

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav strojírenské technologie

DISERTAČNÍ PRÁCE

**Vliv citlivosti materiálu na rychlost deformace při reálném lisovacím  
procesu**

Autor: Ing. Martin Kubelka, IWE

Školitel: doc. Ing. Jan Šanovec, CSc.

Studijní obor: Strojírenská technologie

Praha 2018

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat svému školiteli, doc. Ing. Janu Šanovcovi, CSC. a Ing. Františku Tatíčkoví, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování mé disertační práce. Dále bych rád poděkoval pracovníkům VFS1 - Technický servis lisoven a svařoven, ŠKODA-AUTO, a.s. za poskytnutí materiálu pro zkušební vzorky. Také bych rád poděkoval své manželce Ing. Irence Kubelkové a mým rodičům za morální podporu a pomoc.

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou disertační práci vypracoval samostatně s využitím odborné literatury, podkladů, na základě konzultací a pod vedením mého školitele pana doc. Ing. Jana Šanovce, CSc.

V Praze, dne 31.5.2018

.....  
Ing. Martin Kubelka, IWE

**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, mechanické zkoušky materiálu, rychlost deformace

**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, Mechanical Test of Materials, Strain Rate

## Seznam použitých veličin

$\sigma$	Napětí	[MPa]
$\varepsilon$	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	[-]
$\varphi_b$	Skutečná deformace ve směru šířky vzorku	[-]
$\varphi_t$	Skutečná deformace ve směru tloušťky vzorku	[-]
$r_m$	Střední hodnota součinitele plastické anizotropie	[-]
$\Delta r$	Součinitel plošné anizotropie	[-]
$C$	Materiálová konstanta	[-]
$n$	Exponent deformačního zpevnění	[-]
$n_m$	Střední hodnota exponentu deformačního zpevnění	[-]
$KUT$	Komplexní ukazatel tvařitelnosti	[-]
$A_H$	Homogenní tažnost	[%]
$A_C$	Celková tažnost	[%]
$IT$	Index tvařitelnosti	[-]
$d$	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 <sup>-1</sup> ]

$\varphi$	Stupeň deformace	[-]
$t$	Čas	[s]
$\Delta l$	Změna délky zkušební tyče	[-]
$l_0$	Původní délka zkušební tyče	[-]
$v$	Rychlost pohybu nástroje	[mm.s <sup>-1</sup> ]
$l$	Dráha nástroje v daném okamžiku	[mm]
$k_p$	Přetvárná pevnost	[MPa]
$U$	Napětí	[V]
$F$	Deformační síla	[N]
$F_{max}$	Maximální deformační síla	[N]

### 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 tvažitelnosti	
<i>CAD</i>	Computer Aided Design	
<i>ATOS</i>	Advanced Topometric Sensor	

## Obsah

1	Úvod .....	11
2	Popis procesu výroby výlisku a možnosti ovlivňování jeho kvality .....	13
2.1	Výroba výlisku .....	13
2.1.1	Základní princip plastické deformace .....	13
2.2	Faktory ovlivňující kvalitu výlisku .....	15
2.2.1	Tvařitelnost materiálu .....	16
2.2.2	Základní faktory ovlivňující tvařitelnost .....	17
2.2.3	Zkoušení tvařitelnosti .....	19
2.3	Citlivost materiálu na rychlost deformace .....	21
2.3.1	Problematika rychlosti deformace .....	22
2.3.2	Popis rychlosti deformace.....	23
2.3.3	Vliv rychlosti deformace na tvařitelnost v praxi .....	26
2.3.4	Ukázka průběhu lisovacího procesu .....	30
2.4	Diagramy mezních přetvoření.....	33
2.4.1	Realizace diagramu FLD .....	33
2.4.2	Vliv rychlosti deformace na polohu křivek ve FLD.....	35
3	Cíle práce.....	37
3.1	Hypotézy práce.....	38
3.2	Hlavní cíle disertační práce .....	38
4	Návrh konstrukčního řešení zkušebního zařízení.....	39
4.1	Konstrukční řešení .....	40
4.1.1	Popis zkušebního zařízení.....	40
4.1.2	Návrh funkční plochy nástroje.....	43
4.1.3	Princip zkoušky.....	45
4.2	Snímací systémy.....	46
4.2.1	Úhlový potenciometr .....	46
4.2.2	Polovodičový tenzometr .....	47
4.2.3	Vyhodnocovací systém .....	48
4.2.4	Kalibrace polovodičového tenzometru .....	50
5	Návrh SW pro vyhodnocení průběhu zkoušky a popis práce s tímto SW.....	52
5.1	Základní popis vyhodnocovacího software.....	52



