

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**TEZE  
DISERTAČNÍ  
PRÁCE**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

Vliv citlivosti materiálu na rychlost deformace při  
reálném lisovacím procesu

*Ing. Martin Kubelka, IWE*

Doktorský studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Strojírenská technologie

Školitel: doc. Ing. Jan Šanovec, CSc.

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha

květen 2018

## The effect of material sensitivity to strain rate in real pressing process

Disertační práce byla vypracována v kombinované formě doktorského studia na Ústavu Strojírenské technologie, Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Disertant: Ing. Martin Kubelka, IWE  
Ústav Strojírenská technologie, Fakulta strojní ČVUT v Praze  
Technická 4, Praha 6, 160 00

Školitel: doc. Ing. Jan Šanovec, CSc.  
Ústav Strojírenská technologie, Fakulta strojní ČVUT v Praze  
Technická 4, Praha 6, 160 00

Oponenti:

prof. Ing. Emil Evin, CSc. (Strojnícka fakulta TU Košice)

prof. Ing. Stanislav Ruzs, CSc. (FS VŠB TU Ostrava)

prof. Ing. Františka Pešlová, Ph.D. ( FS ČVUT Praha)

Teze byly rozeslány dne: .....

Obhajoba disertace se koná dne ..... v ..... hod.

v zasedací místnosti č. 17 (v přízemí) Fakulty strojní ČVUT v Praze,  
Technická 4, Praha 6

před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Strojírenská technologie.

S disertací je možno se seznámit na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6.

Prof. Ing. Jan Suchánek, CSc.

předseda oborové rady oboru Strojírenská technologie

Fakulta strojní ČVUT v Praze

## **Anotace**

Tato disertační 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, rychlost deformace, mechanické zkoušky materiálu

## **Summary**

This dissertation 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, strain rate, mechanical test of material

## **Obsah**

1. Úvod .....	7
2. Popis procesu výroby výlisku.....	8
2.1 Výroba výlisku .....	9
2.2 Faktory ovlivňující kvalitu výlisku.....	10
2.3 Citlivost materiálu na rychlost deformace.....	11
2.4 Diagramy mezních přetvoření .....	13
3. Cíle práce .....	14
4. Návrh konstrukčního řešení zkušebního zařízení .....	16
4.1 Konstrukční řešení zařízení .....	18
4.2 Zařízení pro vyhodnocení průběhu zkoušky.....	19
5. Návrh SW pro vyhodnocení průběhu zkoušky a popis práce s tímto SW.....	20
5.1 Základní popis vyhodnocovacího softwaru .....	20
6. Návrh metodiky zkoušky pro sledování citlivosti na rychlost deformace na navrženém zkušebním zařízení. ....	22
7. Ověření navržené metodiky na zkušebních vzorcích.....	22
7.1 Vyhodnocení naměřených výsledků.....	23
8. Ověření chování materiálové jakosti DC 06 dle navržené metodiky.....	24
8.1 Vyhodnocení výsledků pomocí zkušebního stroje .....	24
8.2 Vyhodnocení testu podle Erichsena .....	25
8.3 Vyhodnocení výsledků pomocí vysokorychlostní kamery .	25
9. Závěr .....	26

## ***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.

V automobilovém průmyslu se také významně projevuje trend snižování hmotnosti karoserie. Toho je možné dosáhnout několika způsoby, mezi které patří používání materiálů s nižší měrnou hmotností (například použití neželezných kovů), či snižování tloušťky vstupního polotovaru.

Problematika snižování tloušťky představuje nebezpečí nedostatečné tuhosti výlisku či celé karoserie. To je možné řešit použitím materiálů o vyšší pevnosti, nebo jiného přístupu z hlediska konstrukce dílu. Velmi populární je tzv. dynamický design, který je charakteristický ostrými hranami a přechody na karoserii. Ty jsou důležité mimo jiné pro zajištění dostatečné tuhosti výlisku. Z hlediska výrobního přináší tento konstrukční prvek řadu problémů, čímž se výrazně zvyšuje riziko vzniku defektu, nejčastěji trhliny či přetažení materiálu. Trend snižování tloušťky plechů znamená také problém horší tvařitelnosti.

Výše popsaná problematika ovlivňuje především automobilový průmysl i z hlediska výroby karosářských dílů automobilů. S ohledem na požadavky trhu jsou kladeny nároky na zvyšování efektivity a zkracování výrobního času. Tato situace může vést k rychleji probíhajícím operacím tváření, což se může projevovat zvýšením rizika vzniku vad. Při realizaci tvářecího procesu je pak třeba se zabývat eliminací těchto výrobních defektů.

Pro eliminaci rizik 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. Hledání popisu vlivu

dalších faktorů pokračuje, dokud není výrobní proces stabilní. Problematika rychlosti deformace byla do současné doby z hlediska lisovacího procesu zanedbávána. S ohledem na moderní trendy ve výrobním procesu nabývá parametr rychlosti deformace stále většího významu. O rostoucím významu hovoří i počet vědeckých týmů, které se problematice věnují, či počet publikací na toto téma vznikající, ale i matematický popis chování materiálu, který se používá v numerických simulacích.

Problematika citlivosti materiálu na rychlost deformace je velice komplexní, do současné doby nebyla dostatečně reflektována. Je třeba si uvědomit, že definování podmínek zkoušení citlivosti materiálu na rychlost deformace není vyřešeno. V této oblasti byla učiněna řada kroků, které mají zúžit možné interpretace výsledků, přesto je třeba se touto problematikou zabývat a navrhnout metodiku zkoušek pro určení vlastností materiálu při různých rychlostech deformace, které odpovídají rychlosti deformace při lisovacím procesu.

## ***2. Popis procesu výroby výlisku***

Vlastní výroba dílů karoserie automobilů je technicky i technologicky velmi složitý proces s řadou faktorů jej ovlivňující. Na výlisky je kladen požadavek na tvorbu komplikovaných tvarů s minimálním počtem výrobních kroků, s minimálními náklady na materiál. Výroba výlisků je ovlivněna postupem výroby, lisovaným materiálem, technologickými faktory a použitým strojním vybavením. Nežádoucí je výskyt vad na výlisku. Mezi takovéto nežádoucí defekty patří trhliny, nepřípustná ztenčení, propadliny, zvlnění apod. Tyto defekty je možné eliminovat vhodnou volbou lisovacích podmínek, či lisovacích parametrů. Změnou těchto okrajových podmínek dochází ke zvyšování výrobních nákladů, můžeme také zasáhnout do taktu



výrobní linky, čímž může dojít ke snižování produkce výroby, což je s ohledem na výrobní výkon a nákladovost negativní jev.

