření větší hustotu dislokací a vnitřní energii. [6]

Z hlediska tváření za studena nebyl dosud objeven zásadní fakt vlivu citlivosti materiálu na rychlost deformace. Vliv deformační rychlosti není jednoznačný, závisí na ostatních tvářecích faktorech, jako jsou kinematika pohybu nástroje, geometrie nástrojů, způsob a orientace tečení materiálu v nástroji atd. [8]

2.4.1 Rychlost deformace v praxi

V drtivé většině případů probíhá lisování na klikových lisech, a jak už vyplývá z principu jeho funkce, není rychlost deformace při procesu tváření konstantní, jelikož v úvrati je rychlost pohybu beranu lisu minimální.

Z tohoto hlediska se celá tato problematika v minulosti zjednodušovala a nebyl jí přikládán zásadní význam. To se ale v posledních letech změnilo a např. v automobilovém průmyslu dochází v zájmu udržení nízkých nákladů ke snižování výrobních časů při výrobě součástí.

Toto se týká též lisování součástí z hlubokotažných plechů, kdy dochází ke zkracování výrobního taktu pomocí urychlení procesu tváření, čímž také roste rychlost deformace. [8]

S rostoucí rychlostí deformace ale zároveň narůstá deformační odpor, mez pevnosti, mez kluzu a klesá tažnost. Takovéto chování materiálu je ještě více patrné u materiálu s nižší tavicí teplotou kovu, což je charakteristické pro houževnaté materiály, které se používají např. právě v automobilovém průmyslu jako karosářské plechy. [9]

Vysoké tvářecí takty lisovacích linek způsobují, že je materiál tvářen velmi vysokou rychlostí a není schopen dostatečného přetvoření, prudce narůstá hustota dislokací a může dojít ke vzniku vnitřních defektů v materiálu. Extrémní nárůst hodnoty deformační rychlosti může mít za důsledek i skutečnost, že se i tvárný materiál poruší křehkým lomem vlivem blížících se hodnot meze pevnosti a meze kluzu.

Jak již bylo řečeno, v minulosti nebyl této problematice přikládán velký význam, ale jak je z dosažitelných zdrojů poslední doby patrné, je nutné se tímto parametrem zabývat, jelikož jak bylo zjištěno v literárním zdroji [14], vysoké tvářecí takty lisovacích linek způsobují, že je materiál tvářen tak vysokou rychlostí, že není schopen se v některých místech dostatečně přetvořit. V těchto místech narůstá hustota dislokací, které mohou iniciovat vznik defektu.

Za předpokladu, že je přetvárná rychlost materiálu ovlivňována stupněm deformace i rychlostí deformace, lze použít tento mocninný zákon:

$$k_p = C \cdot \varphi^n \cdot \dot{\varphi}^m \quad \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

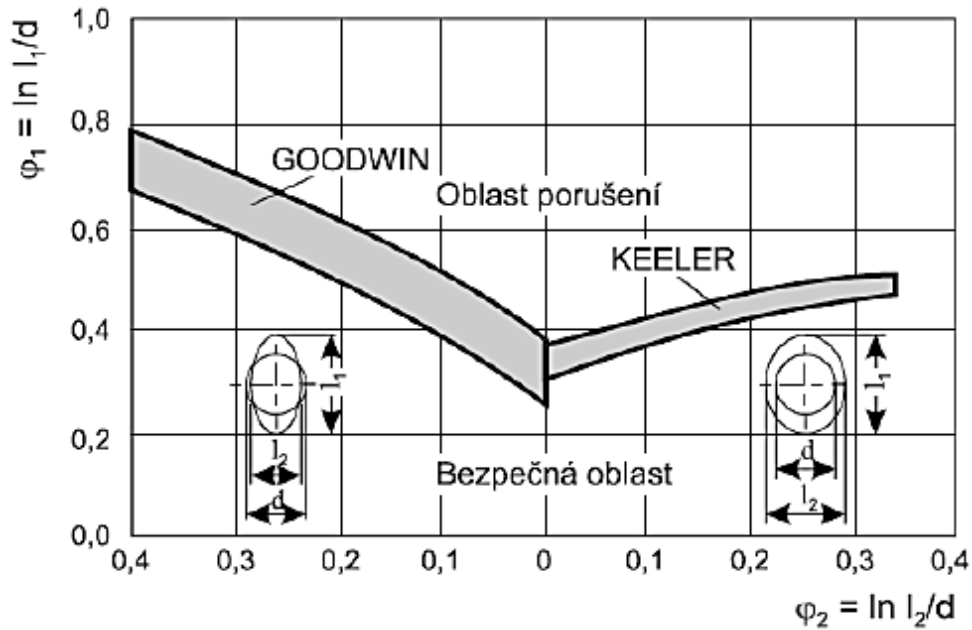
Kde k_p je přetvárná pevnost, φ je stupeň deformace, $\dot{\varphi}$ je rychlost deformace, n je exponent deformačního zpevnění a m je exponent vyjadřující citlivost napětí na rychlost deformace. [6]

2.5 Hodnocení tvařitelnosti – FLD diagram

FLD diagramy (Forming Limit Diagram) neboli diagramy mezních přetvoření se v praxi používají pro hodnocení technologické tvařitelnosti součásti z plechu, k odhadu výskytu defektů a v konečném důsledku ke korekci technologických tvářecích postupů.

Každý výrobek z plechu má limit, do kterého může být deformován, než dojde k jeho porušení. Maximální hodnota, do které může být materiál deformován, je funkcí nejenom hlavního napětí tvářené části, ale také přidruženého vedlejšího napětí.

V šedesátých letech dvacátého století shromáždil Keeler výsledky z mnoha experimentů zabývajících se analýzou hlavních a vedlejších přetvoření (deformací) při tváření plechových polotovarů a zjistil, že hodnota hlavního přetvoření je závislá na hodnotě vedlejšího přetvoření. Získané hodnoty vynesl do grafu závislostí těchto dvou přetvoření a získal diagram, který pojmenoval FLD limitní diagram. [10]

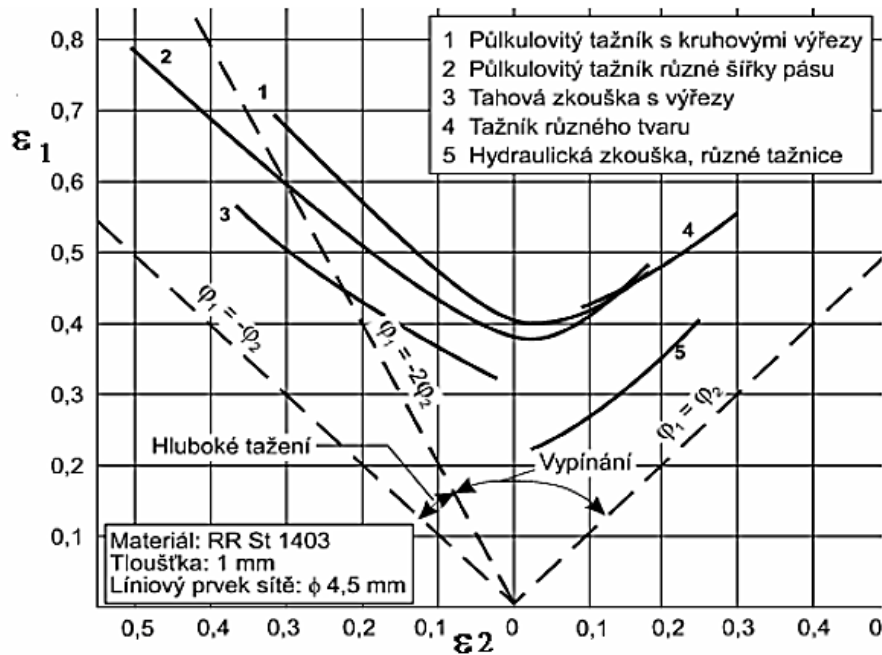


Obrázek 12: Keeler – Goodwinův diagram [10]

Keelerova práce však byla limitována podmínkami, kdy obě napětí byla kladná. Proto v roce 1968 Goodwin rozšířil Keelerovu práci i na situace, kdy hlavní přetvoření je kladné a vedlejší přetvoření je záporné. Tento složený diagram je dnes známý jako Keeler – Goodwinův diagram (viz. obr. 12).

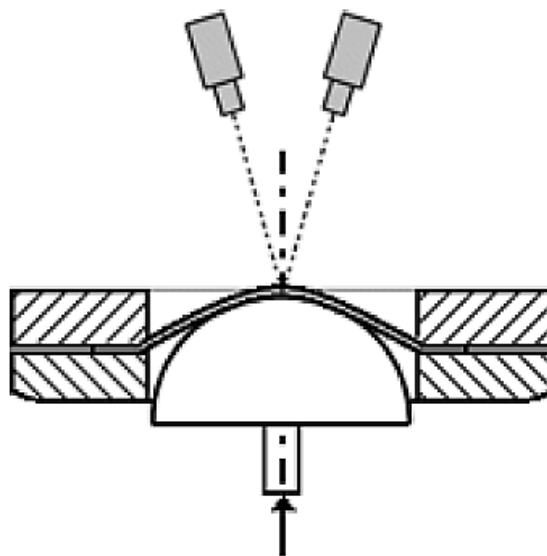
Základem pro limitní diagram jsou tzv. křivky mezní tvažitelnosti (FLC – Forming Limit Curves), které definují hranici mezi bezpečnou oblastí a oblastí porušení. Tyto křivky resp. diagramy mezních deformací lze získat buď matematicky nebo na základě experimentů (např. tahová zkouška) (viz. obr. 13). Zajímavé je, že tvar FLC křivky je v podstatě stejný pro všechny produkty z plechu, jediným rozdílem je, kde se křivka nachází v osách hlavního a vedlejšího přetvoření. [10]

Výsledný diagram je podobně jako všechny ostatní mechanické zkoušky závislý na mnoha vstupních podmínkách a faktorech. Tyto faktory lze rozdělit na faktory týkající se průběhu experimentu a faktory, které jsou dány zkoušeným materiálem.



Obrázek 13: Experimentálně zjištěný FLD diagram pomocí různých mechanických zkoušek [11]

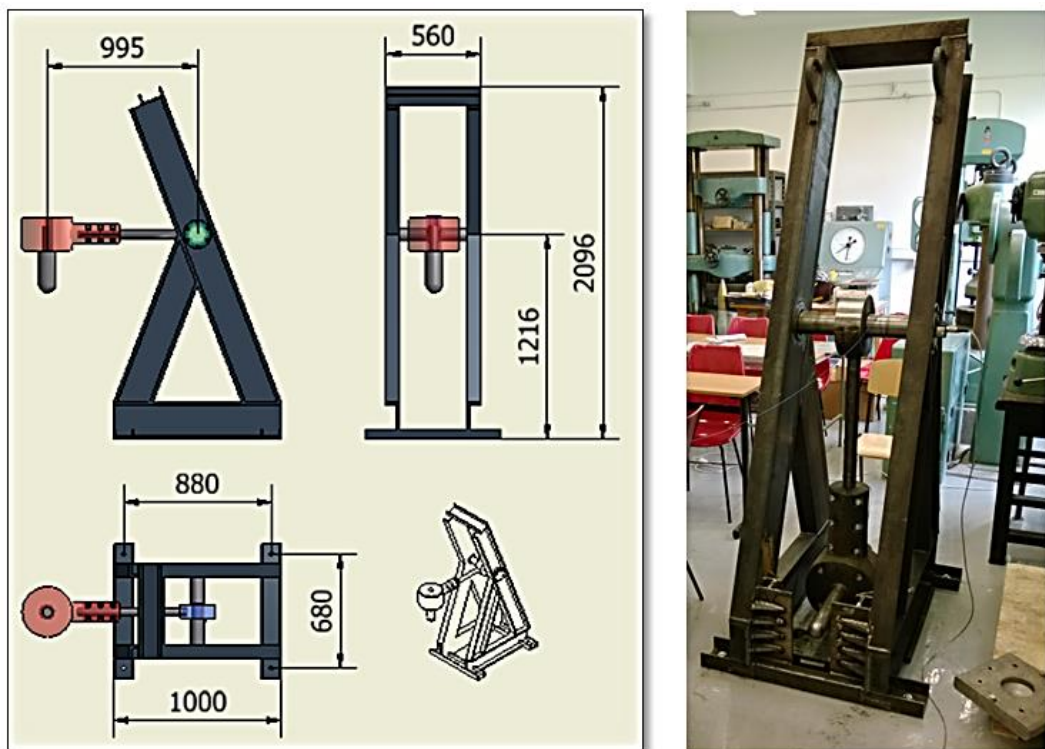
Před mechanickou zkouškou je na polotovar vylisku nanесena nejčastěji kruhová síť a po mechanické zkoušce dojde k měření velikosti zdeformované sítě na hotovém vylisku. K měření deformace sítě se nejčastěji používá optické 3D měření CCD kamerou (viz. obr. 14) s následným počítačovým zpracováním naměřených dat. Tato metoda dokáže velmi přesně odečíst souřadnice kruhové sítě, které jsou vstupními hodnotami pro sestavení FLD diagramu.



Obrázek 14: Princip odečítání bodů z nanесených sítí CCD kamerou [15]

2.6 Experimentální zařízení

Jak jsem se již zmínil v úvodu, tato práce má za úkol vytvoření metodiky pro sledování citlivosti materiálu na rychlosti deformace zkušební vzorku. Za účelem sledování chování materiálu při různých rychlostech deformace bylo zkonstruováno experimentální zařízení pracující na principu Charpyho kladiva (viz. obr. 15), na kterém je možné měřit rychlost deformace a její vliv na chování materiálu při simulaci procesu plošného tváření.



Obrázek 15: Návrh a následná realizace zkušebního zařízení [14]

2.6.1 Konstrukce experimentálního zařízení

Konstrukce experimentálního zařízení je modifikací zařízení pro zkoušky rázem v ohybu, tzv. Charpyho kladiva. Základem konstrukce zkušebního zařízení je tuhý rám svařený z ocelových U profilů. V rámu je upevněn hřídel, který umožňuje rotační pohyb dělené hlavy, ve které je zasazen zkušební nástroj. Nástrojem je půlkulový tažník o průměru 60 mm. Další částí zařízení je sestava tažnice s přidržovačem. Z bezpečnostních důvodů je celé zařízení připevněno k podlaze pomocí čtyř kotvících šroubů.

Nástroj je osazen snímacím systémem, který umožňuje sledování průběhu deformace během zkoušky a zaznamenává výsledky. Použitému snímacímu systému bude dále věnována samostatná kapitola.

Zdrojem energie pro deformaci materiálu zkušebním nástrojem je gravitační síla. Nastavením různých úhlů ramene s nástrojem je možné korigovat deformační rychlost nástroje. Konstrukce zařízení je řešena tak, aby při deformaci zkušebního vzorku nebyla překročena rychlost zvuku v kovech, protože v takovém případě dochází k šíření trhlin v materiálu jinými mechanismy.

Dělená hlava umožňuje upnutí různých typů a tvarů lisovacích nástrojů, což je perspektivní i s ohledem do budoucna, jelikož bude možné na základě zákona podobnosti simulovat konkrétní lisovací proces s reálným tvářecím nástrojem.

2.6.2 Nástroje

Jak už bylo zmíněno, výhodou tohoto zařízení je možnost výměny nástroje, takže bude možné simulovat reálný lisovací proces s konkrétním nástrojem. Do dělené hlavy je možné upnout nástroj různých tvarů i rozměrů.

V našem případě je nástrojem půlkulový tažník o průměru 60 mm (viz. obr. 16), který je upnut v dělené hlavě a jeho nehybnost je zajištěna pomocí matice M60. Délka pracovní části tažníku je 300 mm. Tato délka je navržena s ohledem k potřebnému prostoru pro brzdící mechanismy tak, aby nedošlo ke kontaktu hlavy s tažnicí.



Obrázek 16: Půlkulový tažník [15]

Druhým důležitým nástrojem tohoto zařízení je sestava tažnice a přidržovače, do které se upíná zkušební vzorek materiálu (viz. obr. 17). Tažnice slouží ke tvarování plechu přes tažnou hranu a stejně jako tažník je vyrobena z nástrojové oceli.

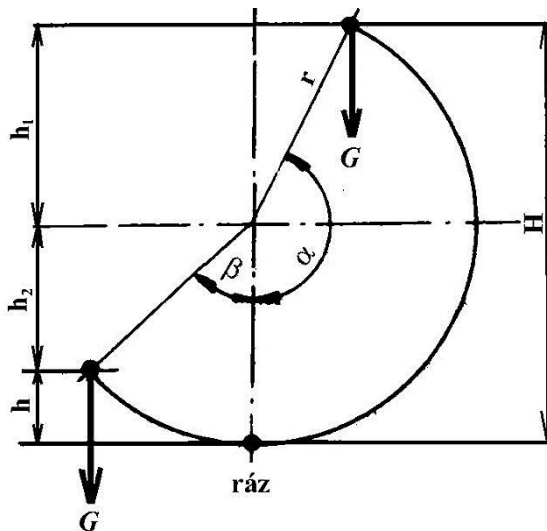


Obrázek 17: Přidržovací systém [15]

Přidržovač slouží k upnutí zkušebního vzorku. V tomto případě je i díky různé velké upínací síle možné zjišťovat vliv přidržovací síly na tvařitelnost materiálu. K zajištění vzorku v přidržovači slouží osm šroubů M12, které svírají vzorek uvnitř přidržovače. Při upínání vzorků do přidržovače je třeba dbát opatrnosti a vzorek přesně ustavit, jinak by nemusela zkouška proběhnout v pořádku a výsledkem by nebyly vypovídající hodnoty.

2.6.3 Fyzikální popis zkoušky

Z fyzikálního hlediska je popis stejný jako u zkoušky vrubové houževnatosti prováděné na Charpyho kladivu. Hlavu s nástrojem vyzdvihneme do výšky H (viz. obr. 18) nebo do požadovaného úhlu α a uvolněním hlavy udělíme nástroji potenciální energii o velikosti $W_{p1} = G \cdot H$. Jak začne kladivo vykonávat pohyb směrem k dolní úvrati, potenciální energie se postupně mění na kinetickou.



- H: výchozí výška kladiva vzhledem ke zkušební tyči
- h: konečná výška kladiva vzhledem ke zkušební tyči
- α : výchozí úhel kladiva
- β : konečný úhel kladiva
- r: poloměr kyvu břitu
- G: tíha kladiva

Obrázek 18: Princip funkce Charpyho kladiva [14]

Část této kinetické energie je spotřebována na deformaci vzorku (tzv. nárazová práce K) a zbytek energie ($W_{p2} = G \cdot h$) je využit na překmitnutí kladiva do výšky h (úhel β).

Práce spotřebovaná na deformaci zkušební vzorku (nárazová práce) K je dána rozdílem potenciálních energií W_{p1} a W_{p2} :

$$K = W_{p1} - W_{p2} = G \cdot (H - h) = G \cdot [(r + h_1) - (r - h_2)] = G \cdot r \cdot (\cos \beta - \cos \alpha) \quad [J]$$

Jelikož počáteční energie W_{p1} je dána konstrukcí kyvadlového kladiva, je velikost nárazové práce $K = G \cdot (H - h)$ jednoznačnou funkcí výšky h , do které překmitne hlava kladiva po porušení zkušební vzorku.

2.7 Zkušební materiály

K výrobě vzorků, na kterých bylo prováděno měření citlivosti materiálu na rychlosti deformace, byla použita legovaná ušlechtilá nízkouhlíková feritická ocel mikrolegovaná titanem DC06+ZE50/50-B-PO, plně martenzitická ocel Docol 1200 a korozivzdorná ocel 17 241. V této kapitole podrobněji jednotlivé materiály popíši.

2.7.1 Materiál DC06+ZE50/50-B-PO (dále jen DC06)

Jedná se o legovanou ušlechtilou nízkouhlíkovou feritická ocel, která je mikrolegovaná titanem Titan slouží jako karbonitridační stabilizátor k úplnému

vyčištění feritu od intersticiálně rozpuštěného C a N. Nízký obsah těchto prvků zvyšuje hodnotu normálové anizotropie a zaručuje tak lepší hlubokotažné vlastnosti. Chemické složení materiálu dle normy ČSN EN 10152 je uvedeno v tabulce 1.