6	Návrh metodiky zkoušky pro sledování citlivosti na rychlost deformace na navrženém zkušebním zařízení.....	56
6.1	Příprava vzorků .....	56
6.2	Vytvoření měrné sítě .....	57
6.3	Zakládání zkušebního vzorku do nástroje.....	57
6.4	Zakládání nástroje do stroje .....	58
6.5	Nastavení softwaru.....	58
6.6	Příprava vysokorychlostní kamery pro měření .....	59
6.7	Provedení zkoušky .....	59
6.8	Vyhodnocení naměřených výsledků .....	60
7	Ověření navržené metodiky na zkušebních vzorcích .....	62
7.1	Ověření navržené metodiky .....	62
7.1.1	Příprava vzorků.....	62
7.1.2	Vytvoření měrné sítě.....	62
7.1.3	Zakládání zkušebního vzorku do nástroje .....	62
7.1.4	Zakládání nástroje do stroje.....	62
7.1.5	Nastavení softwaru .....	63
7.1.6	Příprava vysokorychlostní kamery pro měření.....	63
7.1.7	Provedení zkoušky.....	63
7.2	Vyhodnocení naměřených výsledků .....	64
8	Ověření chování materiálové jakosti DC 06 dle navržené metodiky .....	65
8.1	Popis materiálové jakosti DC06+ZE50/50-B-PO .....	65
8.2	Vyhodnocení naměřených výsledků .....	67
8.2.1	Vyhodnocení výsledků pomocí zkušebního stroje .....	67
8.2.2	Vyhodnocení testu podle Erichsena.....	69
8.2.3	Vyhodnocení výsledků pomocí vysokorychlostní kamery.....	70
9	Závěr.....	75
9.1	Splnění cílů práce .....	79
9.2	Přínosy práce .....	80
	Přílohy:.....	83
	Literatura.....	84
	Seznam obrázků:.....	93



## 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.

Dále se v automobilovém průmyslu významně projevuje trend snižování hmotnosti karoserie. Toho je možné dosáhnout několika způsoby, mezi které patří používání materiálů s nižší měrnou hmotností, či snižování tloušťky vstupního polotovaru. Z hlediska materiálů s nižší měrnou hmotností se nejčastěji používají materiály z hliníkových slitin. V případě těchto materiálů se však potýkáme s řadou problémů, mezi které patří specifika z hlediska konstrukce nástrojů, požadavky pro lisování, problémy se spojováním dílů, problémy při lakování, ale také vstupní cena polotovaru. U dalších materiálů splňujících podmínku nižší měrné hmotnosti je tato problematika z hlediska možného použití natolik zásadní, že se v nejbližší době nepředpokládá použití těchto materiálů v širším měřítku. Jedná se například o materiály ze slitin hořčíku, titanu apod. Zvláštní kapitolou jsou materiály sendvičové, kdy na plastové jádro jsou naválcované ocelové plechy. I zde je třeba se vypořádat s řadou problémů, mezi které patří problematika povrchových úprav (zvláště fosfátování), ale také jejich spojování.

Problematika snižování tloušťky představuje nebezpečí nedostatečné tuhosti výlisku či celé karoserie. To je možné řešit použitím materiálů o vyšší pevnosti, či je nutné jiného přístupu z pohledu konstrukce dílu. Velmi populární je tzv. dynamický design, který je charakteristický ostrými hranami a přechody na karoserii. Ty jsou důležité z hlediska zajištění dostatečné tuhosti výlisku, ale také jsou velmi oblíbené u zákazníků. Avšak 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 problém zhoršování tvařitelnosti, což celou situaci ještě více zhoršuje.