## 2.1 Výroba vylisku

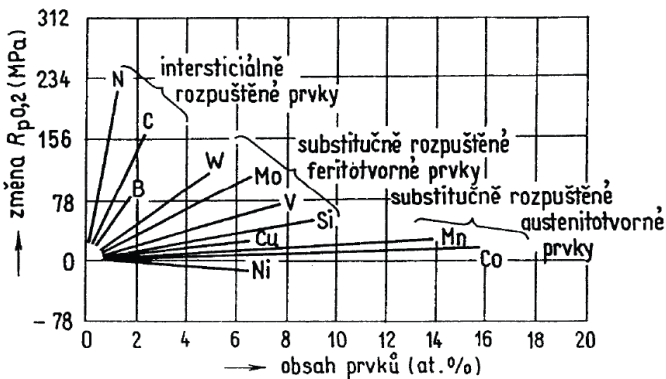
Na výrobě vylisku se obvykle podílejí technologie stříhání, ohýbání, hlubokého tažení. Tvarová složitost obvykle vyžaduje použití kombinací těchto technologií.

### Základní princip plastické deformace

Tváření za studena je realizováno dvěma základními mechanismy: kluzem a dvojčatěním. Realizován je ten mechanismus, který v daných podmínkách vyžaduje menší napětí. [1, 2, 3]

Při tvářecím procesu dochází ke zpevnování materiálu, které je dáno součtem několika dílčích přírůstků zpevnění: [4, 5]

- základní napětí potřebné k překonání meziatomární síly při posuvu atomů z rovnovážných poloh mřížky, zpevnění substitučního a hlavně intersticiálně tuhého roztoku (viz. Obr. 1).



Obr. 1: Vliv obsahu legujících prvků na růst meze kluzu austenitu

- dislokační zpevnění
- účinek hranic zrn a subzrn
- zpevnění vlivem jiných fází (např. precipitátů).

## **2.2 Faktory ovlivňující kvalitu výlisku**

Lisovací proces [6, 7, 8] jsme schopni ovlivňovat zejména vlastnostmi lisovaného materiálu (jeho tloušťkou a jakostí), dále parametry nástroje (geometrie, brzdící lišty), parametry stroje (takt linky, kinematika procesu, velikost přídržovací síly, vliv přídržovačů), dále tribologické vlastnosti (změna, rozložení a množství maziva), tvar nástřihu. Z výše uvedeného je patrné, že optimalizace tvářecího procesu je komplexní problematika vyžadující znalosti a zkušenosti.

Každý faktor má na průběh lisovacího procesu jiný význam. V případě nestability lisovacího procesu je tendence hledat její příčiny. Proto byl a stále je prováděn výzkum v oblasti docílení stability lisovacího procesu.

Polotovary výlisků jsou v současné době hodnoceny především pomocí hodnot mechanických vlastností. Rozsah těchto hodnot však může být poměrně široký, proto jsou postupně zaváděny další parametry. To však nemusí být dostačující k popisu a členění lisovaných materiálů, jelikož dostatečně nevypovídá o kvalitách materiálu.

### **Tvařitelnost materiálu**

Popis této problematiky je třeba popsat řadou pojmů, jako je plastičnost, tvařitelnost, přetvárný odpor a přetvárná pevnost, deformace, mezní stav apod. [4, 6, 10, 11].

Faktory ovlivňující tvařitelnost je možné rozdělit do 4 skupin:

- Fyzikálně-metalurgické faktory (související s materiálovými vlastnostmi, strukturním stavem, tepelně aktivované děje apod.)
- Termomechaničtí činitele (souvisí s teplotou, vliv deformačních rychlostí, deformační historie apod.).
- Stav napjatosti
- Technologické podmínky výroby

### **Ověřování tvařitelnosti**

Obvykle je prováděno pouze ověřování mechanických vlastností, méně časté je pak ověřování chemického složení. Analýza materiálu pomocí technologických zkoušek tvařitelnosti se provádí spíše výjimečně.

Mechanické vlastnosti materiálu se obvykle hodnotí zkouškou tahem [12]. Jsou určovány hodnoty meze kluzu  $R_e$  (resp.  $R_{p0,2}$ ), meze pevnosti  $R_m$ , tažnosti (např.  $A_{80mm}$ ), součinitele plastické anizotropie a exponentu deformačního zpevnění.

### **2.3 Citlivost materiálu na rychlost deformace**

Z hlediska současného poznání roste význam rychlosti deformace, což je patrné i z hlediska rostoucího počtu publikací věnující se této problematice [15, 16, 17, 18].

Hlavními oblastmi zájmu jsou vysoké rychlosti deformace [19, 20, 21], oblast neželezných kovů (především slitiny hořčíku a slitiny hliníku), oblast vysokopevných materiálů [22, 23, 28, 29, 30, 31, 32, 33], vztahující se k materiálovému modelu Corrus Vegter [24, 25, 26, 27]

## Popis rychlosti deformace

K plastické deformaci dochází při překročení meze kluzu. Plastickou deformací dochází ke změně tvaru materiálu a vzniká tak výlisek. Touto deformací dochází k přemístování jednotlivých bodů, deformace je definována v těchto přemístěních, přičemž se předpokládá plastické chování materiálu [1, 6, 7].

Změnu stupně deformace lze vyjádřit jako:  $d\varphi = \frac{dl}{l_0}$  [-]

Rychlost deformace je v reálných technologických procesech veličinou proměnnou a nerovná se rychlosti pohybu nástroje. Například ale pro tahovou zkoušku je možné odvodit vztah [2]:

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

Kde  $v$  je rychlost pohybu nástroje a  $l$  je dráha v daném okamžiku. Pro rychlost deformace je možné odvodit vztah:

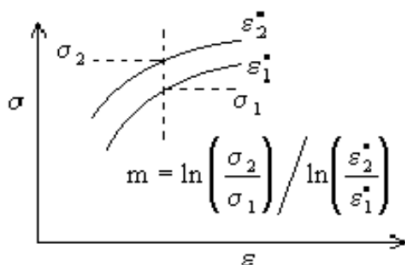
$$\dot{\varphi} = \frac{1}{l_1} \cdot \frac{dl_1}{dt} \quad [s^{-1}]$$

Pro rychlost pohybu nástroje platí:

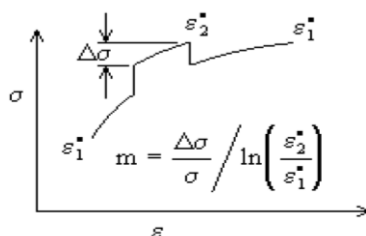
$$v = \frac{dl_1}{dt} \quad [mm \cdot s^{-1}]$$

Například [6] uvádí způsoby, jak určit parametr citlivosti deformace ze zkoušky tahem. Jednou možností je sledování přirozeného přetvárného odporu při dvou různých konstantních rychlostech deformace (Obr. 2), či je třeba v průběhu zkoušky změněna rychlost deformace (Obr. 3).