Tabulka 1: Chemické složení zkušebního materiálu DC06:

Chemické složení materiálu DC06+ZE50/50-B-PO					
Hodnoty jsou uvedeny v maximálním hmotnostním zastoupení [%]					
C	P	S	Mn	Ti	Fe
0,02	0,020	0,020	0,250	0,30	zbytek

Tento materiál je vyráběn jako úplně uklidněný (stabilní), kde jeho stabilitu zajišťuje optimalizovaný obsah hliníku. Jedná se o materiál běžně používaný v průmyslové praxi pro výrobu výlisků. Jmenovitá tloušťka plechu je 0,75 mm. Korozní odolnost materiálu zajišťuje elektrolyticky nanesená vrstva zinku o tloušťce 5 µm. Plech je fosfátován, olejován a dodáván ve svitcích.

Mechanické vlastnosti uvedené v tabulce 2 platí pouze pro stav po válcování za studena a jsou platné po dobu uvedenou v tabulce 2 od data, kdy byla tato data k dispozici. Toto datum musí být kupujícímu oznámeno s dostatečným předstihem v souladu s platností mechanických vlastností.

Tabulka 2: Mechanické vlastnosti zkušebního materiálu DC06:

Označení			Definice a klasifikace oceli podle EN 10020:2000	Dezoxidace oceli	Doba platnosti mechan. vlastností	Jakost povrchu	R_e [Mpa] a)	R_m [Mpa]	A_{80} [%] min. b)	r_{90} min. c),d)	n_{90} min. c)
Oceli		Symbol pro typ povlaku									
Značka oceli	Číselné označení										
DC06	1.0873	+ZE	legovaná jakostní ocel	úplně uklidněná	6 měsíců	A, B	- /180 ^{e)}	270 - 350	41	2,1	0,21

Hodnoty zjišťované zkouškou tahem platí pro směr kolmý ke směru válcování a odpovídající příčnému průřezu zkušební tyče bez zinkového povlaku. Součinitel plastické anizotropie r_{90} a exponent deformačního zpevnění n_{90} se určují v oblasti homogenní deformace v rozsahu prodloužení 10 až 20%.

2.7.1.1 Povrchová úprava materiálu DC06

Jak již bylo řečeno, u použitého zkušebního materiálu se jedná o povrchovou úpravu s elektrolyticky vyloučenou vrstvou zinku. V označení povlaku se uvádí povlak jako desetinásobek jmenovité tloušťky v μm a to odděleně pro každou stranu. Hodnoty uvedené v tabulce 3 platí pro výrobky se zinkovým povlakem stejné tloušťky na obou stranách.

Tabulka 3: Elektrolytický zinkový povlak zkušebního materiálu DC06:

Označení povlaku	Jmenovitá hmotnost zinkového povlaku na každé straně ^{a)}		Maximální hmotnost zinkového povlaku na každé straně ^{b)}	
	Tloušťka [μm]	Hmotnost g/m^2	Tloušťka [μm]	Hmotnost g/m^2
ZE 50/50	5	36	4,1	29

Hmotnost elektrolyticky vyloučené vrstvy povlaku se stanoví na každé straně. Každý jednotlivý výsledek musí odpovídat požadavkům na minimální hmotnost povlaku uvedenou v tabulce 3. Po dohodě mezi výrobcem a odběratelem lze dodávat i materiál pozinkovaný pouze na jedné straně.

2.7.1.2 Vhodnost materiálu DC06 k dalšímu zpracování

Elektrolyticky nanášené povlaky obvykle dobře drží na povrchu i při obtížném způsobu tváření. Pokud je však výrobek intenzivně tvářen či ražen, může docházet během zpracování k odlučování prachových částic zinku z povrchu. Je tedy nutno zabezpečit pečlivé řízení rychlosti tváření a čistotu matrice. [15]

2.7.2 Materiál Docol 1200

Jedná se o plně martenzitickou (jednofázovou) ocel, která je nejvhodnější pro ohýbání válcování, jednoduché lisování a výrobu trubek. Její pevnost a mikroskopická struktura je získávána během výroby na kontinuální žíhací lince extrémně rychlým kalením pomocí vody. [16]

Tabulka 4: Chemické složení zkušebního materiálu Docol 1200:

Chemické složení materiálu Docol 1200									
Hodnoty jsou uvedeny v maximálním hmotnostním zastoupení [%]									
C	P	S	Mn	Si	Al	Nb	V	Cr	Ni
0,106	0,01	0,003	1,58	0,19	0,044	0,015	0,01	0,03	0,03

Tabulka 5: Mechanické vlastnosti zkušebního materiálu Docol 1200:

Mez kluzu R_e [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A_{80mm} [%]
1095	1250	4

2.7.3 Korozivzdorná ocel 17 241

Korozivzdorná (nerezavějící) ocel neboli nerez je druh oceli, jejíž hlavní požadovanou vlastností je odolnost vůči korozi. Nerez je vysocelegovaná ocel - slitina chromu, niklu a železa, jež má obsah 10,5 - 30 % chromu, do 30 % niklu nebo do 2,5 % manganu. Nerez současně obsahuje určité množství dalších austenitotvorných prvků, např. uhlík, mangan, dusík, měď. Chrom vytváří na vzduchu pasivní vrstvu oxidu chromitého, která brání další korozi.

V rámci experimentů byla použita austenitická korozivzdorná Cr-Ni ocel 17 241, která je mimo jiné vhodná právě pro výrobu plechů a pásů. Odolává korozi v pasivním a v některých prostředích i v aktivním stavu. Odolává kyselině dusičné (vyjma koncentrované za varu), velmi zředěné kyselině sírové a za přístupu vzduchu i některým silnějším organickým kyselinám (např. octové, citrónové). Velmi dobře odolává atmosférické korozi.

Odolnost proti korozi se zvyšuje leštěním povrchu, klesá však zpevněním povrchu při tváření za studena. Ocel je dobře tvárná za tepla i za studena, obrobitelnost je ztížená. Je vhodná na součásti a zařízení v chemickém, potravinářském a kvasném průmyslu pro teploty max. 400 °C či chirurgické nástroje. [17]

Tabulka 6: Chemické složení zkušebního materiálu 17 241:

Chemické složení materiálu 17 241						
Hodnoty jsou uvedeny v maximálním hmotnostním zastoupení [%]						
C	P	S	Mn	Si	Cr	Ni
max. 0,12	max. 0,045	max. 0,03	max. 2,0	max. 1,0	17,0 - 20,0	8,0 - 11,0

Tabulka 7: Mechanické vlastnosti zkušebního materiálu 17 241:

Mez kluzu R_e [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A_{80mm} [%]	Kontrakce Z [%]
min. 196	min. 530	min. 45	min. 50

3. Praktická část

V této kapitole se již zaměřím na samotná měření na experimentálním zařízení. Tomu předcházelo několik dílčích úkonů. V první řadě připomenu původní použitý snímací systém experimentálního zařízení, u kterého byla provedena modifikace novým snímačem síly, jelikož původní snímač síly nedokázal zajistit opakovatelnost měření z důvodu rušivých faktorů snímače. Dále byl vytvořen speciální program pro provádění a vyhodnocování dynamických zkoušek na experimentálním zařízení.

Dále bylo ve spolupráci se Škoda Auto, a.s. provedeno 3D skenování nástrojů, jehož výsledky umožňují použití modelu pro počítačovou simulaci tvářecího procesu. Další částí praktické části jsou samotná měření na experimentálním zařízení a jejich vyhodnocení. Na základě poznatků z měření byla vytvořena metodika zkoušení na experimentálním zařízení, kterou na závěr podrobněji popíši.

3.1 Původní snímací systém experimentálního zařízení

Tato diplomová práce navazuje na poznatky získané v literárním zdroji [15], kde byly jako součásti původního snímacího systému použity úhlový potenciometr pro sledování aktuální polohy (úhlu) hlavy kladiva s upnutým tažníkem a akcelerometr pro měření vyvozené síly, který sledoval změnu rychlosti pohybu nástroje.

V této kapitole se vrátím k získaným poznatkům, na jejichž základě bylo potřeba provést modifikaci stávajících snímačů. Tato modifikace bude blíže popsána v další kapitole.

3.1.1 Snímač síly – K–Shear akcelerometr

Tento akcelerometr sleduje změnu rychlosti pohybu nástroje a řadí se do skupiny snímacích systémů s napěťovým režimem. Běžné využití nachází při testování automobilů nebo sledování vibrací a pohybujících se a rotujících objektů.

Snímač je vyroben z titanu a nerezové oceli a hermeticky uzavřen. Snímací plocha je vyrobena ze stabilních krystalů křemene. Snímač byl umístěn na zadní straně šroubu (viz. obr. 19), která drží hlavu kyvadla v ose kyvu. [15]



Obrázek 19: Umístění akcelerometru na zadní straně nástroje [15]

3.1.2 Úhlový potenciometr

Velmi důležitou sledovanou veličinou je úhel kyvadla. Pro jeho měření byl použit průmyslový potenciometr z elektricky vodivého plastu. Využití nachází především při měření úhlů, určování polohy, měření tolerance a kontinuálního snímání polohy. Snímač je vyroben jako robustní voděodolná konstrukce, čímž je vhodný k využití v průmyslovém prostředí, kde se nachází velké množství nečistot nebo vlhkost.

Senzor je umístěn z boku zařízení na otáčejícím se hřídeli. Upevnění snímače k zařízení je provedeno pomocí šroubu M4x10 (viz. obr. 20). Tento úhlový potenciometr se vyznačuje vynikající přesností měření. Reprodukovatelnost potenciometru je garantována jako $\pm 0,075\%$ a opakovatelnost jako $\pm 0,002\%$, tzn. $0,007^\circ$. [15]



Obrázek 20: Upevnění úhlového potenciometru

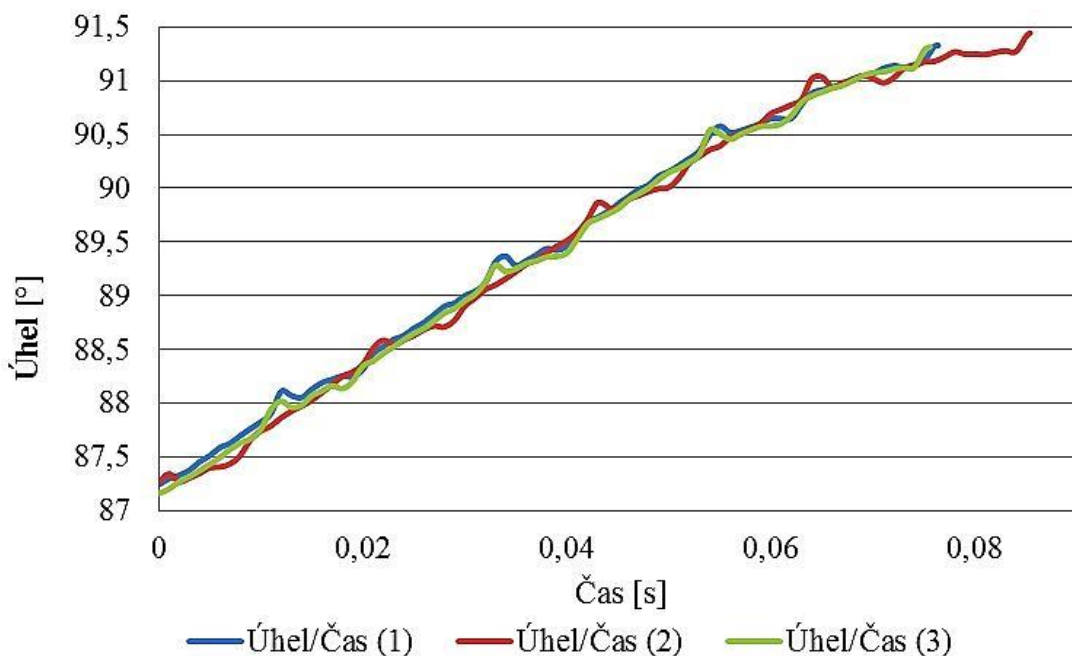
3.1.3 Naměřené hodnoty a vyhodnocení původního snímacího systému

Před zahájením měření na experimentálním zařízení bylo třeba provést kalibraci snímačů, jejímž cílem bylo zjištění jejich citlivosti a vhodnosti pro požadovaná měření. Cejchování a dodání snímačů bylo zajištěno firmou KISTLER s.r.o. Zkoušení se provádělo dvěma způsoby. První tzv. volným kyvem kladiva bez použití přidržovače a druhý s vloženým zkušebním přístřihem plechu v přidržovači pro ověření funkce snímačů a jejich případnou citlivost např. ke tření.

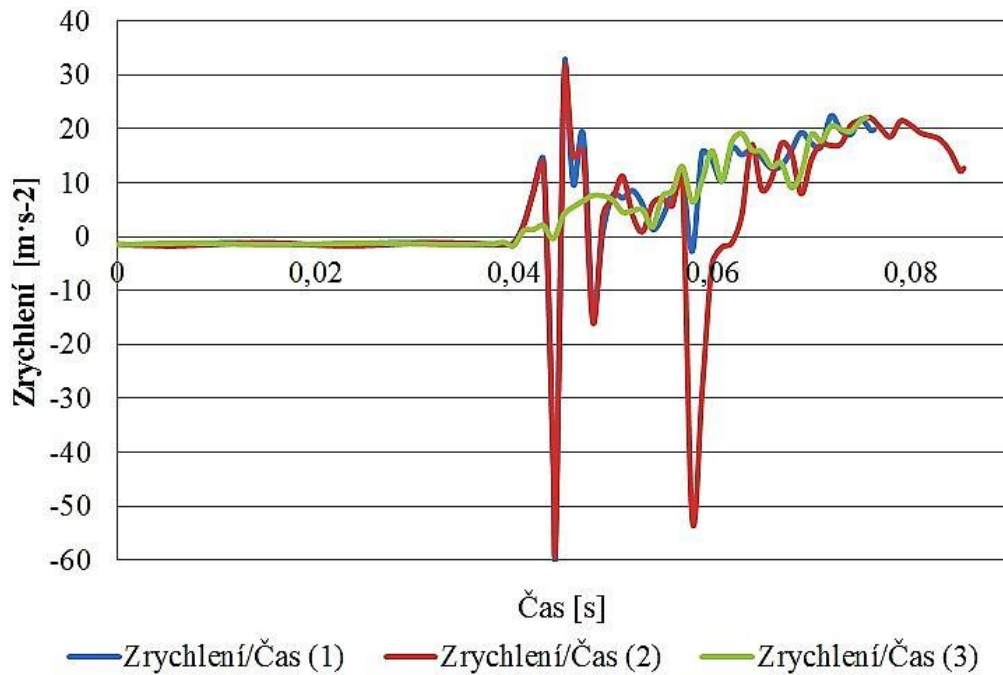
Zkoušeným materiálem byl ocelový plech označení DC06, ze kterého byly vyrobeny jak kruhové, tak obdélníkové přístřihy. Výchozí poloha kladiva byla stanovena na 20°. Jako ukázkou ze zkoušení původních snímačů uvádím průběhy naměřených hodnot pro obdélníkový přístřih o šířce 20 mm (viz. obr. 21).



Obrázek 21: Zkušební vzorek obdélníkového přístřihu



Obrázek 22: Průběh úhlu na čase pro 3 nezávislá měření [15]



Obrázek 23: Průběh zrychlení na čase pro 3 nezávislá měření [15]

Kalibrace úhlového snímače proběhla úspěšně (viz. obr. 22), to už ovšem neplatilo při měření zrychlení, kdy se vyskytly problémy s akcelerometrem a i přes veškeré úsilí i ve spolupráci s firmou KISTLER nedošlo k jeho bezchybné kalibraci, čímž nebylo možné zajistit ani opakovatelnost měření z důvodu rušivých faktorů snímače viz. průběh na obrázku 23.

Rušivými faktory byly vibrace. Jelikož celý děj je dynamický, nástroj získá dopadem vysokou energii, narazí do zkušební vzorku, který zdeformuje. Vlivem akce a reakce se energie vrací zpět do konstrukce zařízení a způsobí rezonanci a vibrace celého systému, což výrazně ovlivnilo naměřená data.

Jednou z dalších nevýhod akcelerometru je přepočítání zrychlení na sílu, které je sice možné provádět integrací průběhu zrychlení, ale jelikož výsledný průběh zrychlení byl ovlivněn rušivými faktory, výsledek přepočtu zrychlení na sílu by nebyl přesný. Z tohoto důvodu bylo potřeba řešit modifikaci snímacího systému, kdy se přešlo z akcelerometru na polovodičový tenzometr, který blíže popíši v následující kapitole.

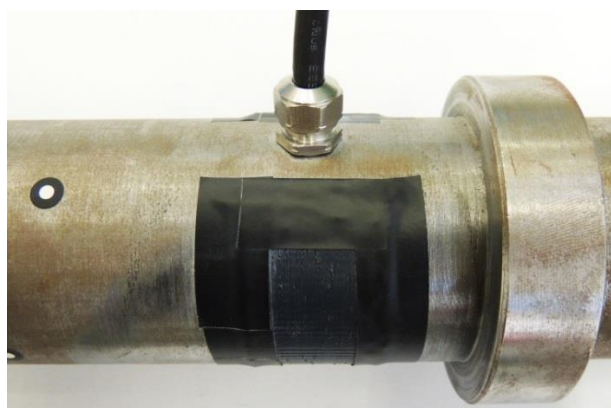
3.2 Modifikace snímacího systému

Tato kapitola je věnována modifikaci snímacího systému a to primárně změně snímače síly, kdy se v předchozích měřeních akcelerometr ukázal jako pro naše účely nevhodný. Dále zde bude podrobně popsán program, který umožňuje sledování a vyhodnocování měření na experimentálním zařízení a závěrem této kapitoly bude testovací měření s novým snímacím systémem.

3.2.1 Snímač síly – polovodičový tenzometr

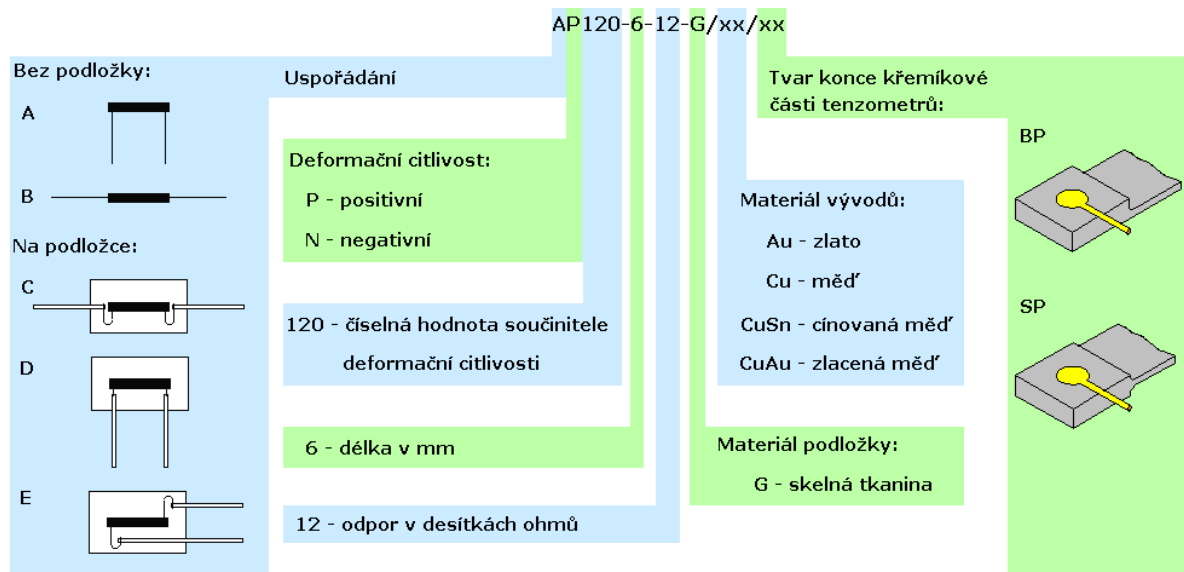
Tenzometrický rezistor (tenzometr) je odporový senzor, u něhož je změna elektrického odporu závislá na změně deformací tenzometru (tj. změně geometrických rozměrů, případně změně krystalografické orientace tenzometru) a na změně teploty prostředí. První tenzometr (anglicky Strain gage) byl poprvé prakticky sestrojen již v roce 1938 a od té doby nacházejí využití v mnoha oblastech průmyslu, kde slouží k přesnému měření deformací, sil, tlaků i momentů.