Typickým příkladem hromadné výroby je automobilový průmysl a výroba karosářských dílů automobilů, kdy je během 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

vedoucího zpravidla ke zkracování výrobního času, či požadavku nasazování nových druhů materiálu. Z hlediska zkracování výrobního času je možné zkracovat v oblasti neproduktivní části operace, což je možné realizovat mimo jiné například pomocí tvářecích strojů se servopohonem, či zrychlování pohonu tvářecího stroje. Zvláště v případě zrychlování kinematiky pohybu tvářecího stroje probíhá tvářecí operace rychleji, jsou dosahovány vyšší rychlosti deformace. Z praxe se ověřuje, že s vyšší rychlostí kinematiky procesu se zvětšuje riziko vzniku vad. Při realizaci tvářecího procesu je pak třeba se zabývat eliminací těchto výrobních defektů. Z tohoto hlediska jsou nebezpečné defekty, mezi které patří trhliny, zvlnění, mechanická poškození povrchu či nepřípustná ztenčení plechu.

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. 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. 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 a možnosti ovlivňování jeho kvality

Vlastní výroba dílů karoserie automobilů je technicky i technologicky velmi složitý proces s řadou ovlivňujících faktorů. Na výlisky je kladen požadavek na tvorbu komplikovaných tvarů s minimálním počtem výrobních kroků a 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 výlisku

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

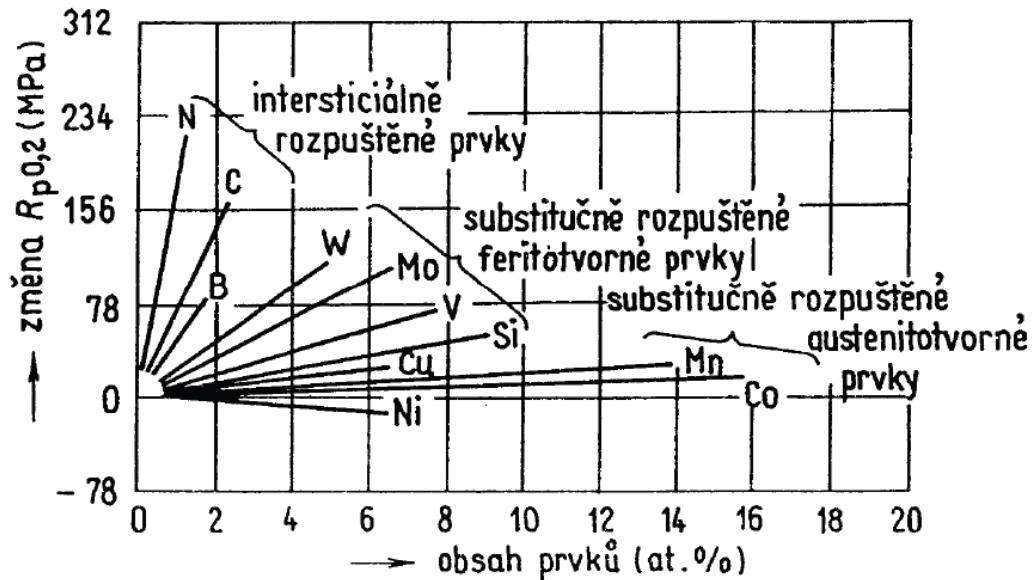
#### 2.1.1 Základní princip plastické deformace

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]

- *kluzový mechanismus* – je převažující. Vrstva atomů se pohybuje ve směru působícího napětí, až vystoupí na povrch, pokud se nezachytí o překážky uvnitř krystalu. Atomy se tedy posunují proti sobě postupně, ne současně. Pokud se pohyb dislokace zastaví, je třeba k další plastické deformaci zvýšit napětí. Při tváření za studena proto tvářený materiál klade stále větší odpor, hovoříme, že dochází k jeho zpevnění. Přesuny atomů vážnou, plasticita (tvárnost) kovu se vyčerpává a může dojít k porušení materiálu.
- *dvojčatění* - přeskupuje část krystalu tak, že se celá mřížka nejdříve natočí do příznivé polohy pro skluz a následně se část natočeného krystalu skluzem deformuje.