Pro společný účinek deformace a rychlosti deformace je obvykle předpokládán model chování materiálu:  $\sigma = C\epsilon^n \dot{\phi}^m$ . Na základě současné úrovně poznání se pro tváření za studena předpokládala hodnota součinitele  $m = 0$ , (hodnota exponentu deformačního zpevnění  $n$  pro tvárné kovové materiály se pohybuje okolo 0,23, pro silně zpevňující materiály až 0,45).



Obr. 2: Závislost napětí a deformace pro různé vzorky s konstantní rychlostí deformace vzorku [6]:



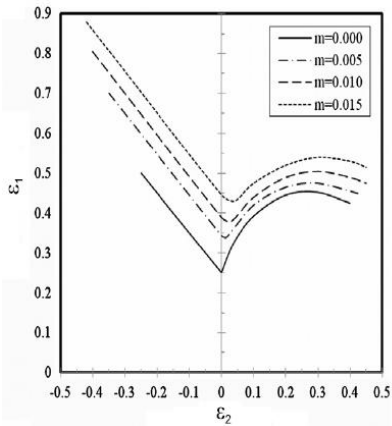
Obr. 3: Závislost napětí a deformace pro vzorek se změnou rychlosti deformace v průběhu zkoušky[6]:

Již v literatuře [2] bylo prokázán rozpor hodnot parametru citlivosti na rychlost deformace pro různé podmínky zkoušky. Z toho plyne, že pro technologie plošného tváření nejspíše nebude možné takto definovaný parametr použít.

## 2.4 Diagramy mezních přetvoření

FLD diagramy se využívají pro zjišťování zásoby plasticity. Mezní stupeň deformace je hraniční hodnota, do které je možné vyrobit výlisek bez vzniku vad. Pokud je deformace větší, na výlisku vznikne trhlina [28, 29]. Příklad FLD diagramu je na Obr. 4.

Mezní deformace se zjišťují různými typy zkušebních vzorků a různými způsoby jeho zatěžování.



Obr. 4: Vliv parametru  $m$  na křivky v FLD diagramu s modifikovanou efektivní nestabilitou [30]

### 3. Cíle práce

Práce si klade za cíl rozšířit poznání v oblasti sledování citlivosti materiálu na rychlost deformace. V rámci práce se nepředpokládá, že by byla vyřešena do všech důsledků. Práce si klade za cíl konstrukční návrh zařízení pro sledování vlivu citlivosti materiálu na rychlost deformace v podmínkách odpovídajících reálnému lisovacímu procesu. Navržené zařízení bude osazeno řadou snímačů, kterými bude možné děj popisovat. Zařízení bude mít funkční plochu, pomocí které bude vytvářet deformaci v materiálu do vzniku trhliny při různých rychlostech deformace. Zařízení bude umožňovat snadnou změnu funkční plochy pro popis tvářecího děje.

Dále bude vytvořena metodika zkoušení, která popíše přípravu zkušebních vzorků, systém zakládání vzorků do zkušebního nástroje, popis práce se software, které umožní sledovat zkušební proces. V rámci metodiky dále bude popsán způsob vyhodnocení výsledků. Metodika povede k ověření, zda problematika rychlosti deformace má vliv na mechanické vlastnosti materiálu.

Bude popsán vytvořený software, který je používán pro vyhodnocení výsledků provedených experimentů. Popis bude zaměřen na parametry nastavení před začátkem zkoušky, vliv jednotlivých parametrů na průběh výsledků zkoušky. Tento SW vyhodnocuje parametry procesu z průběhu zkoušky. Jedná se především o polohu nástroje a zatěžující sílu. Po realizaci zkoušky SW provede vyhodnocení a bude popsán postup práce pro získání relevantních dat.

V rámci práce bude provedeno ověření navržené metodiky pro materiál DC 06. Dále bude ověřena funkčnost připraveného SW.

### **Hypotézy práce**

Podle dostupných literárních zdrojů [6, 20, 31, 45] plyne, že rychlost deformace nemá významný vliv na chování materiálu při lisovací operaci. Na základě poznatků z praxe a dalších realizovaných prací ale plyne, že by tomu tak být nemuselo. Cílem práce je proto vytvoření zkušebního zařízení, realizace metodiky zkoušení, přípravy SW pro realizaci zkoušky a ověření navržených postupů.

Z dostupných zdrojů je také zřejmá metodika stanovování exponentu citlivosti materiálu na rychlost deformace. Je možné tuto metodiku použít i pro sledování chování tvářecího procesu za studena tenkých plechů používaných při výrobě výlisků?

### **Hlavní cíle disertační práce**

Hlavní cíle disertační práce je možné charakterizovat následujícími body.

- 1) Konstrukční návrh experimentálního zařízení pro sledování citlivosti materiálu na rychlost deformace při podmínkách blízcích se reálnému lisovacímu procesu.
- 2) Návrh SW pro vyhodnocení průběhu zkoušky a popis práce s tímto SW.
- 3) Návrh metodiky zkoušky pro sledování citlivosti na rychlost deformace na navrženém experimentálním zkušebním zařízení.
- 4) Ověření navržené metodiky na zkušebních vzorcích
- 5) Ověření chování materiálové jakosti DC 06 dle navržené metodiky

#### ***4. Návrh konstrukčního řešení zkušebního zařízení***

V dnešní době se již objevují zařízení, pomocí kterých je možné sledovat vliv citlivosti rychlosti deformace na chování materiálu. Tato stávající zařízení však často neumožňují přizpůsobit průběh experimentu reálnému průběhu výrobního procesu. Ve skutečnosti to znamená požadavek na přesný záznam nejdůležitějších faktorů, kterými jsou záznamy sil, deformací, rychlosti pohybu nástroje, teploty apod., a to vše pomocí moderních a přesných elektronických měřicích systémů tak, aby bylo možné ovlivňovat rychlost deformace. V reálném lisovacím procesu je rychlost deformace závislá na rychlosti nástroje, ale nepřimo. Materiál se často deformuje v jiném směru, než se pohybuje nástroj (kolmo k pohybu nástroje). Např. v případě zkoušky tahem se materiál deformuje jen ve směru pohybu příčnicku.