Bez tenzometrů by se neobešli stavaři, architekti, projektanti ani automobilový a strojírenský průmysl. I když první tenzometry byly kovové, v dnešní době se stále ve více aplikacích využívá tenzometrů polovodičových (křemíkových), který je použit i na našem experimentálním zařízení (viz. obr. 24). Konkrétně byl použit polovodičový tenzometr typu AP130-6-35/Au/BP, N-Sort, se jmenovitým ohmickým odporem 350 Ω , který byl zapojen v plném (Wheatstoneově) můstku. Tenzometry označené jako N-Sort jsou vhodné pro dynamické měření a ustálené teploty. Tenzometry dodala firma VTS Zlín. Příklad značení tenzometrů je dále vysvětlen na obrázku 25.



Obrázek 24: Upevnění polovodičového tenzometru na nástroji

Polovodičové tenzometry jsou vytvořené difuzí nečistot do tenké vrstvy (15 μ m) čistého křemíku, případně germania. Deformací takto vytvořených rezistorů se mění výrazně pohyblivost nosičů nábojů a tím i vodivost. Elektrické polovodičové tenzometry jsou založeny na piezorezistivním jevu tj. na změně elektrického odporu v závislosti na deformaci polovodičového krystalu (např. monokrystalu křemíku). Polovodiče mají schopnost měnit vodivost ve velmi širokém rozmezí (o 6 až 8 řádů). Polovodičové tenzometry jsou malé a citlivé, ale silně teplotně závislé.



Obrázek 25: Příklad značení tenzometrů [19]

Polovodičové tenzometry jsou vyráběny nejprve mechanickým oddělováním (řezáním) z patřičně dotovaného monokrystalu křemíku, dále mechanickým opracováním směřujícím k žádanému tvaru a rozměrům a nakonec chemickým opracováním. Monokrystalu křemíku jsou nejčastěji dotovány bórem nebo aluminím a vykazují vodivost typu P. Součinitel deformační citlivosti těchto typů bývá okolo $C1 = 130$. Méně vhodné pro měřicí účely jsou tenzometry s dotací fosforu či antimonu vykazující vodivost typu N a součinitel deformační citlivosti bývá kolem $C1 = -110$.

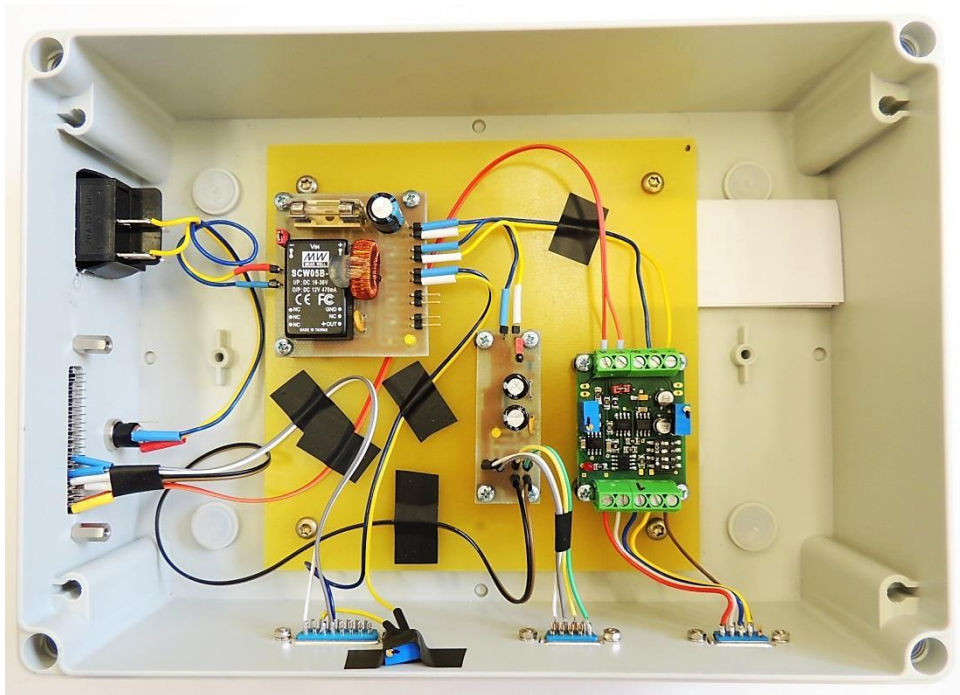
Aktivní délka polovodičových pásků mezi zlatými vývody je 2 až 10 mm, šířka 0,2 až 0,4 mm a tloušťka 0,01 až 0,03 mm. Ohmický odpor polovodičového tenzometru může být 60 až 1000 Ohmů. Teoreticky lze tenzometry využívat v intervalu teplot -70 až 300 °C.

Předností polovodičových tenzometrů je vysoká citlivost – až 60x větší než u kovových tenzometrů, což umožňuje konstruovat snímače velmi malých rozměrů s vysokou tuhostí jejich měrných členů. Tím lze dosáhnout i širokého frekvenčního rozsahu měření od statických hodnot až do několika kilohertzů. Sloučená chyba kolem 0,5% je pro praxi většinou vyhovující. [18] [19]

3.2.2 Systém pro měření na experimentálním zařízení

Ve spolupráci s ČZU Praha byl vytvořen měřicí systém CharpyPlech, který je navržen pro provádění dynamických zkoušek plechů a jejich sledování. Získaná data se dále zpracovávají v programu MS Excel.

Systém se sestává z elektroniky, která je umístěna v plastové rozvodnici (viz. obr. 26), softwaru a tenzometrického deformačního členu. Pro záznam úhlu natočení kyvadla je použit úhlový potenciometr 2123A od firmy KISTLER.

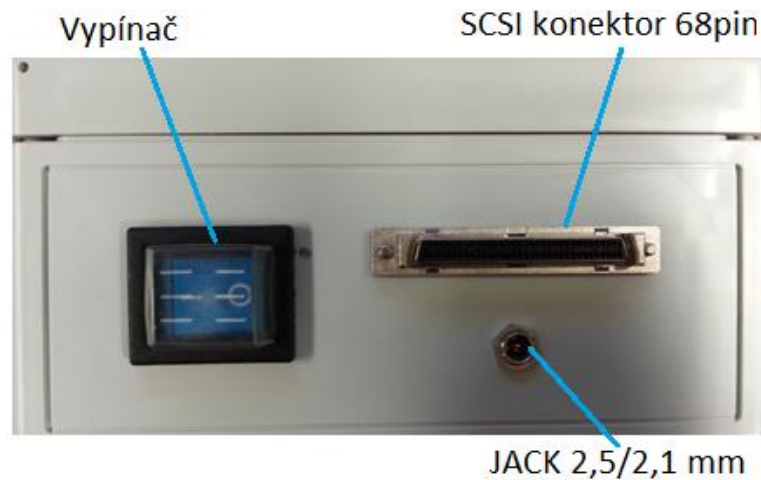


Obrázek 26: Elektronika měřicího systému

3.2.2.1 Hardware

Na obr. 27 je zobrazen detail bočního panelu, na kterém je napájecí konektor, vypínač a datový konektor pro připojení k měřicí kartě. Napájecí napětí zařízení je 24

V a je použit napájecí adapter model SYS1308-2424-W2E se stabilizovným výstupním napětím 24 V a proudem 1 A.



Obrázek 27: Detail bočního panelu

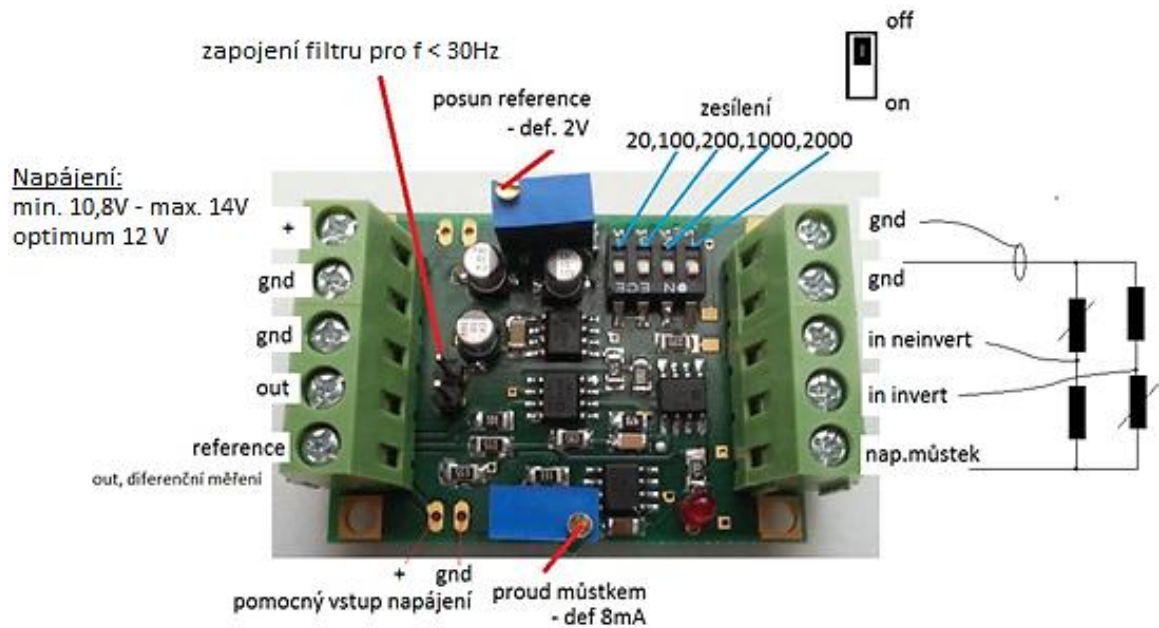
Na obrázku 28 je zobrazen detail panelu s konektory. Jsou použity 9-ti a 15ti pinové konektory Cannon. Analogový úhломěr je od firmy KISTLER typ 2123A. Deformačním člen je osazen plným tenzometrickým můstkem, kde bylo použito polovodičových tenzometrů (350 Ω) od firmy VTS Zlín. Převodník napětí z tenzometrického můstku je nastaven na zesílení 200x, avšak může být přepínán i na zesílení 100x. Napětí z převodníku je měřeno diferenčním vstupem měřicí karty.



Obrázek 28: Detail panelu s konektory

Na obrázku 29 je zobrazeno zapojení zesilovače a především možnosti přepínání zesílení. Zesílení je možné nastavit na 100x a 200x. Pokud se zesílení přepne,

tak je nutné přepnout i nastavení v aplikaci a uvažovat s jinou kalibrační křivkou, případně ji i vytvořit.



Obrázek 29: Zapojení zesilovače

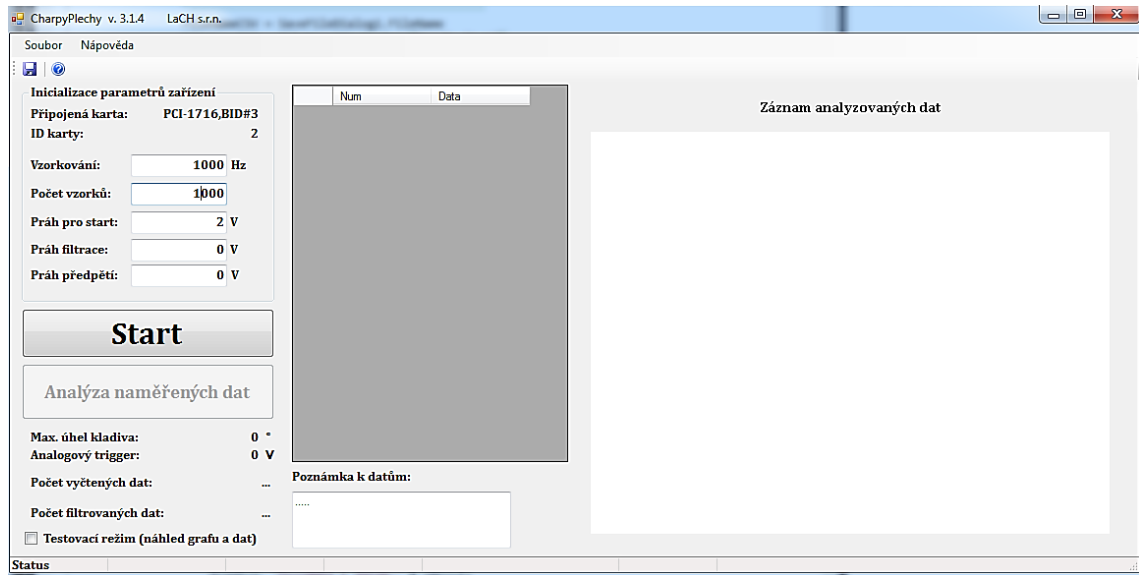
3.2.2.2 Software

Zde se již zaměřím přímo na uživatelské prostředí. Software je naprogramován pro obsluhu měřicí karty Advantech 1712L-AE (viz. obr. 30). Jedná se o vysokorychlostní multifunkční kartu pro sběrnici PCI se schopností samostatné kalibrace (AI/AO). Je vybavena 12-bitovým A/D převodníkem pro vzorkovací frekvenci až 1 MHz a FIFO vyrovnávací pamětí, která umožňuje zaznamenat až 1 024 vzorků pro AI a až 32 768 vzorků pro AO konverzi. [24]



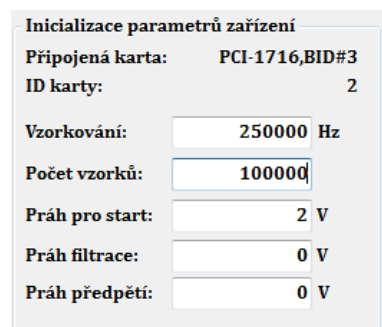
Obrázek 30: Měřicí karta Advantech 1712L-AE [24]

Na obrázku 31 je zobrazen screen obslužné aplikace. Hlavními částmi je oblast pro nastavení a spouštění měření, zobrazení dat a jejich ukládání. Pro jednoduchost obsluhy je každá položka doplněna ToolTipTextem pro nápovědu.



Obrázek 31: Screen aplikace – uživatelské prostředí

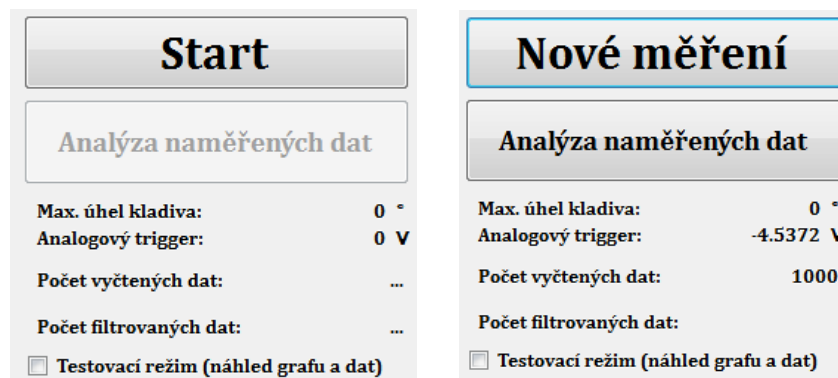
Inicializací parametrů měření (viz. obr. 32) je myšleno nastavení vzorkování a počtu měřených dat. Spouštění měření je podmíněno dosažením předdefinovaného úhlu úhloměru, který se může lišit podle použitého nástroje, toto nastavení je definováno položkou „Práh pro start“. Položka „Práh filtrace“ slouží k odfiltrování dat, ve kterých nedochází ke změnám měřené veličiny. „Práh předpětí“ slouží k posunutí hodnot měřené veličiny o definované napětí.



Obrázek 32: Detail nastavení měření

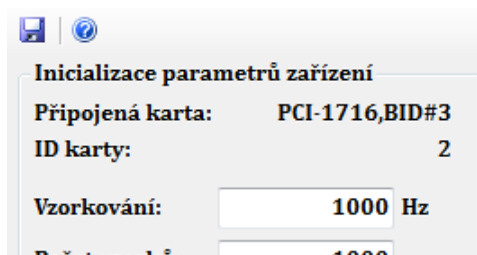
Po stisku tlačítka Start dojde k iniciaci měření (viz. obr. 33). Vlastní měření se spouští dosažením úrovně úhloměru „Práh pro start“. „Maximální zvednutí/úhel kladiva“ je definován výškou spuštění nástroje při měření a používá se pro výpočet

energie. „Analogový trigger“ zobrazuje aktuální napětí na úhloměru pro možné nastavení prahu pro start. Položka „Počet vyčtených dat“ znamená celková vyčtená data během měření, při vysokých vzorkovacích frekvencích se může lišit od nastaveného počtu dat. „Počet filtrovaných dat“ je závislý na aplikaci filtrace, která se uplatňuje stisknutím tlačítka pro analýzu naměřených dat a lze ji provádět opakovaně. Nové měření se spouští stisknutím tlačítka nového měření. Před dalším měřením se program zeptá, zda jsou data uložena, aby nedošlo k jejich ztrátě.



Obrázek 33: Spouštění aplikace

Ukládání měření je možné provádět stisknutím tlačítka pro uložení (symbol diskety) nebo v menu Soubor/Uložit. Při ukládání je možné si vybrat název souboru. Ukládají se dva soubory, jeden s vlastními daty a druhý s detaily o uložených datech. Dále je možné v programu vyplnit položku „Poznámka k datům“ a ta bude přiložena v detailech o uložených datech. Uložená data jsou ve formátu *.csv, které je možné otevřít v programech MS Excel, MATLAB, Scilab atd. (viz. obr. 34).