Zpevnění 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 intersticiálního 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).

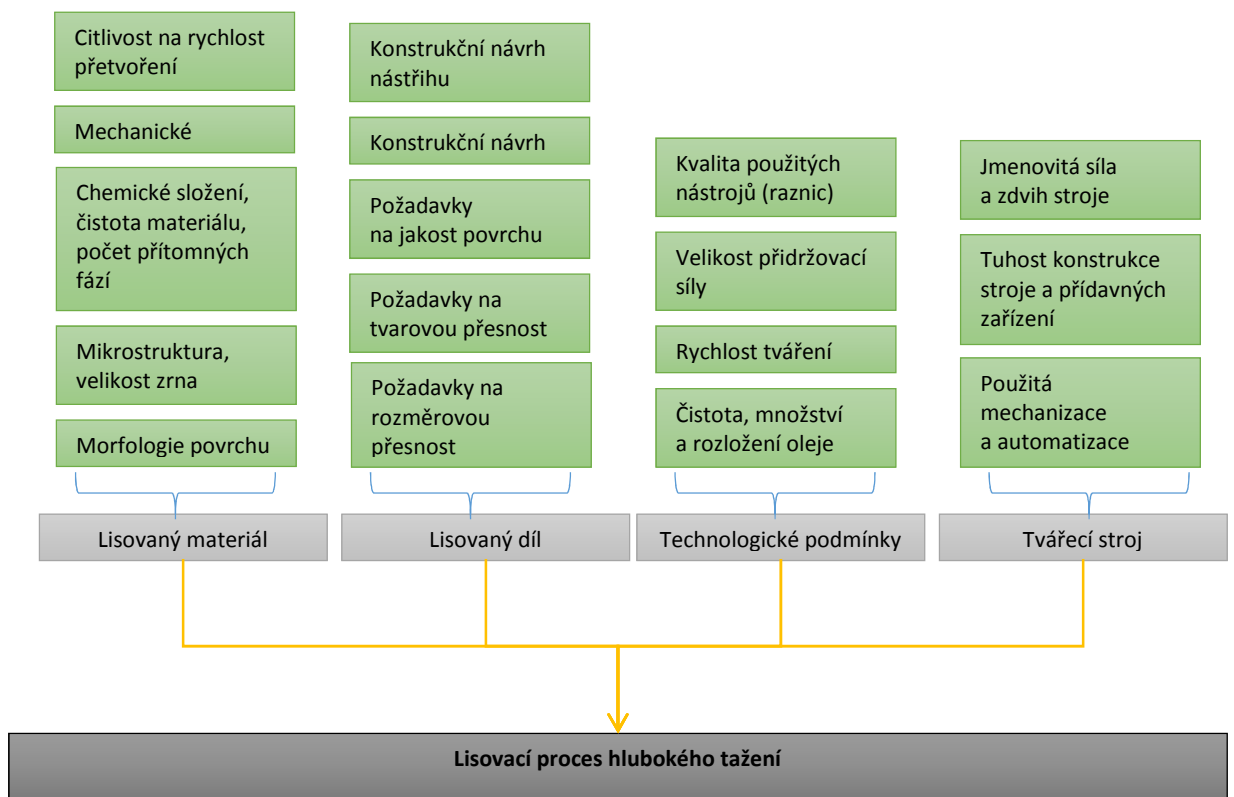
Všechny zpevňující prvky zhoršují technologickou tvařitelnost. Austenit více zpevňuje, je však za studena lépe tvárný než ferit. Podíl 35 až 65 % feritu v austenitické struktuře prudce snižuje plasticitu.