V této části práce je proveden návrh konstrukčního řešení zařízení, pomocí kterého je možné sledovat chování materiálu v závislosti na změně rychlosti deformace. Požadavky na návrh zařízení jsou poměrně široké. Mezi



hlavní požadavky patří změna rychlosti pohybu nástroje tak, aby umožnila sledování chování materiálu při různých rychlostech deformace. Dále je třeba, aby při deformaci nedocházelo k výrazné změně rychlosti pohybu nástroje, ale po vzniku trhliny bylo provedeno zastavení pohybu zkušebního nástroje. Geometrie funkčních částí navrženého zařízení odpovídala geometrii nástrojů, které jsou v dnešní době pro ověřování tvařitelnosti používány, aby výsledky získané navrženým zařízením byly porovnatelné s dnes běžně používanými zkouškami. Zařízení by mělo umožňovat změnu geometrie funkční části nástroje tak, aby bylo možné se zkouškou přiblížit i reálným geometriím vyráběných výlisků. Zařízení musí umožňovat sledování průběhu deformace jednak pomocí snímačů (především síly působící v průběhu deformace či polohy nástroje v průběhu zkoušky), ale také musí umožnit sledování děje optickými metodami, pomocí kterých je možné provádět vyhodnocování velikosti deformace.

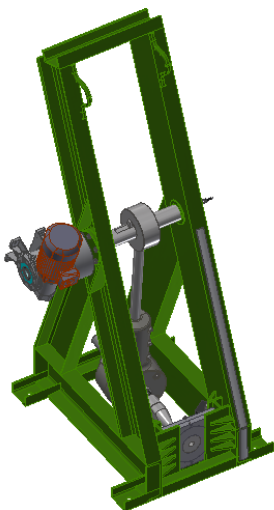
Při návrhu konstrukčního řešení bylo uvažováno několik možných variant, pro které byly definovány výhody a nevýhody. Na základě toho vznikl návrh konstrukčního řešení. Z hlediska uvažovaných laboratorních zkoušek, byl zvolen tvar zkušebního nástroje srovnatelný s nástrojem používaným při zkoušce hlubokotažnosti podle Erichsena. Získané výsledky ze zkušebního zařízení je tedy možné porovnávat s výsledky zkoušky hloubením podle Erichsena. Zařízení ale umožňuje změnit geometrii nástroje na libovolnou, je ale omezena z hlediska absolutní velikosti, což ovlivňuje maximální síla, kterou zařízení umožňuje vyvodit a dále fakt, že při deformaci musí vzniknout trhlina a v průběhu lisovací operace nesmí být patrná výrazná změna rychlosti pohybu zkušebního nástroje.

## 4.1 Konstrukční řešení zařízení

Zvolená varianta navrženého řešení (Obr. 5) vychází ze zařízení pro zkoušku vrubové houževnatosti dle Charpy. K deformaci zkušební vzorku dochází působením nástroje upnutého k otočné hlavě. Hlavní výhodou této varianty je možnost využití gravitace a tíhy kyvadla jako zdroj energie pro pohyb nástroje. [I-1, I-2]

Na Obr. 6 je pohled na funkční část nástroje a detailní pohled na systém přidržovače a tažnice.

Bližší seznámení s konstrukčním řešením navrženého zařízení je ve vlastní disertační práci, kde je i kompletní výkresová dokumentace.



Obr. 5: Celkový pohled na navrhované zkušební zařízení.



Obr. 6: Pohled na model funkční části zkušebního zařízení a systém  
přidržovače a tažnice

#### **4.2**      *Zařízení pro vyhodnocení průběhu zkoušky*

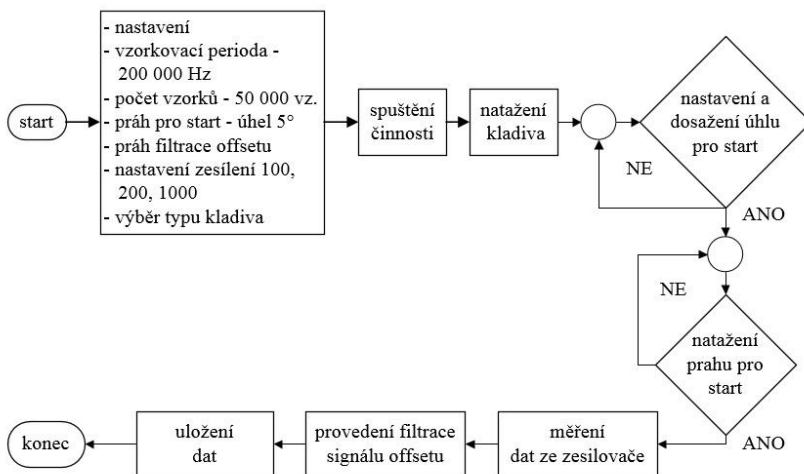
Hlavními částmi jsou snímací a vyhodnocovací systémy a dále pak řídicí software pro sledování průběhu zkoušky.

Mezi hlavní prvky snímací techniky patří úhlový potenciometr pro analýzu polohy zkušebního nástroje (měření úhlu, realizováno úhlovým snímačem) a dále systém pro měření a vyhodnocení vyvozené síly (tenzometrický rezistor).

Pro vyhodnocování děje je použita rozvodnice, která převádí veškerá data do měřicí karty Advantech 1712L-AE, která je umístěna v počítači. Detailní popis je proveden v disertační práci.

## 5. Návrh SW pro vyhodnocení průběhu zkoušky a popis práce s tímto SW.

Pro vyhodnocení průběhu experimentu byl vytvořen software. Hlavní činnosti související s průběhem a vyhodnocením zkoušky plynou z vývojového digramu na Obr. 7. [I-2]

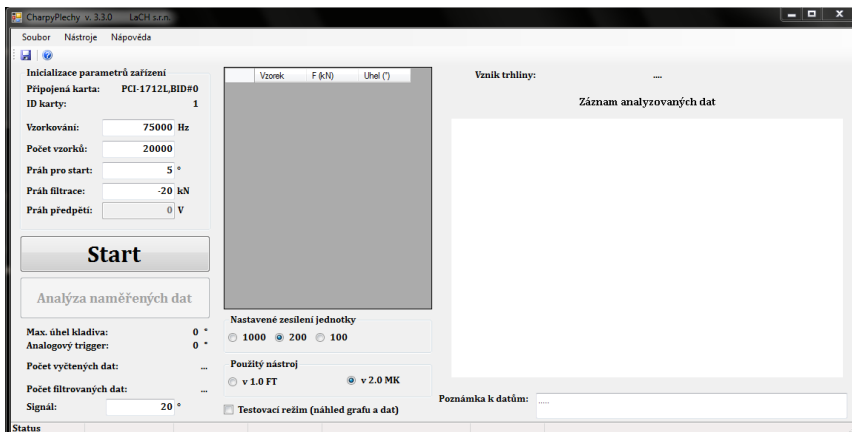


Obr. 7: Vývojový diagram činností souvisejících s dokumentací průběhu zkoušky

### 5.1 Základní popis vyhodnocovacího softwaru

Na Obr. 8 je zobrazeno hlavní okno obslužné aplikace. Hlavními částmi je nastavení, zobrazení dat, ukládání dat. Pro jednoduchost obsluhy je každá položka doplněna ToolTipTextem pro nápovědu.