Obrázek 34: Ukládání naměřených dat

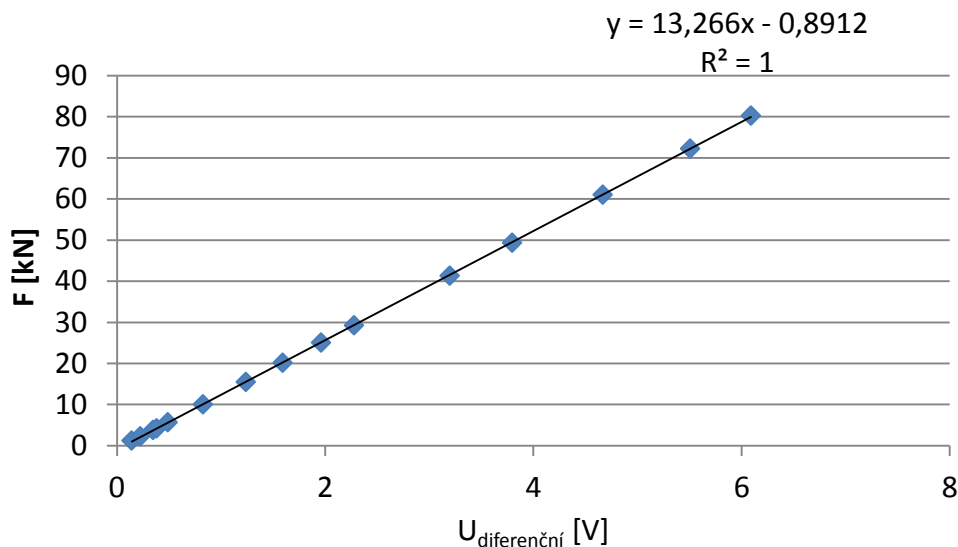
Text v souboru s detaily k uloženým datům obsahuje všechny zadané a změřené parametry, spolu s časem uložení dat a počítačem, který data uložil (viz. obr. 35).

```
Uložení dat CharpyPlech: 05-20-2015 09:09:52
-----
Soubor s daty:
C:\Users\linda\Desktop\pokus123456789.csv
-----
Parametry
Vzorkovací frekvence: 1000 Hz
Počet změřených vzorků: 1000 hodnot
Počet platných vzorků: 74 hodnot
Práh předpětí: 0 V
Práh filtrace: 0 V
Výška kladiva - analog: 0 V
Výška kladiva - úhel: 0 °
-----
Připojená karta: PCI-1716,BID#3 °
ID karty: 2 °
-----
Formát dat:
Číslo vzorku ; Napětí (V) ; Síla (N)
-----
Poznámka k datům:
.....
Uložil: linda_PC2
Uložil IP: 10.31.0.120
-----
LaCH s.r.o.
linda@tf.czu.cz, choteborsky@tf.czu.cz
2015
```

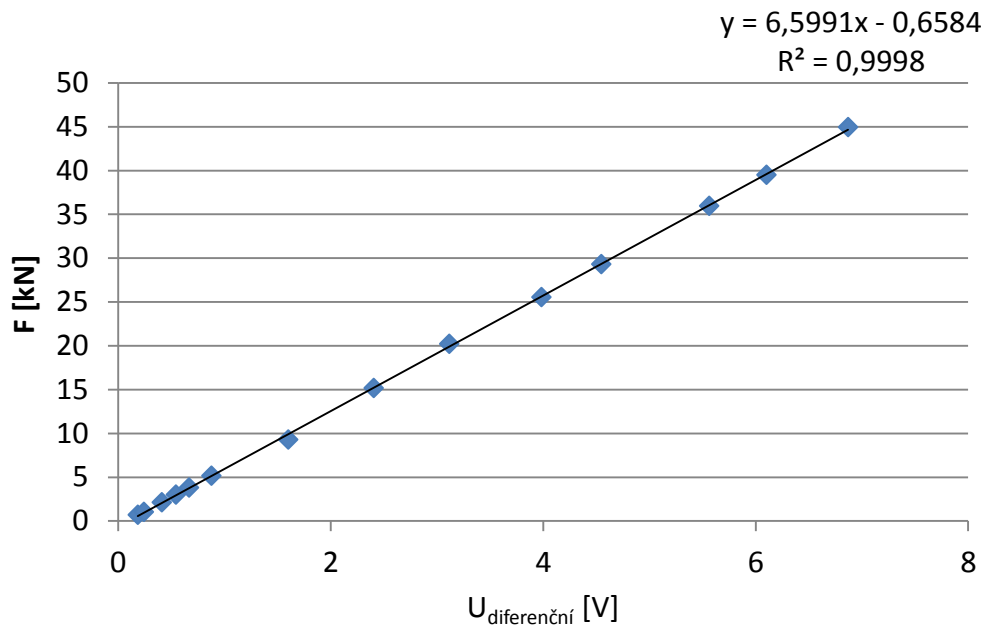
Obrázek 35: Příklad detailu k datům

3.2.2.3 Kalibrace

Kalibrace byla provedena pro tenzometrický snímač na mechanické zkušební stroji LabTest 5.100SP1, který se používá pro zkoušky tahem a tlakem. Kalibrace byla prováděna tak, že mezi tlakovými čelistmi byl deformován nástroj a byla vyhodnocována data z tenzometru. Z naměřených hodnot zatěžující síly a vytvořeného napětí byly vytvořeny kalibrační křivky (viz. obr. 36 a obr. 37) a převodní charakteristika, jež je implementována v programu.



Obrázek 36: Kalibrace při zesílení 100x



Obrázek 37: Kalibrace při zesílení 200x

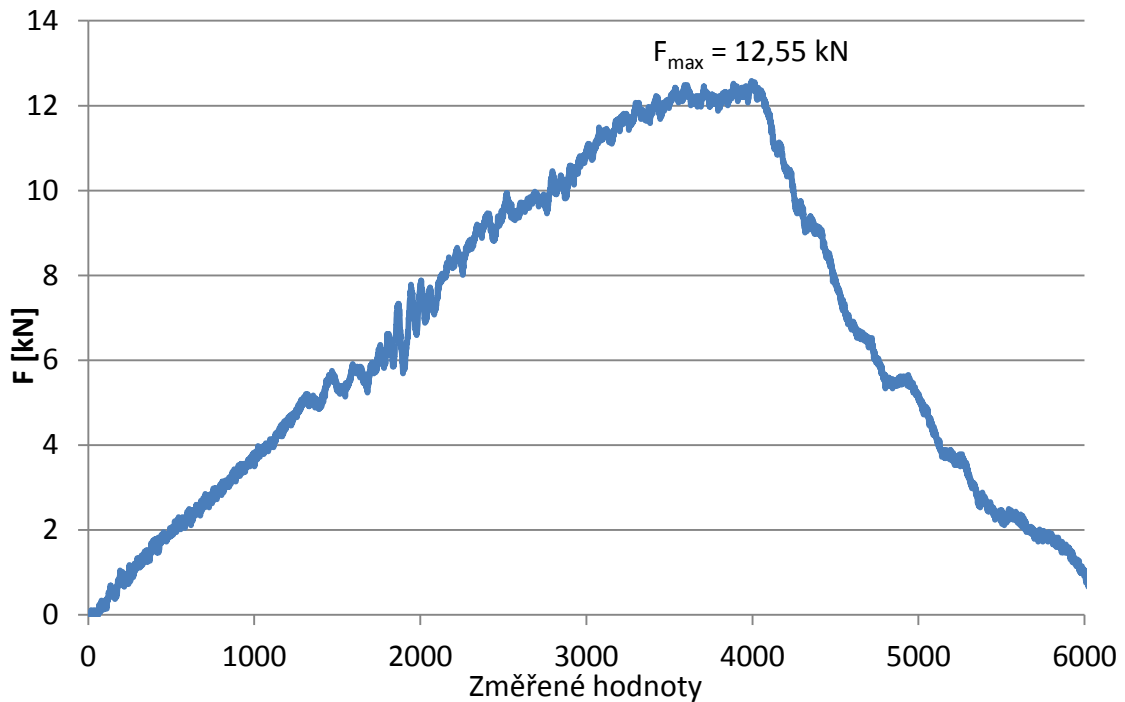
3.2.3 Testovací měření snímače síly

Po úspěšné instalaci snímače síly na nástroj (viz. obr. 24) a kalibraci, bylo provedeno testovací měření na experimentálním zařízení. Výsledkem měření je hodnota napětí U [V], které je programem přepočítáno na výslednou deformační sílu F [kN]. Přepočet napětí na sílu je prováděn vztahem:

$$F = 6,5991 \cdot U - 0,6584 \quad [\text{kN}]$$

Parametry testovacího měření:

Přístřih -	pásek 50 mm
Tloušťka plechu -	0,7 mm
Materiál -	DC06
Vzorkovací frekvence -	200 kHz
Výška kladiva – úhel -	34,16°
Zesílení -	200x



Obrázek 38: Graf průběhu deformační síly při testovacím měření snímače

Z průběhu deformační síly během testovacího měření (viz. obr. 38) je patrné, že test proběhl úspěšně. Při dosažení maximální deformační síly 12,55 kN došlo k vyčerpání plasticity materiálu a došlo k deformaci zkušebního vzorku. Tímto testem se ověřily schopnosti snímacího systému a softwaru. Experimentální zařízení je tedy připraveno k měření.

3.3 3D skenování nástrojů

Optické měřicí systémy se ve strojírenství začaly ve velké míře využívat teprve na sklonku 90. let. V posledních letech vývoje však jejich využití zejména v automobilovém průmyslu neustále roste.

Práce na měření součásti je zejména u tvarových ploch nesrovnatelně rychlejší. Oproti bodovým dotykovým systémům snímá skener naráz celou plochu a umožňuje sejmutá data ukládat do různých formátů. Moderní systémy dnes umožňují získat z oskenovaných dat řezy nebo obrysové a kontrastní křivky pomocí mraku bodů, tvarové plochy součásti exportovat do formátu STL, vyhodnotit odchylky v souřadnicově zadaných bodech nebo přímo generovat barevnou mapu odchylek do CAD dat.

Ve spolupráci s automobilkou Škoda Auto, a.s. bylo provedeno skenování nástrojů, které bylo provedeno dvěma způsoby. První na optickém 3D skeneru ATOS od firmy GOM a druhé s ručním 3D laserovým skenovacím zařízením Steinbichler T-Scan od firmy NMS.

Bylo provedeno skenování tažníku, přídržovače a obou částí dělené hlavy. Všechny nástroje byly před skenováním polepeny nekódovanými referenčními body (viz. obr. 40), které slouží pro získání 3D souřadnic měřeného objektu. Pro získání 3D souřadnice nekódovaného bodu musí být tento bod viděn minimálně na třech po sobě jdoucích snímcích. [20]



Obr. 40: Půlkulový tažník polepený referenčními body

Naskenovaná data budou v budoucnosti využita pro vytvoření simulací tvářecího procesu s modely nástrojů přesných rozměrů. Při simulacích se dá jednoduše ověřit schopnost výrobního procesu a případně provádět jeho optimalizace.

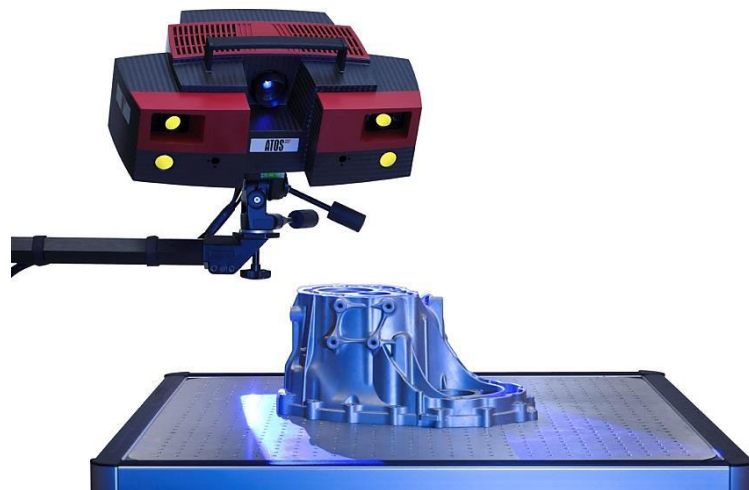
3.3.1 Skenování na optickém 3D skeneru

Jako první bylo provedeno skenování na optickém 3D skeneru ATOS Scan Box 6130 (viz. obr. 41). ATOS (Advanced Topometric Sensor) je mobilní bezkontaktní 3D digitalizační systém firmy GOM, který přímo při procesu snímání vykresluje povrch tělesa v podobě mraku bodů. Proces digitalizace je velmi rychlý, přesný a dynamický s vysokou hustotou naměřených dat. Nasnímaná data jsou poté upravena softwarem ATOS. Naměřené body jsou transformovány na tzv. polygonální síť, která se uloží jako přenosový CAD formát STL. [20]



Obrázek 41: ATOS Scan box 6130 [21]

ATOS ScanBox je vyráběn jako uzavřená přemístitelná buňka. Jedná se o plně automatizované průmyslové měřicí pracoviště pro 3D digitalizaci a inspekci. Nabízí celoplošná povrchová měření od malých dílů až po velké, přehlednou prezentaci výsledků, jednoduché vyhledávání problémů a úplný systém protokolů. Komplexní řešení typu plug&play zahrnuje vše potřebné pro automatizovanou digitalizaci a inspekci.



Obrázek 42: Optický 3D skener ATOS Triple Scan [21]

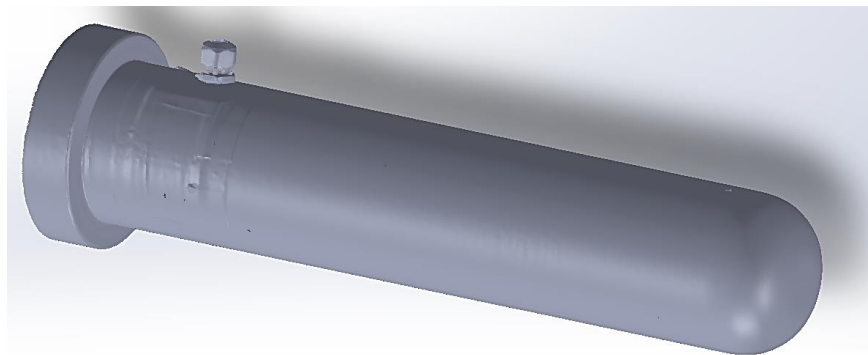
Skenovacím zařízením je 3D optický skener ATOS Triple Scan (viz. obr. 42) s novou technologií modrého světla a integrovanou fotogrammetrií, který byl vyvíjen s ohledem na požadavky průmyslového použití a speciálně uzpůsoben pro

automatizovaná měření. Tato nová technologie umožňuje ještě detailnější zachycení tvaru povrchu při kratší době měření různých velikostí dílu, povrchových úprav a geometrie, a to bez ohledu na okolní osvětlení. Měření je velmi rychlé a produktivní, s přesnými a komplexními výsledky, což je v porovnání se standardními souřadnicovými systémy CMM jeho nespornou výhodou.

Dalšími komponenty jsou robot (vybraný podle optimálního dosahu, nosnosti a možnosti skrytého vedení kabeláže), rotační stůl a ovládací pult. Celý stroj řídí jediný společný software ATOS Professional od firmy GOM. Tento softwarový balíček generuje přesná data o 3D povrchu, provádí jejich úpravu a následné zpracování a také nabízí úplnou inspekci včetně tvorby protokolů. [21]

3.3.1.1 Výsledky skenování na optickém 3D skeneru

Na obrázku 43 je zobrazen výstup ze skenování, v tomto případě půlkulového tažníku, který může být dále zpracováván v CAD softwaru nebo použit pro vytvoření simulace tvářecího procesu. Obrázky zbylých dílů naskenovaných 3D optickým skenerem ATOS jsou uvedeny v příloze.



Obrázek 43: Půlkulový tažník naskenovaný optickým 3D skenerem

3.3.2 Skenování s ručním 3D laserovým skenerem

Druhé skenování proběhlo s ručním 3D laserovým skenerem Steinbichler T-Scan CS (viz. obr. 44). Princip laserového skenování spočívá ve vysílání intenzivního modulovaného signálu laserovou diodou, kdy se měří změna fáze mezi vysílaným a přijímaným signálem. Výhodou laserového skenování oproti optickému je přesnost měření a jednoduchost, naopak nevýhodou je nutnost použití složitých přípravků.

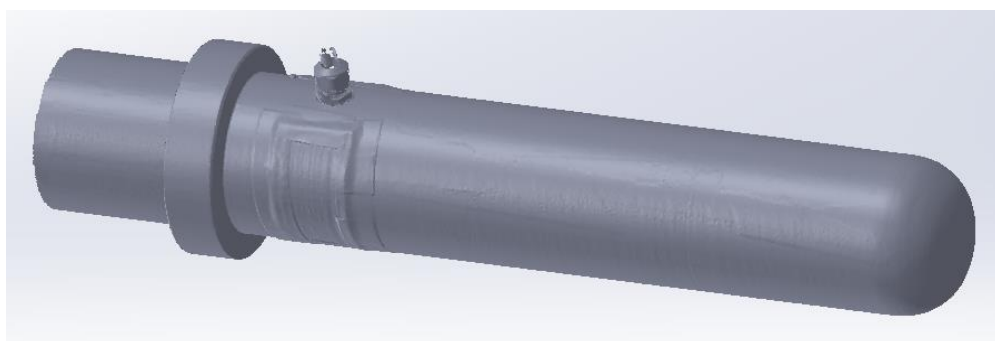


Obrázek 44: Ruční laserový 3D skener Steinbichler T-Scan CS [22]

Skener umožňuje rychlé, intuitivní a velmi přesné 3D skenování. Modulární koncepce řešení „všechno-v-jednom“ (sledovací kamera, ruční skener a dotyková sonda) nabízí maximální flexibilitu. Mezi hlavní přednosti patří velmi vysoký dynamický rozsah senzoru pro sběr dat na různých druzích povrchů a rychlost čtení dat. [22]

3.3.2.1 Výsledky skenování s ručním 3D laserovým skenerem

Na obrázku 45 je zobrazen výsledek skenování půlkulového tažníku po ručním skenování s 3D laserovým skenerem v CAD softwaru. Obrázky ze skenování zbylých dílů je možno vidět opět v příloze.



Obrázek 45: Půlkulový tažník naskenovaný laserovým skenerem

3.4 Měření na experimentálním zařízení

Po osazení nástroje novým snímačem síly a vytvoření softwaru pro zaznamenávání průběhu měření byly provedeny testovací měření na 3 různých typech materiálu – oceli DC06, Docol 1200 a korozivzdorné oceli 17 241 (viz. kap. 3.7). Byly použity dvě různé hodnoty zesílení a byly použity dva různé tvary přístřihů zkušebních vzorků, obdélníkové pásky o šířce 50 mm a plné kruhové přístřihy o průměru 200 mm.

Další provedená měření měla za úkol sledovat změnu chování tvářeného materiálu při různých nastaveních úhlu kladiva a tím pádem i při různých rychlostech deformace.

3.4.1 Měření deformace při různých hodnotách zesílení

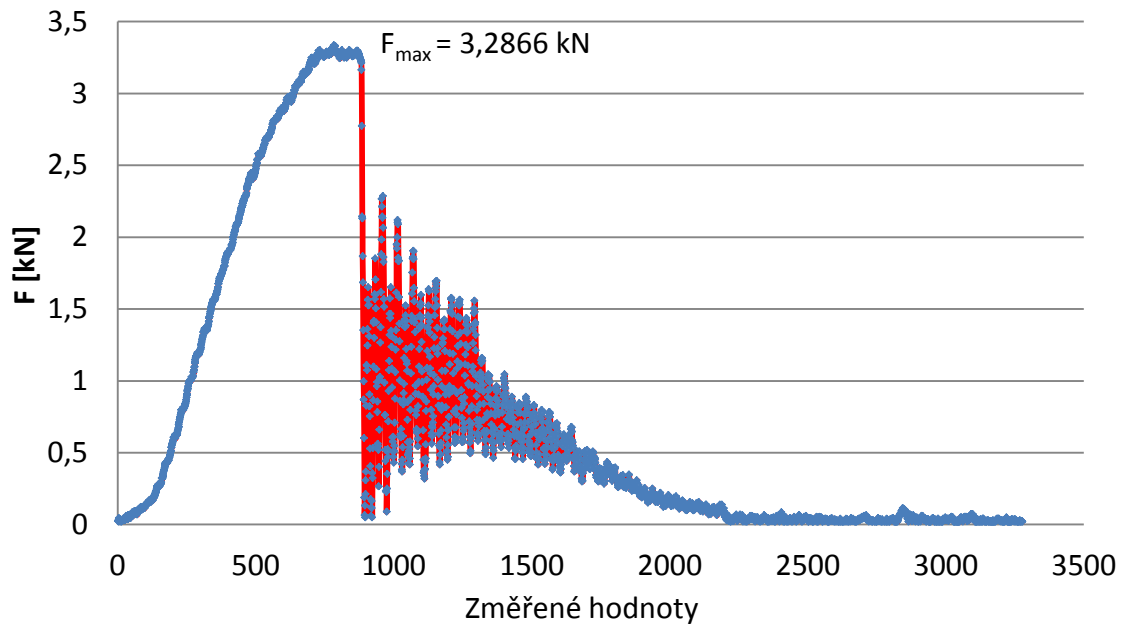
Pro určení optimálního nastavení systému bylo provedeno celkem 9 měření. Dvě měření proběhla při hodnotě zesílení 100x a sedm měření při hodnotě zesílení 200x. Jednotlivá měření jsou dále podrobněji popsána.