Lépe tvárná je hrubozrnná struktura, škodlivá je nerovnoměrnost zrn a heterogenita jednotlivých fází. Všechny další strukturní složky zhoršují tvařitelnost, nejvíce vměstky (tvořené sulfidy a hlavně oxidy) vyloučené v hrubých útvarech a shlucích. Karbidy jsou škodlivé ve formě hrubých jehlic a sít'oví po hranicích zrn. Největší zhoršení tvařitelnosti nastává ve smíšené heterogenní struktuře lamelárních a globulárních karbidů ve spojení s nerovnoměrným zrnem. Postupné usměrňování jednotlivých strukturních fází do hlavních směrů deformace vede ke vzniku řádkovitých útvarů, což má za následek anizotropii strukturních i mechanických vlastností materiálu.

U plochých vývalků rozeznáváme anizotropii plošnou a normálovou. Rozhodující vliv na anizotropii má textura, definovaná jako pravidelné geometrické a krystalografické uspořádání struktury a substruktury polykrystalického kovu (strukturní, krystalografická – vznik tzv. vláknité nebo řádkovité struktury, kterou nelze odstranit tepelným zpracováním; dále může vznikat rekrytalizační textura s odlišnou krystalografickou orientací rekrytalizovaných krystalů oproti krystalům deformovaným.

## 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 přidržovací síly, vliv přidržovačů), 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. Přehled faktorů ovlivňující lisovací proces je uveden na Obr. 2.



Obr. 2: Přehled faktorů ovlivňující lisovací proces

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. Nejprve byly vytipovány podmínky, pro které se předpokládal největší význam na lisovací proces nebo popis jejich vlivu nepředstavoval velké úsilí. S postupem času, jak rostla úroveň poznání, bylo v zájmu získávání poznatků pro stabilitu procesu nutné zabývat se parametry s menším významem nebo s obtížněji popsatelnými podmínkami. V současné době, kdy je kladen požadavek na zkracování taktu výroby, snižování výrobních nákladů, zrychlování procesu výroby narůstají další požadavky na popis faktorů pro další zvýšení stability výrobního procesu.

Materiály jsou v současné době hodnoceny především pomocí mechanických hodnot. Tento parametr se však, s ohledem na praktické zkušenosti, jeví jako nedostačující k popisu a členění lisovaných materiálů, jelikož dostatečně nevypovídá o kvalitách materiálu. Materiálové jakosti používané pro výrobu výlisků mají poměrně široký interval mechanických hodnot, což může způsobovat problémy při lisování. Z důvodu problémů při výrobě výlisků vyplynula nutnost zavádět další kritéria pro popis materiálu, mezi které můžeme zařadit chemické složení, jakost povrchu, citlivost na rychlost přetvoření, mikrostrukturu materiálu, vliv vměstků a velikosti zrn.

### 2.2.1 Tvařitelnost materiálu

Pro popis problematiky je třeba nejprve vysvětlit řadu pojmů. Jedním z nich je plastičnost, což je schopnost materiálu se plasticky deformovat od počátečních po limitní deformace. Počáteční deformace představuje rozhraní pružného a plastického stavu, limitní deformace představuje počátek porušení. Tvařitelnost je schopnost tělesa plasticky se deformovat za určitých podmínek tvářecího procesu až do vzniku porušení [4, 6].

Tvařitelnost závisí na plastičnosti materiálu, geometrii tvářeného tělesa a podmínkách tváření. Dále můžeme hovořit o metalurgické tvařitelnosti, která vyjadřuje vliv metalurgických faktorů na tvařitelnost za daných podmínek (teploty, stavu napjatosti, rychlosti deformace aj.).

Přetvárná pevnost je vnitřní napětí, které vzniká ve tvářeném tělese jako reakce na působení vnějších tvářecích sil. Velikost tohoto napětí musí být taková, aby byla vyvolána plastická deformace [10, 11].



Faktory ovlivňující tvařitelnost je možné rozdělit do 4 skupin:

*1) Fyzikálně-metalurgické faktory*

Jedná se o faktory související s materiálovými vlastnostmi (především chemické složení materiálu), strukturním stavem (chemické složení ve vztahu ke způsobu výroby), tepelně aktivované děje (difúzní schopnosti materiálu – zpevňovací a odpevňovací děje).