V rámci nastavení zkoušky je třeba se věnovat základním parametrům, mezi které patří vzorkování, nastavení počtu naměřených dat, práh pro start, práh filtrace a práh předpětí. Detailní popis práce s tímto software je realizován v disertační práci.



*Obr. 8: Celkový pohled na okno aplikace*

Po základním nastavení je možné realizovat spuštění zkoušky stisknutím tlačítka Start, čímž dojde k iniciaci měření. Vlastní měření se spouští automaticky dosažením úrovně úhloměru (práh pro start).

Ukládání naměřených dat je možné provádět stisknutím tlačítka pro uložení. Ukládány jsou 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 dat. Uložená data jsou ve formátu \*.csv, které je možné otevřít v Excelu, MATLABu, Scilabu atp.

## **6. *Návrh metodiky zkoušky pro sledování citlivosti na rychlost deformace na navrženém zkušebním zařízení.***

Návrh metodiky spočívá v popisu přípravy zkušebních vzorků, podmínek zkoušení a způsobu vyhodnocování. Popis metodiky má za cíl definovat podmínky zkoušení, aby bylo možné porovnávat chování různých šarží materiálů. [I-2, I-3, I-4]

### **Vlastní metodika popisuje:**

- Příprava vzorků (řeší problematiku jejich přípravy, manipulace, poškození povrchových vrstev, apod.)
- Vytvoření měrné sítě (včetně ochrany před jejím poškozením)
- Zakládání zkušebního vzorku do nástroje (jeho vystředění, upevnění v nástroji)
- Nastavení softwaru
- Přípravu vysokorychlostní kamery pro měření
- Provedení zkoušky
- Vyhodnocení naměřených výsledků a jejich analýza

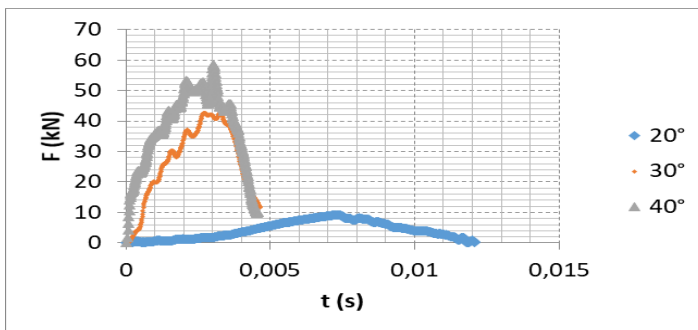
## **7. *Ověření navržené metodiky na zkušebních vzorcích***

V rámci práce bylo provedeno ověření navrženého konstrukčního řešení a navržené metodiky zkoušení na zkušebních vzorcích materiálové jakosti DC 06.

## 7.1 Vyhodnocení naměřených výsledků

Byly provedené zkoušky pro různé podmínky a byla vyhodnocena naměřená data získaná ze snímačů a z vysokorychlostní kamery. [I-5, I-6]

Průběh zkoušky pro vybrané vzorky pro nastavené úhly 20, 30 a 40° jsou patrné z Obr. 9.



Obr. 9: Průběh síly pro vybrané jakosti pro úhel dopadu nástroje 20°

Na Obr. 10 a 11 jsou příklady deformace výlisku získané pomocí vysokorychlostní kamery. Obrázky zachycují okamžik před vznikem trhliny a po vzniku trhliny. Byla provedena analýza obrazu a vyhodnoceny deformace. Z provedených analýz plyne, že měřené elementy mimo oblast trhliny již nemění svoji velikost a k deformaci dochází pouze v oblasti trhliny.

Na základě provedených analýz bylo ověřeno, že navržená metodika je plně funkční a je použitelná pro realizaci ověření chování materiálu pro různé rychlosti deformace.



Obr. 10: Šarže A, 20°, snímek před vznikem trhliny



Obr. 11: Šarže A, 20°, snímek po vzniku trhliny

## **8. Ověření chování materiálové jakosti DC 06 dle navržené metodiky**

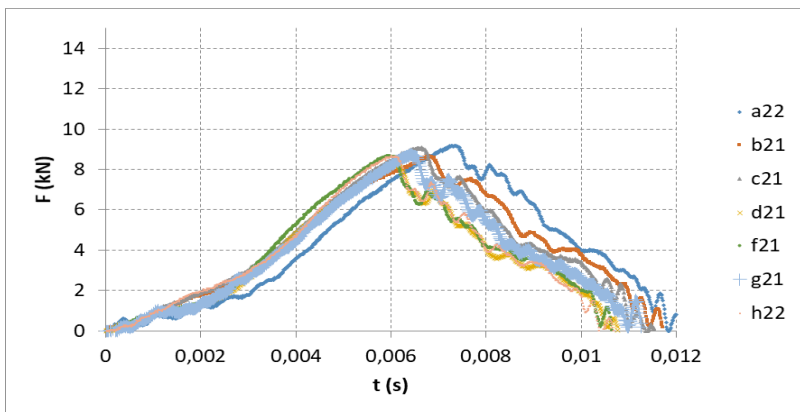
Na základě výsledků ověření metodiky bylo provedeno ověření chování materiálové jakosti DC 06. Pro analýzy bylo vybráno 8 šarží materiálu jakosti DC 06 se jmenovitou tloušťkou v rozpětí 0,7 až 0,76 mm, analyzované vzorky jsou různé šarže, případně jsou od různých dodavatelů.

Zkouška byla provedena dle navržené metodiky. Analýza byla provedena na vzorcích kruhového přístříhu o průměru 200 mm tak, aby výsledky bylo možné porovnávat se statickou zkouškou hlubokotažnosti dle Erichsena. [I-5, I-6]

### **8.1 Vyhodnocení výsledků pomocí zkušebního stroje**

Na zkušebním stroji byly provedeny zkoušky pro všechny materiálové jakosti. Na Obr. 12 je ukázka příkladu průběhu síly.