3.4.1.1 Průběh zkoušek při zesílení 100x

Měření č. 1

Parametry měření:

Přístřih -	kruhový, \varnothing 200 mm
Tloušťka plechu -	0,7 mm
Materiál -	Docol 1200
Vzorkovací frekvence -	100 kHz
Práh předpětí -	1,2 V



Obrázek 46: Měření průběhu deformační síly při frekvenci 100 kHz, materiál Docol 1200



Obrázek 47: Zkušební vzorek po provedení měření č. 1, materiál Docol 1200

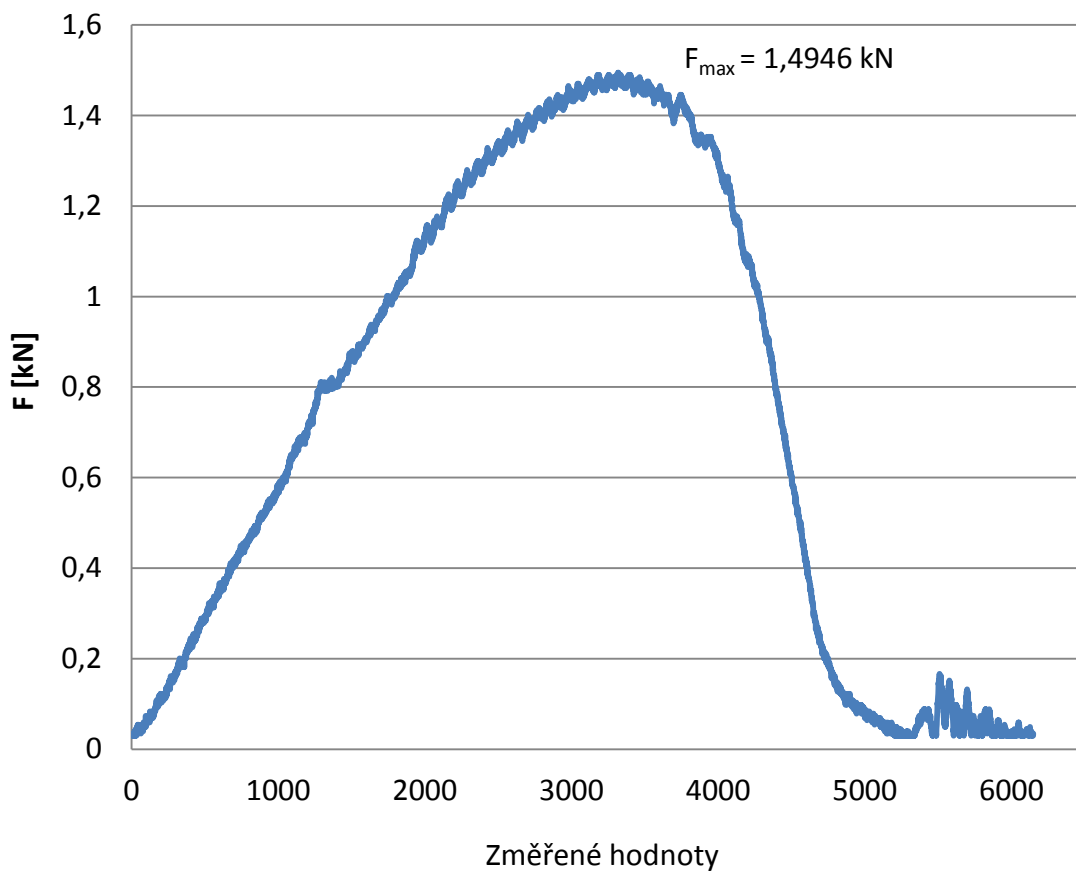
Během tohoto měření program zaznamenal 3 278 hodnot, ze kterých byl sestrojen graf průběhu deformační síly (viz. obr. 46). Na obrázku 47 je fotografie vzorku po provedení experimentu, kde je patrné, že došlo k vyčerpání plasticity materiálu a vzniku trhliny. Při tomto měření mohlo dojít k ovlivnění naměřených dat z důvodu vnitřního pnutí v materiálu. Při zkoušce došlo ke vzniku trhliny a nahromadění vnitřní energie v materiálu, které vyústilo v další šíření trhliny během uvolňování vzorku z přípravku. Maximální deformační síla při tomto experimentu dosáhla hodnoty 3,2866 kN.

Z průběhu deformační síly na obrázku 46 je ovšem také vidět, že po protržení zkušebního tělesa proběhl děj tak rychle, že snímač při tomto nastavení vzorkovací frekvence nedokázal zachytit plynulý průběh zkoušky. Dále je zachycen šum, který znemožňuje úplné vyhodnocení zkoušky. Z tohoto důvodu bude následující měření provedeno s nastavením vzorkovací frekvence 250 kHz.

Měření č. 2

Parametry měření:

Přístřih -	kruhový, $\varnothing 200$ mm
Tloušťka plechu -	0,7 mm
Materiál -	DC06
Vzorkovací frekvence -	250 kHz
Práh předpětí -	1,2 V



Obrázek 48: Měření průběhu deformační síly při frekvenci 250 kHz, materiál DC06



Obrázek 49: Zkušební vzorek po provedení měření č. 2, materiál DC06

Vzorkovací frekvence byla při tomto měření nastavena na hodnotu 250 kHz a program zaznamenal 6 149 hodnot a úplný průběh zkoušky. Lze tedy konstatovat, že díky nastavení vzorkovací frekvence na tuto hodnotu jsme získali (během stejného časového intervalu průběhu zkoušky) oproti měření č. 1 (vzorkovací frekvence 100 kHz) přesnější výsledky průběhu měření a toto nastavení se osvědčilo.

Z naměřených hodnot byl opět sestaven graf průběhu deformační síly (viz. obr. 48). jejíž maximální hodnota dosáhla 1,4946 kN. Při tomto experimentu nedošlo k úplnému vyčerpání plasticity materiálu a tím pádem ani k defektu zkušebního vzorku (viz. obr. 49).

3.4.1.2 Průběh zkoušek při zesílení 200x

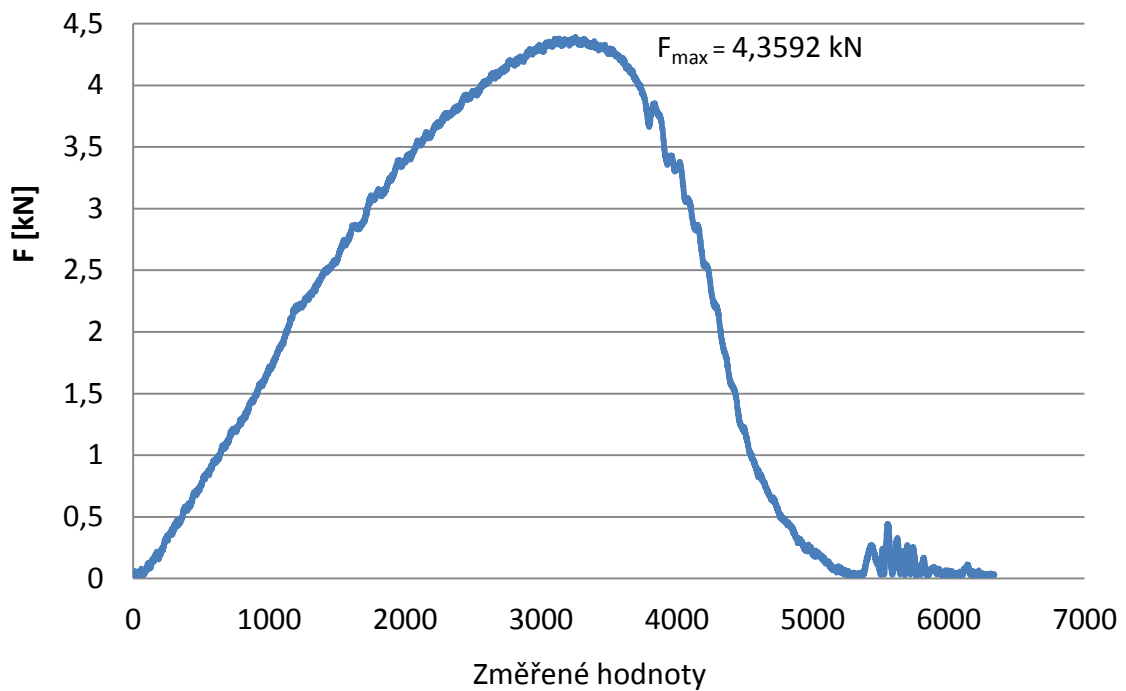
Jelikož nastavením vzorkovacím frekvence na hodnotu 250 kHz získáme přesnější výsledky a hlavně přesný průběh měření, budou všechny další experimenty probíhat s tímto nastavením.

Měření č. 3

Parametry měření:

Přístřih -	kruhový, Ø200 mm
Tloušťka plechu -	0,7 mm

Materiál - DC06
Práh předpětí - 1,3 V



Obrázek 50: Průběh deformační síly při měření č. 3, materiál DC06



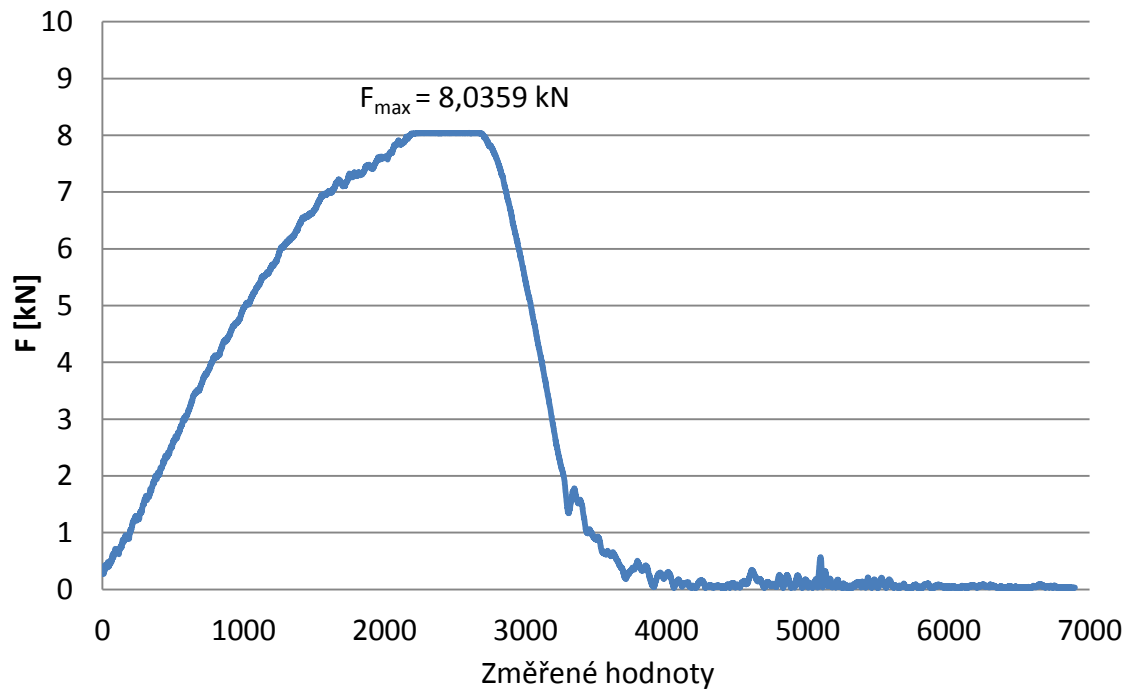
Obrázek 51: Zkušební vzorek po provedení měření č. 3, materiál DC06

Jak je vidět na obrázku 51, při tomto měření již došlo k úplnému vyčerpání plasticity materiálu a na zkušebním vzorku vznikla trhlina. Deformační síla při vzniku trhliny dosáhla hodnoty 4,3592 kN (viz. obr. 50).

Měření č. 4

Parametry měření:

Přístřih -	kruhový, $\varnothing 200$ mm
Tloušťka plechu -	1 mm
Materiál -	Docol 1200
Práh předpětí -	1,3 V



Obrázek 52: Průběh deformační síly při měření č. 4, materiál Docol 1200



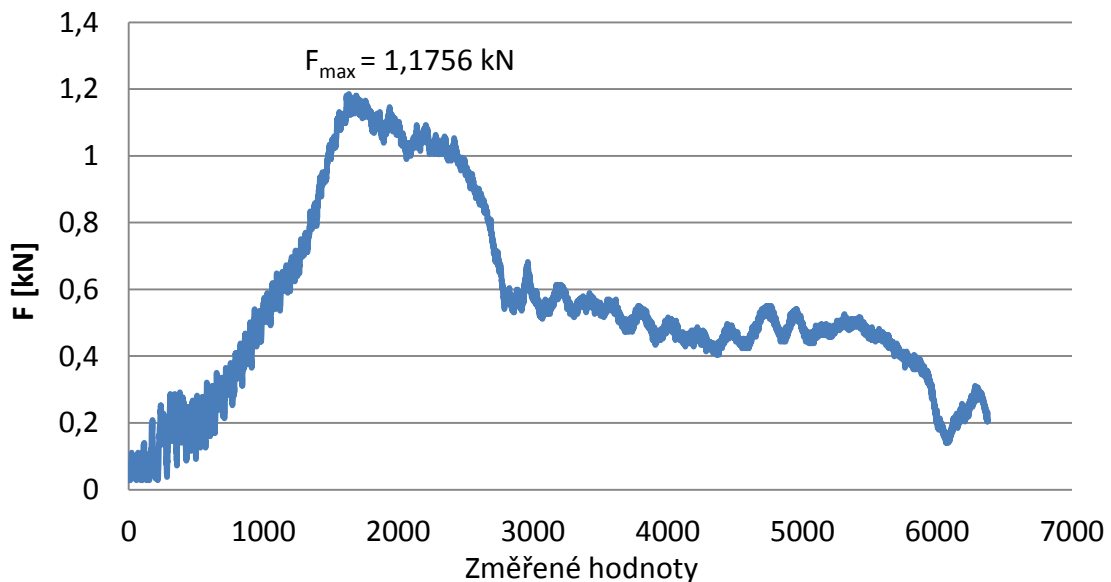
Obrázek 53: Zkušební vzorek po provedení měření č. 4, materiál Docol 1200

Z obrázku 53, na kterém je zkušební vzorek po provedení experimentu, je patrné, že nedošlo ke vzniku trhliny. Maximální deformační síla dosáhla hodnoty 8,0359 kN (viz. obr. 52). S ohledem na velikost dosažené deformační síly a velikost protažení zkušebního vzorku se tento materiál zdá nevhodným pro naše účely, tedy pro technologii hlubokého tažení.

Měření č. 5

Parametry měření:

Přístřih -	pásek 50 mm
Tloušťka plechu -	1 mm
Materiál -	Docol 1200
Práh předpětí -	1,3 V



Obrázek 54: Průběh deformační síly při měření č. 5, materiál Docol 1200



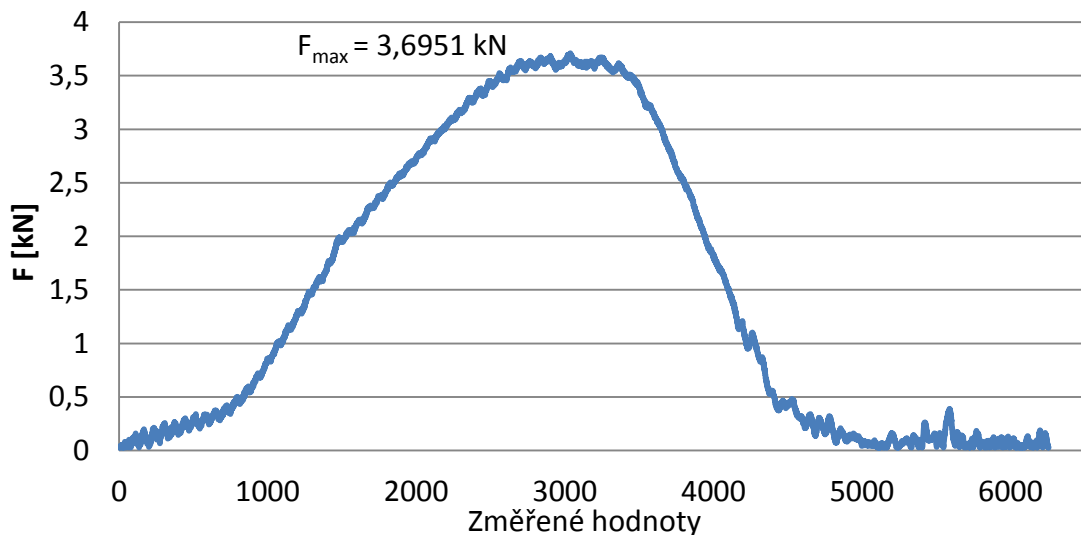
Obrázek 55: Zkušební vzorek po provedení měření č. 5, materiál Docol 1200

Při tomto měření nedošlo k dostatečnému uchycení vzorku v přidržovači a nástroj prošel tažnicí. To mohlo být způsobeno např. nevystředěním přístřihu, nedostatečným utahovacím momentem, popř. špatným rozměrem přístřihu. Zároveň při tomto měření bylo poškozeno uchycení tenzometru.

Měření č. 6

Parametry měření:

Přístřih -	kruhový, Ø200 mm
Tloušťka plechu -	1,35 mm
Materiál -	korozivzdorná ocel 17 241
Práh předpětí -	1,3 V



Obrázek 56: Průběh deformační síly při měření č. 6, materiál 17 241



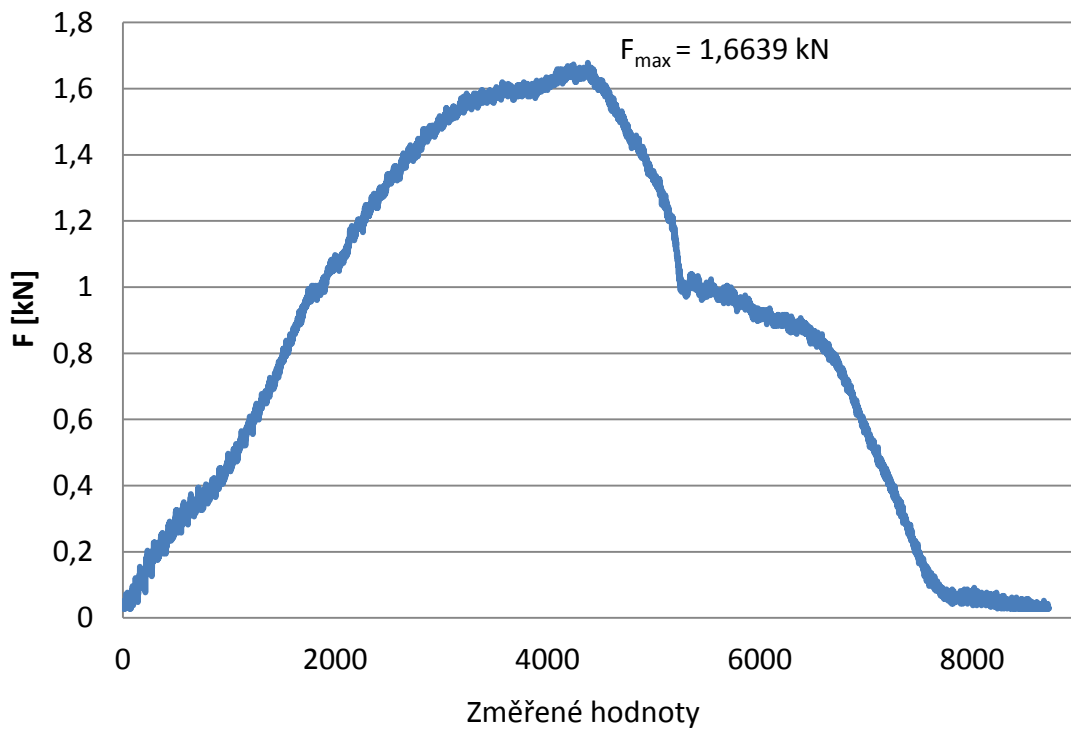
Obrázek 57: Zkušební vzorek po provedení měření č. 6, materiál 17 241

První experiment, který proběhl na zkušebním vzorku z korozivzdorné oceli 17 241. Z obrázku 57 je patrné, že při tomto měření nedošlo k vytvoření defektu materiálu a maximální deformační síla dosáhla hodnoty 3,6951 kN (viz. obr. 56).

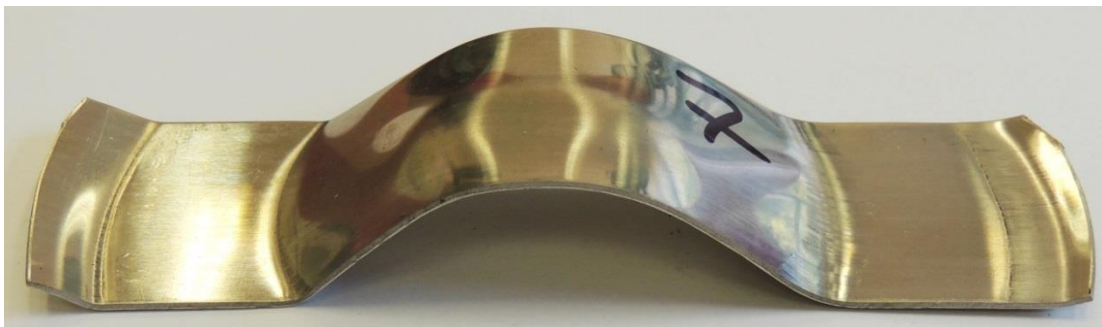
Měření č. 7

Parametry měření:

Přístřih -	pásek 50 mm
Tloušťka plechu -	1,35 mm
Materiál -	korozivzdorná ocel 17 241
Práh předpětí -	1,3 V



Obrázek 58: Průběh deformační síly při měření č. 7, materiál 17 241



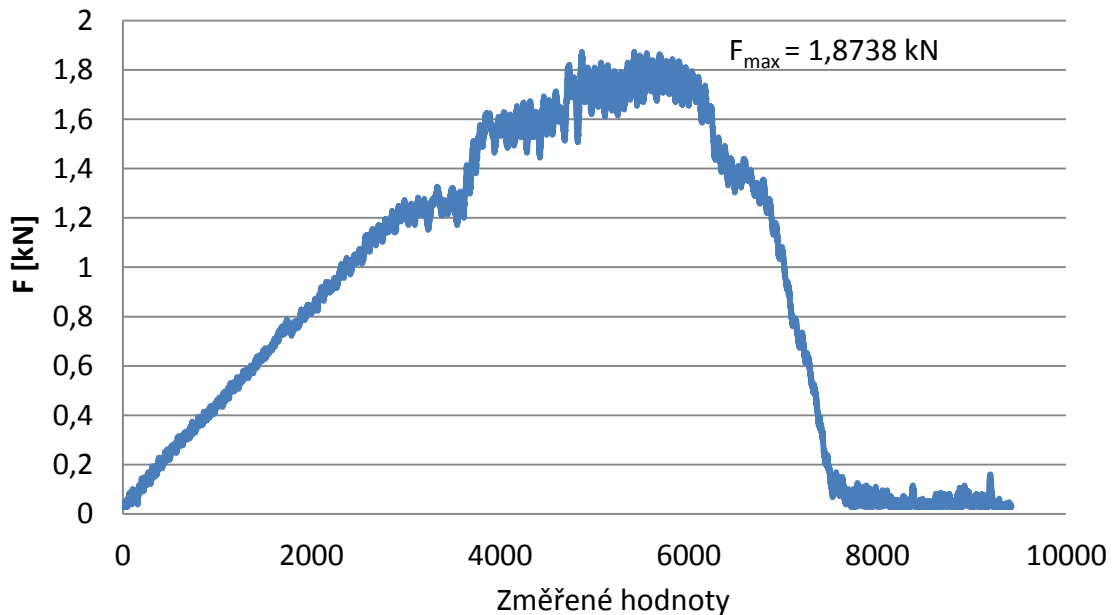
Obrázek 59: Zkušební vzorek po provedení měření č. 7, materiál 17 241

Ani v tomto případě při použití jiného tvaru přístřihu z korozivzdorné oceli (viz. obr. 59) nedošlo během experimentu k iniciaci trhliny ve zkušebním vzorku. Z grafu průběhu deformační síly (viz. obr. 58) je vidět, že bylo dosaženo maximální deformační síly 1,6639 kN.

Měření č. 8

Parametry měření:

Přístřih -	pásek 50 mm
Tloušťka plechu -	0,7 mm
Materiál -	DC06
Práh předpětí -	1,3 V



Obrázek 60: Průběh deformační síly při měření č. 8, materiál DC06



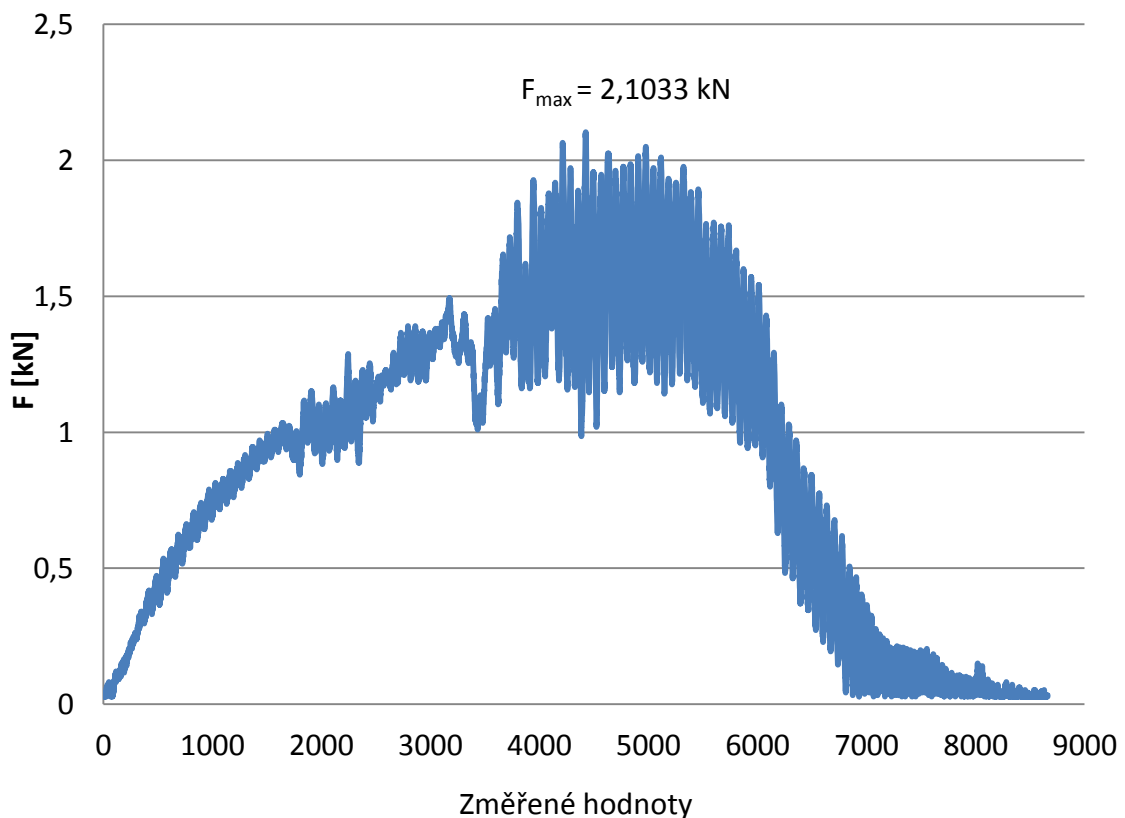
Obrázek 61: Zkušební vzorek po provedení měření č. 8, materiál DC06

Maximální dosažená deformační síla při tomto měření dosáhla hodnoty 1,8738 kN (viz. obr. 60). Zároveň je z grafu průběhu síly vidět jemné rozkmitání průběhu měření. To bylo pravděpodobně způsobeno nedostatečným upnutím vzorku v přidržovači, kdy při nárazu nástroje do zkušebního vzorku došlo k jeho proklouznutí v přidržovači. Jak je vidět z obrázku 61, při tomto měření také nedošlo k porušení zkušebního vzorku.

Měření č. 9

Parametry měření:

Přístřih -	pásek 50 mm
Tloušťka plechu -	0,7 mm
Materiál -	Docol 1200
Práh předpětí -	1,3 V



Obrázek 62: Průběh deformační síly při měření č. 9, materiál Docol 1200

Maximální dosažená deformační síla při tomto měření byla zaznamenána 2,1033 kN (viz. obr. 62). Z obrázku 63 je patrné, že ani v tomto případě nedošlo k vyčerpání plasticity zkušebního vzorku a tím pádem ani k jeho defektu. Navíc

pravděpodobně během měření opět došlo k proklouznutí vzorku v přídržovači, a proto je průběh deformační síly tolik rozkmitaný.



Obrázek 63: Zkušební vzorek po provedení měření č. 9, materiál Docol 1200

3.4.1.3 Vyhodnocení provedených měření

Během těchto měření byla úspěšně otestována funkce nového snímače síly – polovodičového tenzometru i programu pro zaznamenávání průběhu měření. Během prvních dvou měření byl porovnáván průběh zkoušky a jeho zaznamenávání při dvou různých nastavení vzorkovací frekvence.

Při měření č. 1 byla nastavena vzorkovací frekvence na hodnotu 100 kHz a po proražení zkušebního tělesa probíhal děj tak rychle, že snímač při tomto nastavení nedokázal zachytit plynulý průběh zkoušky. Druhé měření proběhlo při nastavení 250 kHz a program zaznamenal oproti 100 kHz nastavení během stejného časového intervalu téměř dvojnásobek naměřených dat a úplný průběh zkoušky. Takto nastavená hodnota vzorkovací frekvence se tedy osvědčila a ostatní měření probíhaly s tímto nastavením.

Dalším důležitým poznatkem z provedených měření pro získání bezchybného průběhu experimentu je důkladné upnutí zkušebního vzorku do přídržovače, jelikož jak se ukázalo u měření č. 5, 8 a 9, při nedostatečném upnutí vzorku může během zkoušky dojít k jeho proklouznutí v přídržovači a výsledná data tak jsou výrazně ovlivněna.

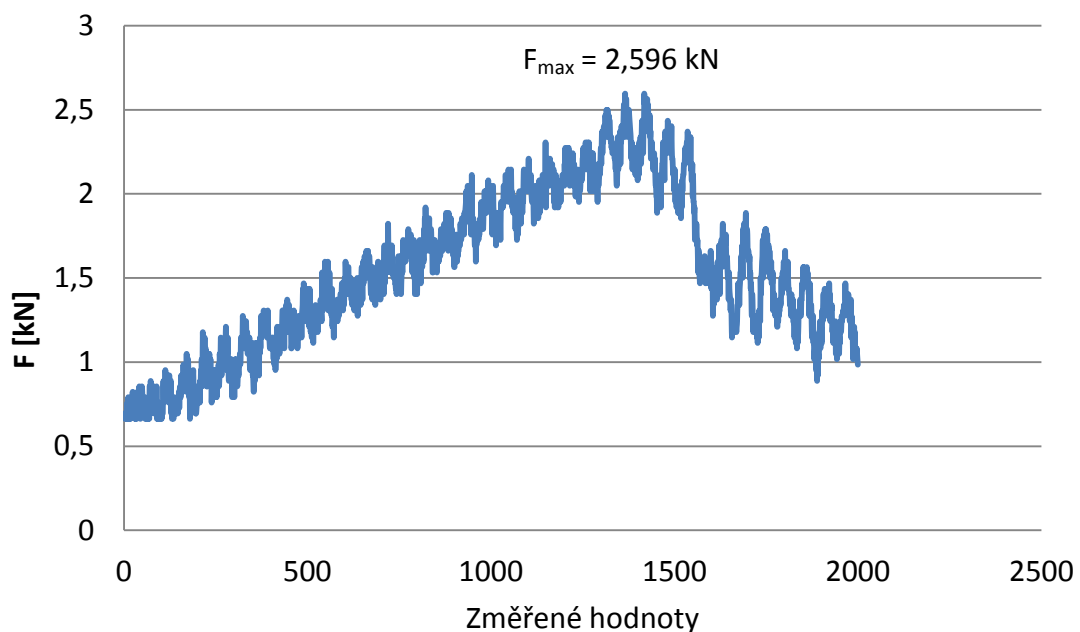
3.4.2 Měření deformace při různých úhlech nástroje

V této kapitole popíší další měření provedená na experimentálním zařízení, kdy bylo sledováno chování zkoušeného materiálu pro různá nastavení úhlu kladiva. Pro toto měření byly použity jednotně vzorky z oceli DC06, šarže H, ze kterých byly nastříhány zkušební pásy o šířce 50 mm. Tloušťka plechu byla 0,7 mm.

Jednotné parametry pro všechna následující měření:

Přístřih -	pásek 50 mm
Tloušťka plechu -	0,7 mm
Materiál -	DC06
Vzorkovací frekvence -	200 kHz
Počet změřených vzorků -	50 000 hodnot
Práh předpětí -	0 V
Práh filtrace -	0,65 V
Práh pro start -	5°
Práh předpětí -	0 V
Zesílení -	200x

3.4.2.1 Průběh zkoušky při úhlu 34°



Obrázek 64: Průběh deformační síly při úhlu kladiva 34°



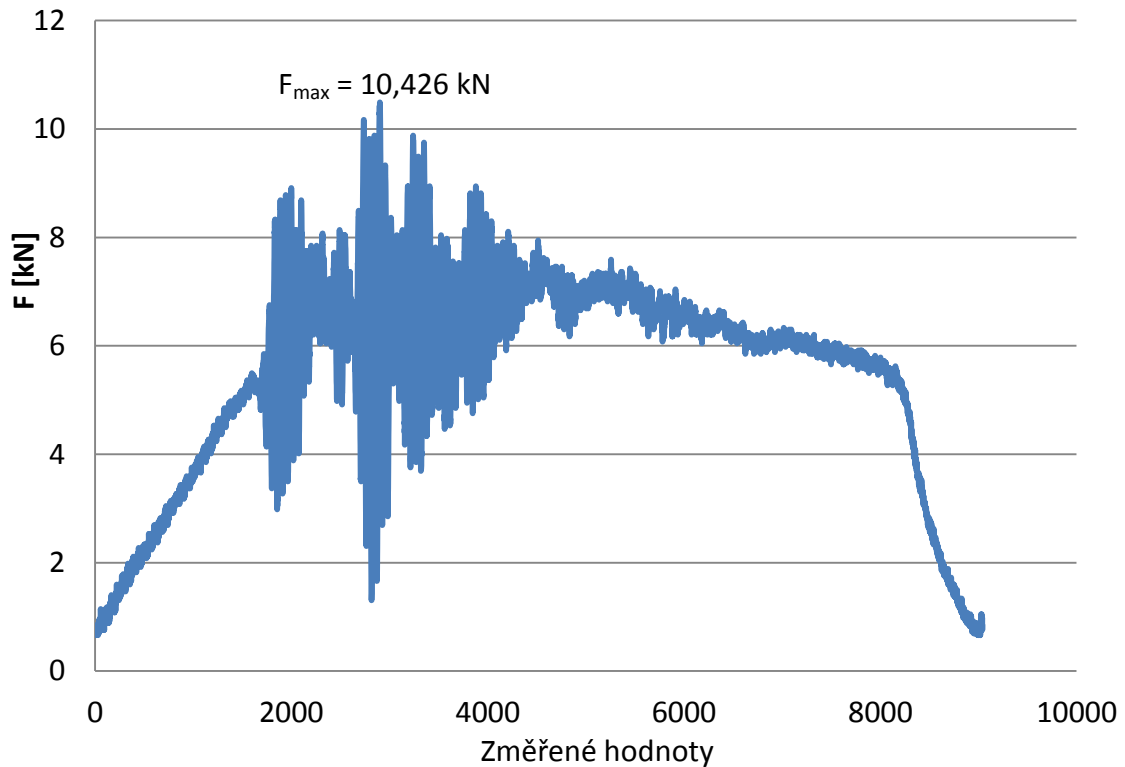
Obrázek 65: Zkušební vzorek po provedení zkoušky (úhel 34°)

Výsledky tohoto měření jsou ovlivněny nedostatečným upnutím vzorku v přidržovači, kdy došlo k jeho proklouznutí (viz. obr. 66) a bylo dosaženo pouze maximální deformační síly 2,6 kN (viz. obr. 64). Na obrázku 65 je vzhled vzorku po provedení zkoušky, při které nedošlo k jeho porušení.



Obrázek 66: Uvolněný zkušební vzorek v přidržovači po provedení zkoušky (úhel 34°)

3.4.2.2 Průběh zkoušky při úhlu 36°



Obrázek 67: Průběh deformační síly při úhlu kladiva 36°



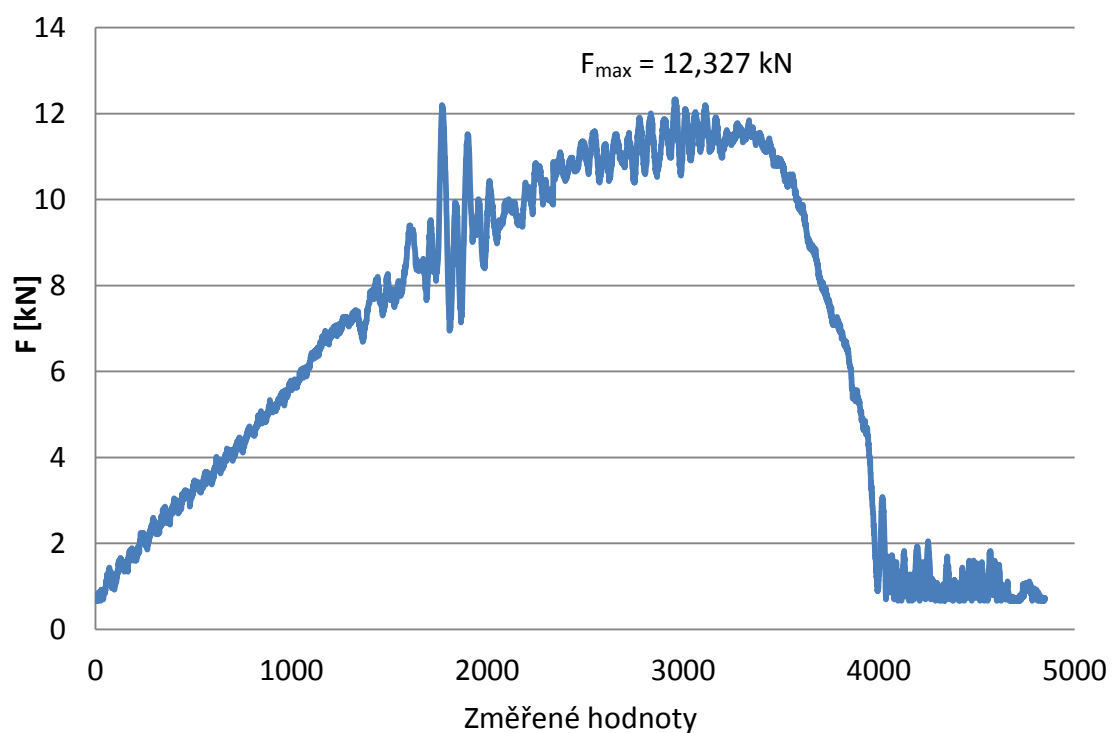
Obrázek 68: Zkušební vzorek po provedení zkoušky (úhel 36°)

Jak je vidět na obrázku 68 ani v tomto případě nedošlo k úplnému vyčerpání plasticity materiálu a nedošlo k přeražení vzorku. Průběh křivky deformační síly je pravděpodobně opět ovlivněn nedostatečným upnutím vzorku v přidržovači, kdy s největší pravděpodobností došlo k prokluznutí vzorku v přidržovači. V tomto případě ovšem nedošlo k úplnému vyjetí vzorku z přidržovače (viz. obr. 69) a vzorek zůstal upnut v přidržovači. Maximální naměřená deformační síla je 10,426 kN (viz. obr. 67).