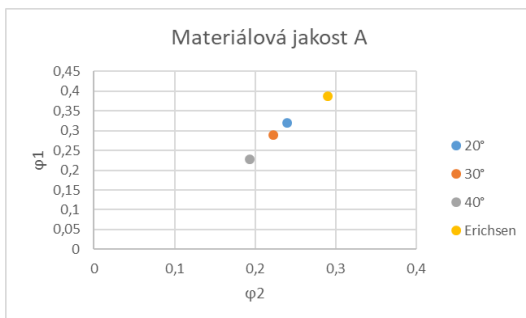
Obr. 12: Průběh síly pro vybrané jakosti pro úhel dopadu nástroje  $20^\circ$

## 8.2 Vyhodnocení testu podle Erichsena

Byly vytvořeny zkušební vzorky pro ověření hlubokotažnosti podle Erichsena. Na těchto vzorcích byla nanesena měrná síť, vzorky byly následně deformovány. Zkouška byla při dosažení trhliny ukončena. Pro účely práce byla vyhodnocována velikost deformace elementů měrné sítě.

## 8.3 Vyhodnocení výsledků pomocí vysokorychlostní kamery

Videosekvence získané ze zkoušek vysokorychlostní kamerou byly analyzovány pomocí software dle navržené metodiky. Vlastní výsledky jsou uvedeny v Příloze disertační práce. [I-7, I-8]



Obr. 13: Poloha bodů v diagramu FLD pro různé podmínky zkoušení pro materiálovou jakost A

Na Obr. 13 je zobrazen příklad velikosti deformace v okamžiku vzniku trhliny získané z videosekvence deformovaných vzorků a ze vzorků analyzovaných zkouškou podle Erichsena. Analogicky jsou provedeny analýzy velikosti deformace pro všechny ostatní materiálové jakosti. Největší zásobu plasticity materiálu vykazuje statická zkouška podle Erichsena, s rostoucí rychlostí deformace se velikost zásoby plasticity snižuje. [I-9]

## 9. Závěr

V disertační práci je popsána problematika chování materiálu při plošném tváření. Teoretická část práce je především zaměřena na chování materiálu při změně rychlosti deformace.

V rámci práce byl řešen konstrukční návrh umožňující sledování chování materiálu na změnu rychlosti deformace. Byl realizován návrh konstrukčního řešení funkčních částí, systému upínání zkušebních vzorků, návrhu konstrukce z hlediska dostatečné energie pro realizaci deformace. Byl řešen návrh vhodných snímačů k popisu vlastního děje. [I-1, I-2, I-3]

Byl vytvořen software, který umožňuje analyzovat průběh zkoušky z hlediska síly v závislosti na čase či poloze zkušebního nástroje. Z hlediska závislosti na poloze nástroje byl navržen snímač polohy – úhlový potenciometr. Vytvořený software umožňuje ovlivňovat přesnost popisu experimentu množstvím zpracovaných dat, umožňuje také vytvoření popisu průběhu realizované zkoušky. [I-3,]

Byla vytvořena metodika zkoušení, která popisuje podmínky pro její realizaci. Navržená metodika respektuje široké spektrum situací, které mohou při zkoušení nastat. [I-2, I-3, I-4]

Vlastní konstrukční řešení, vytvořený software a navržená metodika byly ověřeny na zkušebních vzorcích materiálové jakosti DC06+ZE50/50-B-PO. Pro tuto jakost byly podle metodiky připraveny zkušební vzorky, které byly testovány podle navržené metodiky. Bylo ověřeno, že navržené konstrukční řešení i navržená metodika umožňují realizaci pozorování chování materiálu při různých rychlostech deformace a realizovat porovnání s běžně používanými statickými zkouškami ověřující chování materiálu pro operace hlubokého tažení.

Následně bylo ověřeno chování materiálové jakosti DC06+ZE50/50-B-PO. Pro experimenty byly voleny úhly dopadu nástroje 20°, 30° a 40°. Získaná data byla analyzována a vyhodnocena. [I-5, I-6, I-7]

Ze získaných dat plyne, že při rostoucí rychlosti deformace klesají plastické vlastnosti materiálu. To je patrné z hlediska limitních deformací získaných jednak z velikosti energie a charakteru šíření trhliny získané pomocí snímačů navrženého zařízení a jednak z porovnání výsledků velikosti deformace se zkouškou hlubokotažnosti podle Erichsena. [I-7, I-8, I-9]

Pro pokračování práce bude třeba věnovat se analýzám chování materiálu pro další navržené tvary zkušebních vzorků a další materiálové

jakosti. Bylo by vhodné výsledky této práce verifikovat pomocí numerických simulací.

Vzhledem k tomu, že z hlediska lisovacího procesu jsou výsledky provedených experimentů zajímavé a vzhledem k tomu, že se jedná o unikátní zařízení, bylo požádáno o přidělení patentu[I-10] a užitého vzoru [I-11]. S ohledem k této skutečnosti byla do určité míry omezena publikační činnost. Z provedených experimentů také plyne, že výsledky práce mohou být chápány jako jeden z prvních kroků pro vytvoření nového parametru, kterým bude možné popsat chování materiálu z hlediska citlivosti na rychlost deformace.

### **Splnění cílů práce**

- Konstrukční návrh zařízení pro sledování citlivosti materiálu na rychlost deformace při podmínkách blízcích se reálnému lisovacímu procesu.

Bylo vytvořeno konstrukční řešení zařízení pro sledování citlivosti materiálu na rychlost deformace. Toto zařízení je detailně popsáno výkresovou dokumentací (Příloha 1). Pro jeho ověření bylo toto zařízení postaveno, osazeno navrženými snímači a byly na něm provedeny experimenty. **Cíl byl splněn.**

- Návrh SW pro vyhodnocení průběhu zkoušky a popis práce s tímto SW.

Byl navržen software, který dokáže ze snímačů registrovat a analyzovat data o průběhu zkoušky. Software umožňuje provádět vyhodnocení průběhu zkoušky. **Cíl byl splněn.**

- Návrh metodiky zkoušky pro sledování citlivosti na rychlost deformace na navrženém zkušebním zařízení.