Obrázek 69: Zkušební vzorek v přidržovači po provedení zkoušky (úhel 36°)

3.4.2.3 Průběh zkoušky při úhlu 42°



Obrázek 70: Průběh deformační síly při úhlu kladiva 42°



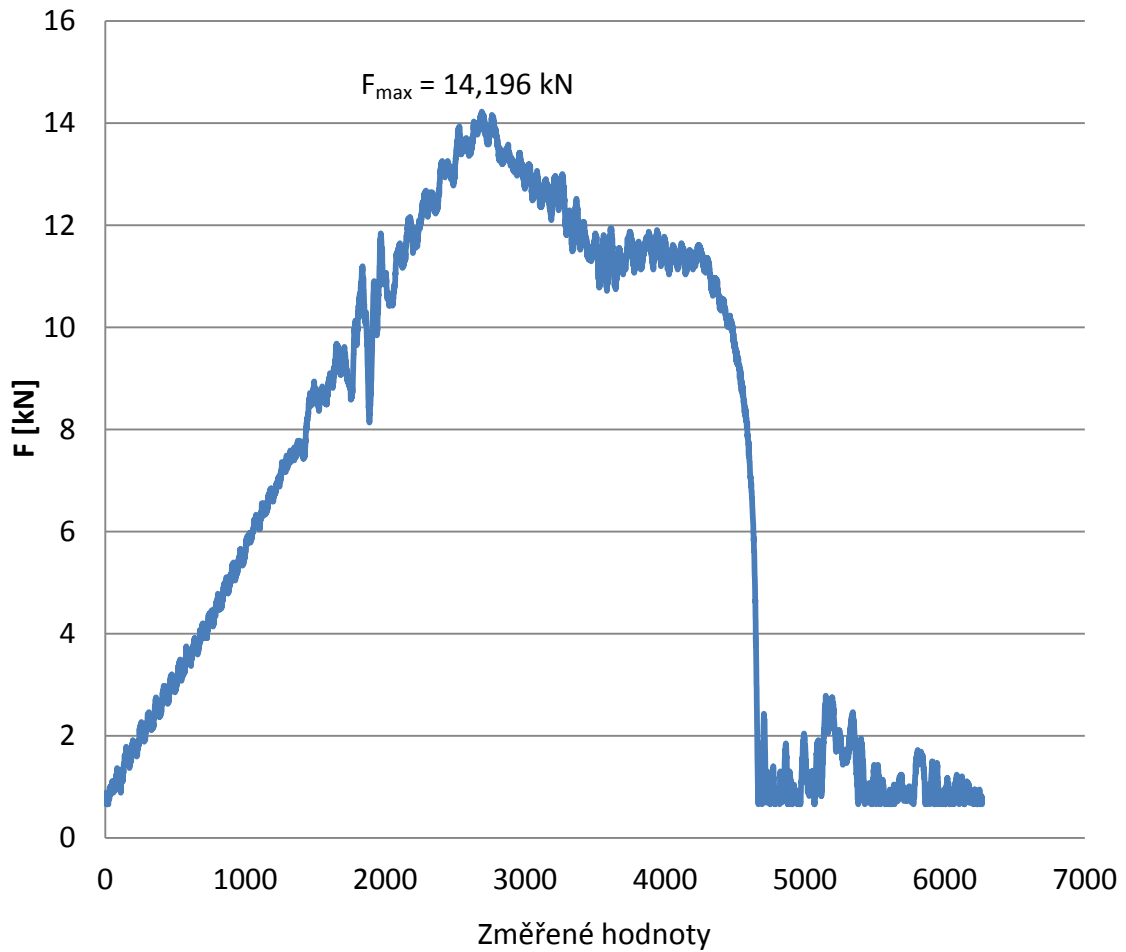
Obrázek 71: Přetržený zkušební vzorek po provedení zkoušky (úhel 42°)



Obrázek 72: Přetržený zkušební vzorek v přidržovači po provedení zkoušky (úhel 42°)

V tomto případě již došlo k požadovanému výsledku měření, tedy k úplnému vyčerpání plasticity a přetržení vzorku (viz. obr. 71). Jak je možné vidět na obrázku 70, vzorek nevydržel maximální sílu 12,327 kN a byl střížen o hranu přidržovače (viz. obr. 72).

3.4.2.4 Průběh zkoušky při úhlu 44°



Obrázek 73: Měření průběhu deformační síly při úhlu kladiva 44°



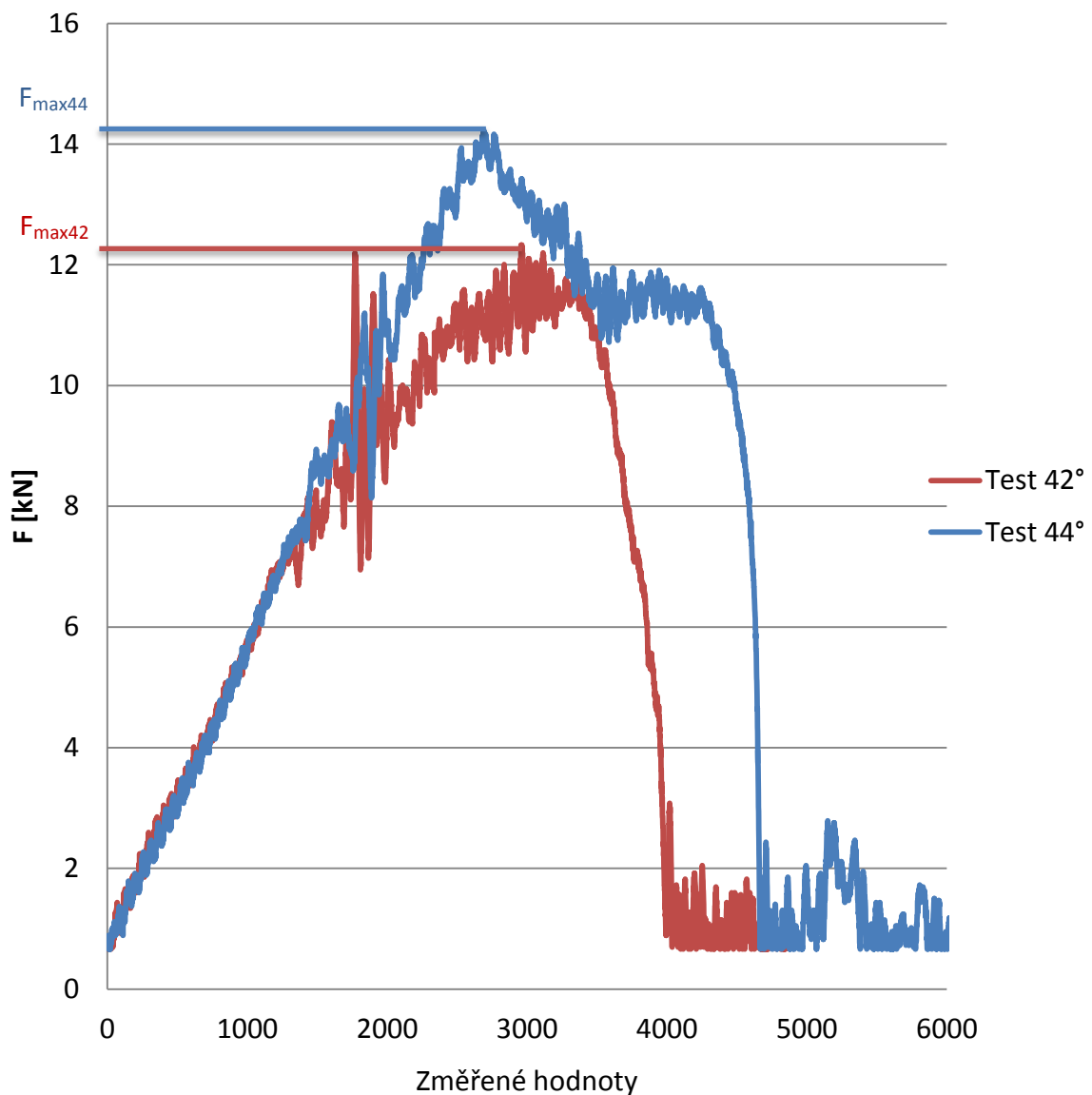
Obrázek 74: Přetržený zkušební vzorek po provedení zkoušky (úhel 44°)

I v tomto případě došlo k úplnému vyčerpání plasticity materiálu a přetržení zkušebního vzorku (viz. obr. 74). Při nastavení úhlu kladiva na 44° bylo dosaženo maximální deformační síly 14,196 kN (viz. obr. 73) a zkušební vzorek byl střížen opět o hranu přidržovače.

3.4.2.5 Porovnání průběhů měření s úplným vyčerpáním plasticity

Závěrečný graf (viz. obr. 75) porovnává průběhy měření, při kterých došlo k úplnému vyčerpání plasticity materiálu a tedy k vytvoření trhliny na zkušebním přístřihu. V našem případě to byla měření při nastavených úhlech kladiva 42° a 44° .

Graf přehledně potvrzuje, že nastavením většího úhlu kladiva dosáhneme větší deformační rychlosti i energie. Při nastavení úhlu kladiva na 44° došlo k porušení vzorku během kratšího časového intervalu a zároveň bylo dosaženo větší deformační síly 14,2 kN. Pro přetržení vzorku bylo dostačující již vytvoření deformační síly 12,3 kN, které bylo dosaženo při nastavení úhlu kladiva na 42° .



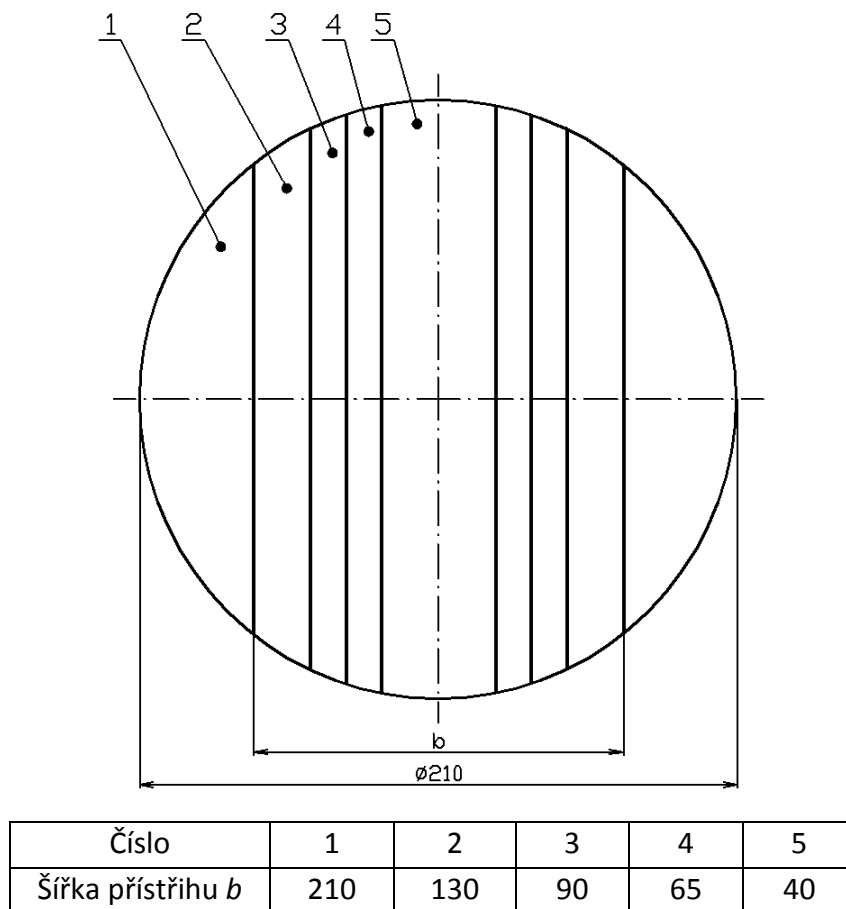
Obrázek 75: Graf porovnání všech průběhů měření

3.5 Návrh metodiky zkoušení na experimentálním zařízení

Díky získaným poznatkům z průběhů experimentů navrhnu v této kapitole metodiku měření na experimentálním zařízení.

3.5.1 Příprava přístřihu

Jako první je potřeba připravit zkušební vzorky neboli přístřihy. Přístřih je stříhán na hydraulických nůžkách na požadovaný rozměr (viz. obr. 39). Provedené experimenty probíhaly na přístřizích o průměru 200 mm. Tento průměr se ovšem ukázal jako nedostatečný, kdy nedocházelo k úplnému upnutí vzorku v přidržovači, který následně během experimentu v přípravku proklouzl. Došlo tak k ovlivnění naměřených dat. Z tohoto důvodu je doporučeno volit přístřihy o průměru 210 mm. Materiálová jakost musí být DC06. Nominální tloušťka plechu musí být 0,7 mm (povolená tolerance je $\pm 0,03$ mm). Každá dávka přístřihu musí být z hlediska tloušťky kontrolována.



Obrázek 39: Tvary zkušebních přístřihů

Je důležité, aby plech, který bude používán jako přístřih, byl zbaven mastnoty a nečistot, jinak hrozí vnesení nečistoty do tvářecího nástroje a hrozí poškození (zejména vizuální, které se velmi špatně opravuje). Jako prevence je tedy zapotřebí ze svazku materiálu odstranit první a poslední plech, aby do nástroje nebyla zanesena nečistota. Při stříhání musí být zabráněno kontaktu plechu s nečistotami.

3.5.2 Zakládání přístřihu do přídržovače

Před vložením přístřihu do nástroje musí být materiál očištěn, na každý 10. kus musí být nanášeno lisovací mazivo používané při sériovém lisování. Na přístřih je lisována přídržovací drážka na lisu H250. Lisovací drážka zajišťuje polohu zkušební vzorku v přídržovači, což zajišťuje opakovatelnost provádění zkoušky.

Přístřih je v přídržovači upnut pomocí osmi šroubů M12, které jsou utaženy momentovým klíčem.

3.5.3 Zakládání přídržovače a nastavení softwaru

Následně je sestava přídržovače s upnutým zkušebním vzorkem založena do experimentálního zařízení a je spuštěn program (CharpyPlech) pro zaznamenání průběhu zkoušky. Před měřením je doporučeno v programu nastavit položku „*Počet změřených vzorků*“ na hodnotu 50 000, aby bylo bezpečně zaručeno zaznamenání celého průběhu experimentu.

3.5.4 Provedení zkoušky

Zkouška probíhá nastavením nástroje do požadovaného úhlu (45°, 40°, 35°) a uvolněním nástroje. Tím dojde k deformaci vzorku a program zaznamená data.

3.5.5 Vyhodnocení měření

Vyhodnocení naměřených dat probíhá dále v programu MS Excel (viz. další kapitoly). Plán do budoucna je ovšem takový, aby došlo ke zdokonalení softwaru a ten dokázal výsledky vyhodnocovat přímo na měřicím stroji. Dále je možné podle potřeb zkoumat způsob deformace a chování zkušební vzorku při zkoušce.

4. Závěr

Cílem mé diplomové práce byla modifikace původního snímacího systému experimentálního zařízení tak, abychom se průběhem a výsledky měření co možná nejvíce přiblížili reálnému lisovacímu procesu a průběhu rychlosti deformace. Dalším z cílů bylo vytvoření návrhu metodiky průběhu zkoušek na experimentálním zařízení.

Diplomová práce je rozdělena na část teoretickou a část praktickou. V teoretické části jsem popsal problematiku tvařitelnosti a plastické deformace, která je klíčová k pochopení souvislostí v rámci této problematiky. Zaměřil jsem se na faktory ovlivňující tvařitelnost za studena a na jejich zjišťování. Dále jsem popsal materiály, které byly použity na výrobu zkušebních vzorků pro experimenty v praktické části.

V praktické části bylo přiblíženo unikátní experimentální zařízení pracující na principu Charpyho kladiva. Byly připomenuty a popsány původní snímací systémy, kterými byly úhlový potenciometr 2123A od firmy KISTLER a snímač síly K–Shear akcelerometr. A právě ve výměně snímače síly spočívala modifikace snímacího systému, jelikož při kalibraci původního snímače síly se vyskytly problémy, kdy ani přes veškeré úsilí i ve spolupráci s firmou KISTLER, nebylo možné zaručit bezchybnou opakovatelnost měření.

Z tohoto důvodu tedy došlo ke změně snímacího systému, kdy se přešlo z akcelerometru na polovodičový tenzometr. Dále byl vytvořen ve spolupráci s ČZU Praha unikátní měřicí program navržený pro provádění dynamických zkoušek plechů a jejich sledování. Po úspěšné kalibraci nového měřicího systému bylo možné provést několik experimentů na různých zkušebních vzorcích. U jednotlivých experimentů byl sledován vliv deformační rychlosti na citlivost materiálu.

Z výsledků experimentálních měření bylo dosaženo zjištění, že nastavením většího úhlu kladiva dosáhneme větší deformační rychlosti i energie a k porušení vzorku dojde během kratšího časového intervalu. Zároveň se materiál DC06 ukázal jako nejvhodnější pro technologii hlubokého tažení. Pro zvolený tvar zkušebních přístřihů (pásek 50 mm) bylo zjištěno, že dojde k defektu materiálu při překročení hodnoty deformační rychlosti 12 kN.

Dalším bodem této diplomové práce bylo vytvoření 3D skenů nástrojů. To proběhlo ve spolupráci se Škoda Auto, a.s., kdy byly pořízeny 3D modely všech nástrojů experimentálního zařízení jak na optickém 3D skeneru ATOS of firmy GOM, tak s ručním laserovým 3D skenovacím zařízením Steinbichler T-Scan of firmy NMS. Naskenovaná data budou v budoucnosti využita pro vytvoření simulací tvářecího procesu s modely nástrojů přesných rozměrů, kdy se dá při simulacích jednoduše ověřit schopnost výrobního procesu a případně provádět jeho optimalizace.

Posledním bodem bylo na základě získaných poznatků během experimentálních měření vytvoření metodiky průběhu zkoušek na experimentálním zařízení.

Všechny požadavky dané zadáním této diplomové práce tak jsou splněny. Jelikož tato diplomová práce již navazovala na jinou diplomovou práci, dá se předpokládat, že i na tuto diplomovou práci se v budoucnosti naváže v rámci dalších studentských prací.

Hlavní potenciál ve využití vidím při tvorbě simulací výrobního procesu z dat získaných během tvorby této diplomové práce. Další možnosti vidím ve zdokonalování měřicího softwaru, kdy by jistě bylo uživatelsky příjemnější, kdyby program dokázal získaná data sám zpracovat, jelikož v tuto chvíli je třeba naměřená data zpracovat v programu MS Excel.

Další možnost ve zlepšení měřicího programu vidím ve měření velikosti posunutí nástroje do materiálu, které v tuto chvíli není možné. Pro získání co nejpřesnějšího průběhu zkoušky bych také viděl potenciál v úpravě konstrukce experimentálního zařízení, kde bych doporučil řešit možnost aretace nástroje v určitém úhlu před spuštěním měření.

Použitá literatura a informační zdroje

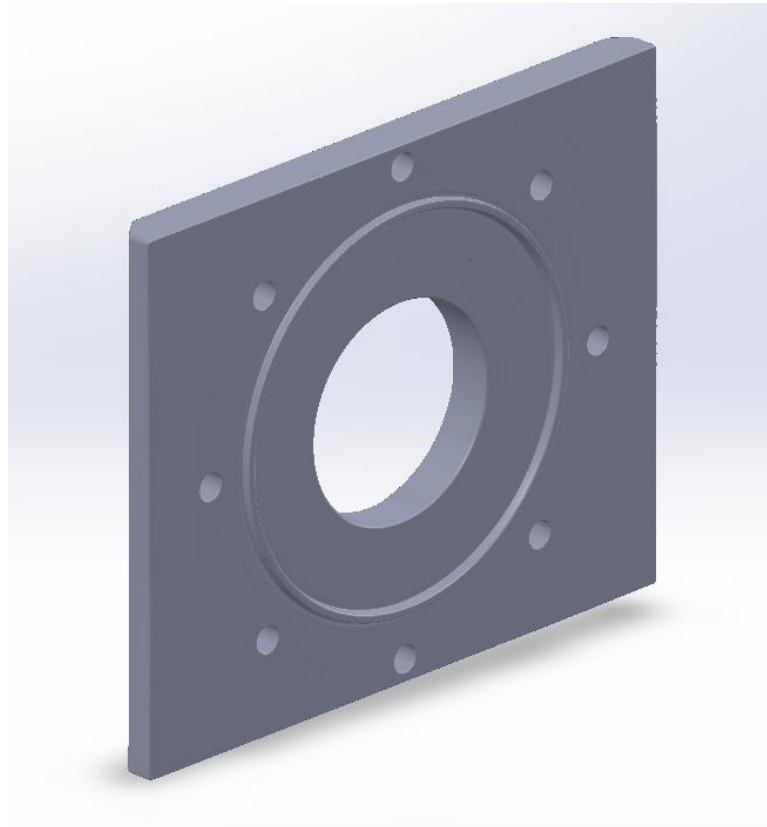
- [1] *Technologie tváření kovů* [online]. TUL, Fakulta strojní, Katedra strojírenské technologie – oddělení tváření kovů a plastů. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm
- [2] ČERMÁK, J., *Teorie a metodika tváření*, [přednášky], Praha: ČVUT, 2014.
- [3] JANOVEC, J.; MACEK, K.; ZUNA, P., *Fyzikální metalurgie*, Praha: ČVUT Praha, 2004, ISBN 80-01-02935-2.
- [4] ČADA, R., *Technologie 1*, Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2007, ISBN 978-80-248-1507-7.
- [5] FABÍK, R., *Tváření kovů*, Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2012, ISBN 978-80-248-2572-4.
- [6] ŽÍDEK, M., *Metalurgická tvařitelnost ocelí za tepla a za studena*, Praha: ALEKO, 1995, ISBN 80-85341-45-X.
- [7] PILVOUSEK, T., *Vliv vlastností vybraných šarží materiálu DC06 na tvařitelnost při plošném tváření*, Praha: 2009, Diplomová práce, ČVUT, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie.
- [8] TATÍČEK, F., OUŠKA, M., TURZA, L., PILVOUSEK, T. *Vliv citlivosti vybraných materiálů na rychlost posuvu příčnicku při zkoušení tahem*, In: Brno. Kovárenství [online], ISSN 1213-9289. Dostupné z: <http://www.kovarenstvi.cz/cs/archiv/c44.html>
- [9] PILVOUSEK, T., TATÍČEK, F., ROLEČEK, L., BARISIC, B. *Vliv deformační rychlosti na vlastnosti a mikrostrukturu oceli DC06*, In: Proceedings of International Conference on Innovative Technologies IN-TECH. *Vliv deformační rychlosti na vlastnosti a mikrostrukturu oceli DC06: Centrum pro povrchové úpravy*, Jaroměř, 2010, ISBN 978-80-904502-2-6.
- [10] KUČERA, R., *Význam deformační sítě v oblasti tváření*, Brno: 2012, Bakalářská práce, VUT Brno.
- [11] PETRUŽELKA, J., BŘEZINA, R., *Tvařitelnost kovových materiálů*, Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2001.

- [12] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály – Zkoušení tahem*, 2010.
- [13] LITOCHEBOVÁ, S., *Technologie výroby součástí tvářením*, Brno: 2010, Diplomová práce, VUT Brno.
- [14] TATÍČEK, F., *Metodika studia chování materiálu při různých rychlostech deformace při lisování*, Praha: 2014, Disertační práce, ČVUT Praha.
- [15] SÁGNER, Praha: 2014, Diplomová práce, ČVUT Praha.
- [16] CHLÁD, L., *Svařování ocelí s rozdílnými vlastnostmi pomocí YB-YAG laseru*, Brno: 2012, Diplomová práce, VUT Brno.
- [17] Feron, a.s. – Velkoobchod hutním materiálem. *Sortimentní katalog – Materiálové normy*. [online]. © 2004–2015. Dostupné z: http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat_normy.php
- [18] Automatizace.HW.cz, *Polovodičové tenzometry – princip, provedení, použití, historie*. [online]. 16.11.2006. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2006111601>
- [19] VTS Zlín, *Polovodičové tenzometry*. [online]. © 2010. Dostupné z: <http://www.vtsz.cz/polovodicove-tenzometry.php>
- [20] MICHALISKO, J., *Využití 3D skenování pro přípravu obrábění odlitků součástí parních turbín*, Brno: 2012, Diplomová práce, VUT Brno.
- [21] 3D skenery (GOM) – MCAE Systems, *3D digitalizace a měření*. [online]. © 2015. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/3d-skenery>
- [22] NMS, *Steinbichler T-Scan CS*. [online]. © 2011 – 2014. Dostupné z: <http://www.cz.nms-int.com/produkty/steinbichler-t-scan-cs>
- [23] ZÍKA, L., *Výroba součástí plošným tvářením*, Brno: 2010, Bakalářská práce, VUT Brno.
- [24] PCI-1712L – Multifunction Card – Advantech, *1 MS/s, 12-bit, 16-ch PCI Multifunction Card w/o AO*. [online]. © 1983 – 2015. Dostupné z: http://www2.advantech.com/products/multifunction/sub_1-2mlkc9.aspx
- [25] ČSN ISO 10113. *Kovové materiály – Plechy a pásy – Stanovení součinitele plastické anizotropie*, 2009.
- [26] ČSN ISO 10275. *Kovové materiály – Plechy a pásy – Stanovení exponentu deformačního zpevnění tahem*, 2008.

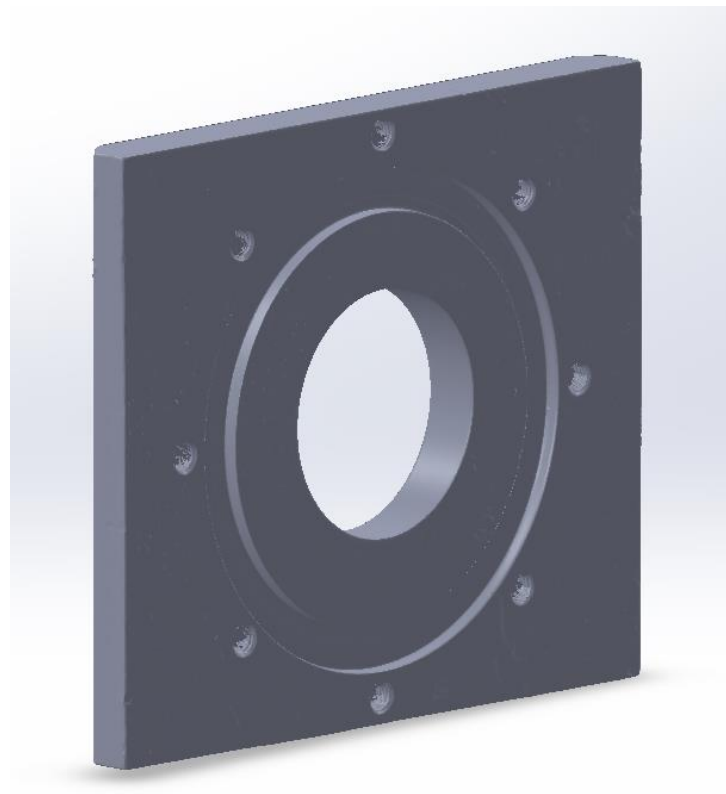
Seznam příloh

- Příloha 1:* První část přidržovače naskenovaná optickým skenerem
- Příloha 2:* Druhá část přidržovače naskenovaná optickým skenerem
- Příloha 3:* První část dělené hlavy naskenovaná optickým skenerem
- Příloha 4:* Druhá část dělené hlavy naskenovaná optickým skenerem
- Příloha 5:* První část přidržovače naskenovaná laserovým skenerem
- Příloha 6:* Druhá část přidržovače naskenovaná laserovým skenerem
- Příloha 7:* První část dělené hlavy naskenovaná laserovým skenerem
- Příloha 8:* Druhá část přidržovače naskenovaná laserovým skenerem

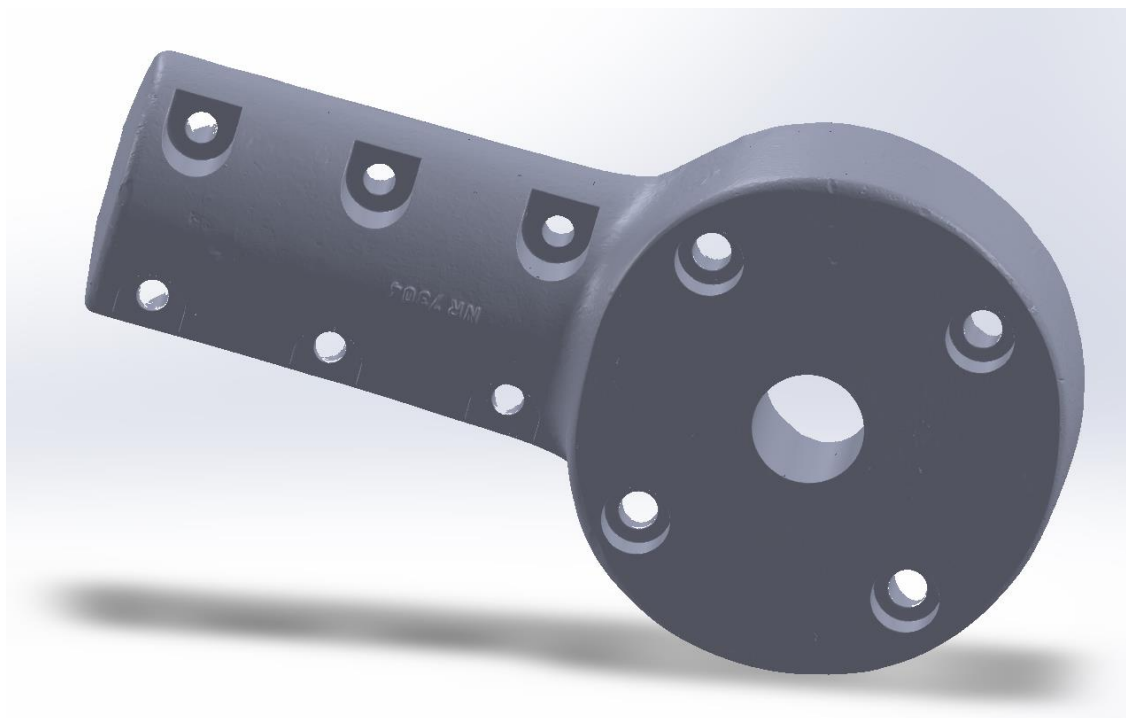
Příloha 1: První část přídržovače naskenovaná optickým skenerem



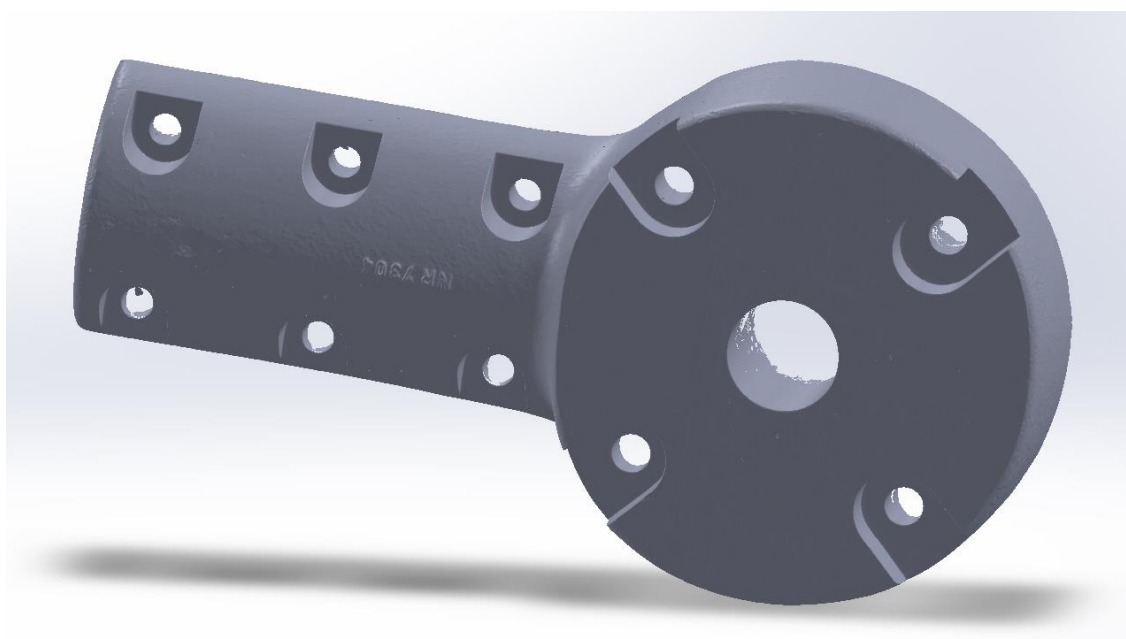
Příloha 2: Druhá část přídržovače naskenovaná optickým skenerem



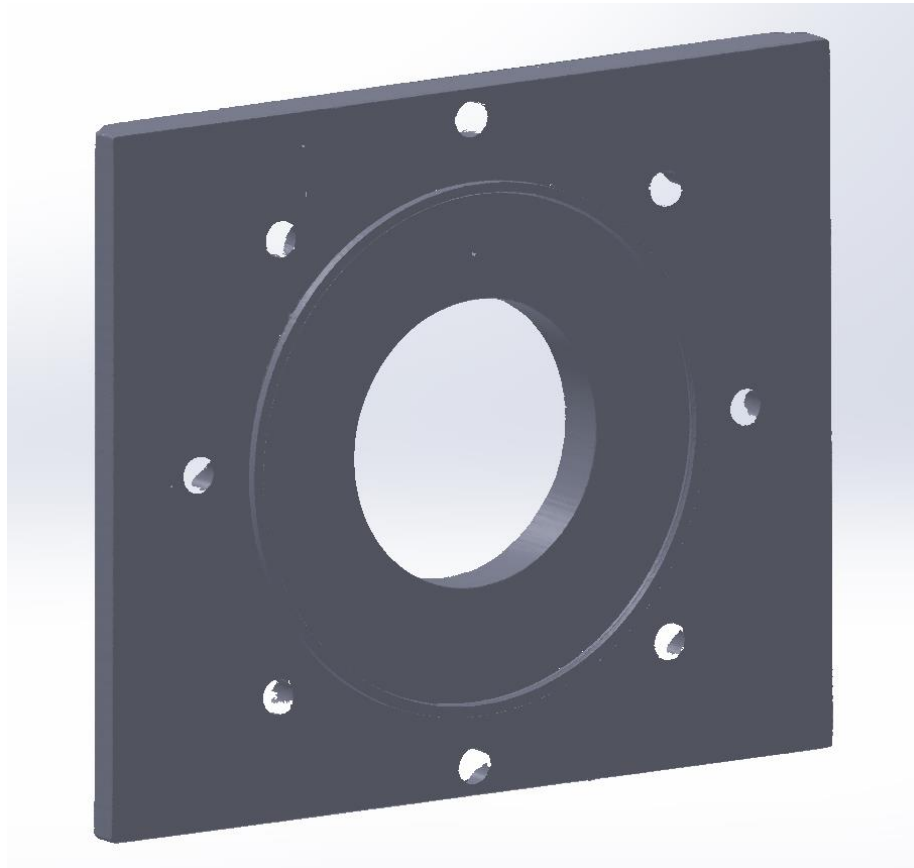
Příloha 3: První část dělené hlavy naskenovaná optickým skenerem



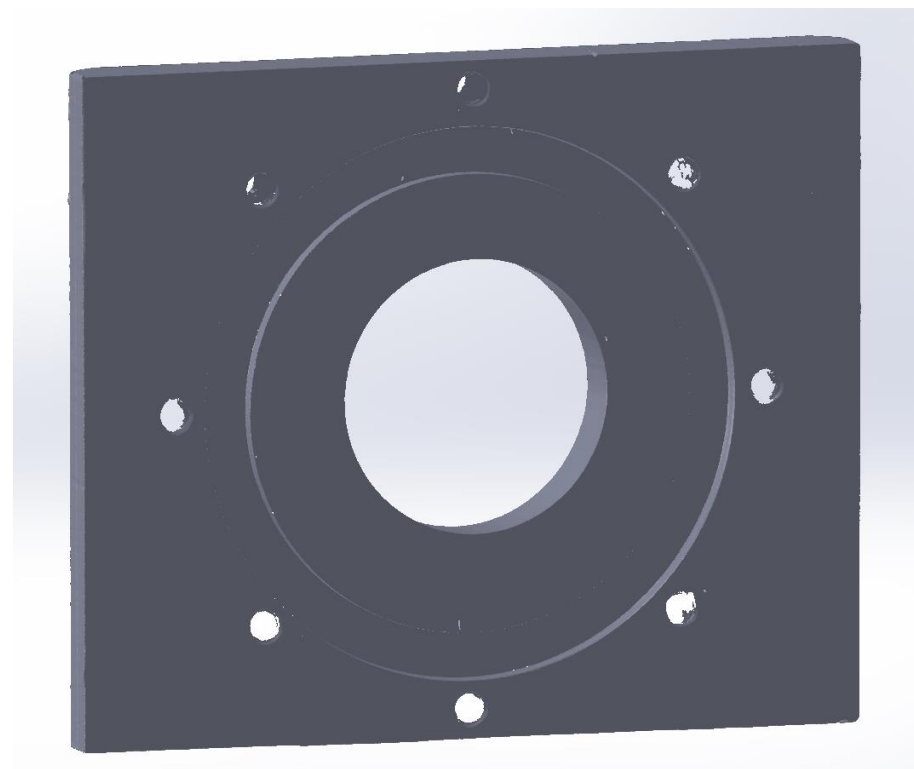
Příloha 4: Druhá část dělené hlavy naskenovaná optickým skenerem



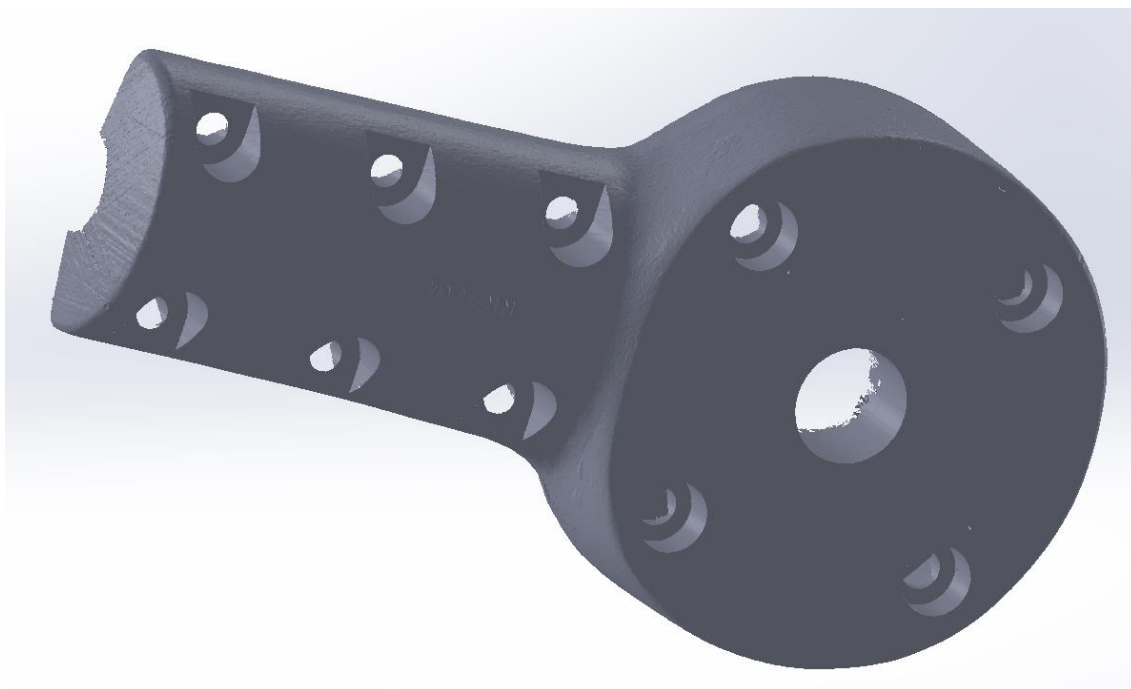
Příloha 5: První část přidržovače naskenovaná laserovým skenerem



Příloha 6: Druhá část přidržovače naskenovaná laserovým skenerem



Příloha 7: První část dělené hlavy naskenovaná laserovým skenerem



Příloha 8: Druhá část přidržovače naskenovaná laserovým skenerem