Byla navržena metodika, která je v práci podrobně popsána. Pomocí této metodiky je možné provádět její ověřování a analýzu chování materiálu pro různé materiálové jakosti. **Cíl byl splněn.**

- Ověření navržené metodiky na zkušebních vzorcích

Byly vytvořeny zkušební vzorky z materiálové jakosti DC 06, které byly testovány na navrženém zkušebním zařízení dle navržené metodiky. Byla ověřena funkčnost zařízení i vlastní metodiky, zařízení a metodiku je možné používat pro popis chování materiálu při různých rychlostech defromace. **Cíl by splněn.**

- Ověření chování materiálové jakosti DC 06 dle navržené metodiky

Na vybraných šaržích materiálové jakosti DC 06 bylo ověřeno chování materiálu při různých rychlostech defromace. Získané celkové výsledky z průběhu měření byly porovnány s výsledky hlubokotažnosti dle Erichsena. **Cíl byl splněn.**

## Literatura

- [1] PETRUŽELKA, J., SONNEK, P. *Tvařitelnost kovových materiálů*. Ostrava: VŠB, 2007. 211 s.
- [2] *Masarykova univerzita: Pedagogická fakulta. Fyzikální základy vědy o materiálu*. 2006. Dostupné z WWW:<<http://www.ped.muni.cz>>.
- [3] ČERMÁK, J. *Teorie a metodika tváření: Volba výrobní technologie*. Praha: ČVUT FS, 434s.
- [4] ŽÍDEK, M., *Metalurgická tvařitelnost ocelí za tepla a za studena*. Praha: ALEKO, 1995, 356 s.. ISBN 80-85341-45-X .
- [5] PETRUŽELKA, J., HRUBÝ, J. *Strojírenské tváření I*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2002. 152 s.
- [6] PETRUŽELKA, J., BŘEZINA, R. *Úvod do tváření I*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2001. 161 s.
- [7] MACHEK, V., SODOMKA, J., *Speciální kovové materiály*. ČVUT v Praze, 2008, ISBN 978-80-01-04212-0, 118 s.
- [8] MÍŠEK, M., *Vliv mikrostruktury na vlastnosti litých ocelí mikrolegovaných Vanadem a Titanem*, ZČU v Plzni, Fakulta strojní, 2009, 8 s.
- [9] ŽÍDEK, M., DĚDEK, V., SOMMER, B. *Tváření oceli*. Praha: STNL, 1988. 520 s.
- [10] HAŠEK, V., et al. *Lisování*. Praha: SNTL. 1971. 542 s.
- [11] ČERMÁK, J. *Teorie a metodika tváření: Volba výrobní technologie*. Praha: ČVUT FS, 434s.
- [12] ČSN EN ISO 6892-1 *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*, 2010, 76 s.
- [13] ČSN ISO 10275 (420436). *Kovové materiály – Plechy a pásy – Stanovení exponentu deformačního zpevnění tahem*, 2008, 12 s.
- [14] ČSN ISO 10113 (420435). *Kovové materiály – Plechy a pásy – Stanovení součinitele plastické anizotropie plechů a pásů*, 2009, 16s.

- [15] CHEN, Y., RAO, A.S, ALEXANDREANU, B., NATESAN, K. *Slow strain rate tensile tests on irradiated austenitic stainless steels in simulated light water reactor environments*. In: Nuclear Engineering and Design. 2014, vol. 269, pp. 38-44. ISSN 0029-5493.
- [16] HAIDONG, Y., YONGJIN, G., XINMIN, L. *Rate-dependent behavior and constitutive model of DP600 steel at strain rate from  $10^{-4}$  to  $103\text{ s}^{-1}$* . In: Materials & Design. 2009, vol. 30, no. 7, pp. 2501-2505, DOI 10.1016/j.matdes.2008.10.001. ISSN 0261-3069.
- [17] JI-HOON, K., DAEYONG, K., HEUNG NAM, H., BARLAT, F., MYOUNG-GYU, L. *Strain rate dependent tensile behavior of advanced high strength steels: Experiment and constitutive modeling*. In: Materials Science and Engineering: A. 2013, vol. 559, pp. 222-231. DOI 10.1016/j.msea.2012.08.087. ISSN 0921-5093.
- [18] HUGHES, M.L., TEDESCO, J.W., ROSS, C.A. *Numerical analysis of high strain rate splitting-tensile tests*. In: Computers & Structures. 1993, vol. 47, no. 4-5, pp. 653-671. DOI 10.1016/0045-7949(93)90349-I. ISSN 0045-7949.
- [19] BOYCE, B.L., DILMORE, M.F. *The dynamic tensile behavior of tough, ultrahigh-strength steels at strain-rates from  $0.0002\text{ s}^{-1}$  to  $200\text{ s}^{-1}$* . In: International Journal of Impact Engineering. 2009, č. 36, pp. 263-271. DOI 10.1016/j.ijimpeng.2007.11.006.
- [20] ROHR, I., NAHME, H., THOMA, K. *Material characterization and constitutive modelling of ductile high strength steel for a wide range of strain rates*. In: International Journal of Impact Engineering. 2005, vol. 31, no. 4, pp. 401-433., DOI 10.1016/j.ijimpeng.2004.02.005. ISSN 0734-743X.
- [21] ESI GROUP. *State-of-the-Art: Metals Impact Analysis*. 2000, 12s
- [22] DOUBEK, P. *Výzkum deformačního chování vysokopevnostních plechů při vyšších rychlostech deformace* [Dizertační práce]. Liberec: TU v Liberci, 2006, 57s.
- [23] NÉMET, M., MIHÁLIKOVÁ, M.. *The Effect of Strain Rate on the Mechanical Properties of Automotive Steel Sheets*. In: Acta Polytechnika. 2013, vol. 53, no. 4, pp. 384-387.

- [24] VEGTER, H., VAN DEN BOOGAARD, A.H. *A plane stress yield function for anisotropic sheet material by interpolation of biaxial stress states*. In: International Journal of Plasticity. 2006, vol. 22, no. 3, pp. 557-580. DOI 10.1016/j.ijplas.2005.04.009. ISSN 0749-6419.
- [25] TATA STEEL, Corus Research, Development & Technology. *Corus-Vegter material model: Increased accuracy in PAM-STAMP™ 2G forming simulations*. Netherlands, 2007.
- [26] CAREL TEN HORN, et al. TATA STEEL. *Corus Research Development & Technology. The Corus-Vegter Lite material model: High accuracy with few parameters*. Mumbai.
- [27] TATASTEEL AUTOMOTIVE. *PAM-STAMP™ 2G 2008 Vegter Materials Database Files*. 2008.
- [28] MING - YAO LI. *Effect of strain rate sensitivity on FLDs — An instability approach*. In: International Journal of Mechanical Sciences, 2012, č. 64, pp. 7.
- [29] JIE, M., CHENG, C.H., CHAN, L.C., CHOW, C.L. *Forming limit diagrams of strain-rate-dependent sheet metals*. In: International Journal of Mechanical Sciences. 2009, vol. 51, no. 4, pp. 269-275. DOI 10.1016/j.ijmecsci.2009.01.007. ISSN 0020-7403.
- [30] KIM, S.B., HUH, H., BOK, H.H, MOON, M.B. *Forming limit diagram of auto-body steel sheets for high-speed sheet metal forming*. In: Journal of Materials Processing Technology. 2011, vol. 211, no. 5, pp. 851-862. DOI 10.1016/j.jmatprotec.2010.01.006. ISSN 0924-0136.
- [31] ZIEGELHEIM, J. *Progress in effective characteristics of automotive sheets* [Dizertační práce]. Praha: ČVUT FS, 2002. Vedoucí práce Jiří Janovec.
- [32] ŠLAIS, M. *Studium vlivu rychlostních a teplotních parametrů na tvaritelnost Ti slitin* [Dizertační práce]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012, 115s.
- [33] DOHNAL, I. *Ověření možnosti využití tahové deformace při Hopkinsonově testu* [Dizertační práce]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2014.
- [34] PETERS, P., MANOPULO, N., LANGE, CH., HORA, P., *A strain rate dependent anisotropic hardening model and its validation*



- through deep drawing experiments*. In: Journal of Material Forming. 2013, vol. 7, pp. 447-457. DOI 10.1007/s12289-013-1140-0.
- [35] ROBERT RAISCH, S., MÖGINGER, B. *High rate tensile tests – Measuring equipment and evaluation*. In: Polymer Testing. 2010, vol. 29, no. 2, pp. 265-272. DOI 10.1016/j.polymertesting.2009.11.010. ISSN 0142-9418.
- [36] GOTOH, M., YAMASHITA, M. *Chaotic behavior of an elastoplastic bar in tensile test over a wide range of strain rate: a numerical investigation*. In: International Journal of Mechanical Sciences. 2000, vol. 42, no. 8, pp. 1593-1606. DOI 10.1016/S0020-7403(99)00092-2. ISSN 0020-7403.
- [37] MACHÁLEK, J., et al. *Simulace procesů plošného tváření v softwaru PAM - STAMP 2g*. Ostrava: VŠB - TU, 2012, 120 s.
- [38] PILVOUSEK, T. *Vliv vybraných šarží materiálu DC06 na tvářitelnost při plošném tváření* [Diplomová práce]. Praha, 2009, 96 s.
- [39] ČSN EN ISO 14556. *Ocel - Zkouška rázem v ohybu na kyvadlovém kladivu tyčí Charpy s V-vrubem: Instrumentovaná zkušební metoda*. Praha: Český normalizační institut, 2001, 20s.
- [40] Kistler. *Potentiometric Angle Sensor*. 2013, 2s.
- [41] Kistler. *1-Channel Piezotron® Coupler*. 2013, 3s.
- [42] Kistler. *XY Monitor*. 2013, 2s.
- [43] ČSN EN 10152: *Ocelové ploché výrobky válcované za studena elektrolyticky pozinkované pro tváření za studena – Technické dodací podmínky*, 2009, 20s.
- [44] Stahl-Informationen-Zentrum, Düsseldorf. *Schmelztauchveredeltes Band und Blech*. 2008, 47 s.
- [45] Stahl-Informationen-Zentrum, Düsseldorf. *Elektrolytisch verzinktes Band und Blech*. 2008, 33 s.
- [46] TATÍČEK, F. *Vliv citlivosti vybraných materiálů na rychlost posuvu příčnicku při zkoušení tahem*. [Dizertační práce]. Praha: ČVUT FS, vedoucí práce Jan Šanovec

## **Publikace vztahující se k disertační práci**

- [I-1] OUŠKA, M., KUBELKA, M., et al. *Zkušební zařízení pro zjišťování vlivu rychlosti deformace*. In: Technologické fórum. Praha, 2012, 6s.
- [I-2] KUBELKA, M., TATÍČEK, F., CVEŠPER, D., PAČÁK, T., HAŠKOVÁ, I. *The Methodology Determining the Size of the Shear Stress on the Specific Samples*. In: Proceedings of International Conference on Innovative Technologies IN-TECH 2014. Rijeka: Faculty of Engineering University of Rijeka, 2014, pp. 369-372. ISSN 1849-0662.
- [I-3] PILVOUSEK, T., ŠANOVEC, J., TATÍČEK, F., KUBELKA, M. *Sledování vlivu okrajových podmínek na lisovatelnost velkoplošného dílu automobilové karoserie pomocí numerických simulací s reálnými, 3D skenovanými daty nástrojů*. In: Technological Forum 2011. Praha: ČVUT FS, Ústav strojírenské technologie, 2011, pp. 64-71. ISBN 978-80-01-04853-5.
- [I-4] KUBELKA, M., PAČÁK, T., TATÍČEK, F., VALEŠ, M., KUBELKOVA, I. *The new methodology of testing of metallic materials*. In: Proceedings of International Conference on Innovative Technologies IN-TECH 2017. ISSN 0184-9069, 5s.
- [I-5] KUBELKA, M., TATÍČEK, F., PAČÁK, T., SAGNER, P., CVEŠPER, D. *The Verification of Experimental Equipment for Forming*. In: Technological Forum 2014. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2014, pp. 81-85. ISBN 978-80-87583-10-4.
- [I-6] TATÍČEK, F., PAČÁK, T., KUBELKA, M. *The Analysis of Shear Test on the Test Specimen*. In: Technological Forum 2014. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2014, pp. 107-112. ISBN 978-80-87583-10-4.
- [I-7] TATÍČEK, F., TURZA, L., KUBELKA, M., *Vliv rychlosti deformace hlubokotažných ocelí na polohu FLC křivek*. Praha: ČVUT FS, 2012.
- [I-8] MRÁZEK, D., KUBELKA, M., KUBELKOVÁ, I., PILVOUSEK, T. *The Verification Determining the Size of the Deformations Using ARGUS*. In: Technological Forum 2015. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2015, pp. 90-96. ISBN 978-80-87583-13-5.
- [I-9] CVEŠPER, D., TATÍČEK, F., PAČÁK, T., KUBELKA, M., PILVOUSEK, T. *Verification of Determining the Plastic Strain Ratio and Tensile Strain Hardening Exponent*. In: Technological

Forum 2014. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2014, pp. 22-26. ISBN 978-80-87583-10-4.

- [I-10] KUBELKA, M., TATÍČEK, F., PAČÁK, T., ŠANOVEC, J., VALEŠ, M., *Patent -Způsob a zařízení pro destruktivní zkoušení základního materiálu pro proces hlubokého tažení při plošném tváření, (Pořadové číslo: D18053595, Spisová značka přihlášky: PUV 2018-254)*
- [I-11] KUBELKA, M., TATÍČEK, F., PAČÁK, T., ŠANOVEC, J., VALEŠ, M., *Užitný vzor -Zařízení pro destruktivní zkoušení základního materiálu pro proces hlubokého tažení při plošném tváření (Pořadové číslo: D18053604, Spisová značka přihlášky: PUV 2018-35018)*