*2) Termomechanické činitele tváření*

Tyto faktory souvisí s teplotou (interval tvářecích teplot a s ní související deformační odpor), vliv deformačních rychlostí, deformační historie.

*3) Stav napjatosti*

*4) Technologické podmínky výroby*

### 2.2.2 Základní faktory ovlivňující tvařitelnost

*1) Vliv strukturního stavu*

Obecně platí, že nejvyšší tvařitelnost mají čisté homogenní kovy (ovlivněno především čistotou hranic zrn, počtem kluzných rovin, počtem překážek pro pohyb dislokací, rychlost uzdravování při tváření za tepla). Kovy s KPC mřížkou mívají v závislosti na teplotě monotónní průběh tvařitelnosti, kovy typu KSC mají za nižších teplot sklon ke křehkosti. Deformační chování slitin s monofázovou strukturou je ovlivněno vlastnostmi a množstvím přísadového prvku. Vyšší zpevnění je výsledkem porušení mřížky základního kovu se substitučně či intersticiálně umístěnými atomy dalších prvků. Dvoufázovou strukturou (např. ferit + austenit) se tvařitelnost výrazně snižuje. Ve slitinách s heterogenními strukturami se vyskytují i chemické sloučeniny (např. vměstky), eutektika, nerozpuštěné prvky (hlavně Pb, Cu, Sn aj.). To vše blokuje kluzový mechanismus plastické deformace a většinou i zeslabuje kohezní pevnost hranic zrn, čímž se významně zhoršuje tvařitelnost [4, 6, 8].

V technických slitinách jsou ale známé případy, kdy lze přidáním některého prvku do složení materiálu plasticitu zvýšit. Jedná se o prvek, který na sebe váže jiné prvky blokující plasticitu. Mezi takové prvky patří mangan, vanad, niob a titan. Tyto prvky jsou

přidávány do složení ocelí, aby na sebe vázaly dusík a uhlík. Dalším prvkem zvyšujícím tvárné schopnosti materiálu je hliník (stabilizátor ocelí).

Chemické prvky v materiálu rozlišujeme na doprovodné (popř. škodlivé), které se dostanou do ocelí metalurgickým procesem výroby, a prvky legující, které jsou do ocelí dodávány za účelem zlepšení vybraných vlastností.

### 2) *Vliv vměstků v oceli*

Vměstky tvořené většinou sulfidy, oxidy a jejich směsmi vznikají zejména ve fázi tuhnutí kovového materiálu. Mají nepříznivý vliv na tvařitelnost, protože se vyznačují malou soudržností s matricí, mají odlišné mechanické vlastnosti, iniciují vznik trhlin a mohou tvořit síťoví po hranicích zrn.

Vměstky téměř vždy zhoršují tvařitelnost, při řádkovitém uspořádání zvyšují anizotropii mechanických vlastností. Jejich vliv závisí na chemickém složení, množství, morfologii a způsobu výskytu. Nejméně škodlivé jsou globulitické vměstky s vysokou teplotou tání, rovnoměrně rozptýlené v matrici. Nejškodlivější jsou vměstky nízkotající, vyloučené ve formě síťoví po hranicích zrn. Řeší se problematika indexu tvařitelnosti vměstků.

Snížení nepříznivého vlivu vměstků je možné omezením jejich výskytu, změnou způsobu výskytu a změnou typu a morfologie (snahou je donutit síru a kyslík navázat se na takové prvky, s nimiž tvoří sloučeniny s vysokou teplotou tání, proti tomu je třeba se vyhnout vměstkům a eutektikům s vysokým obsahem Fe).

### 3) *Vliv chemického složení*

Legující a příměsové prvky je nutné posuzovat z těchto hledisek:

- ovlivňování teplot fázových přeměn a strukturního stavu,
- rozpustnost, resp. způsob výskytu nerozpustných příměsí,
- afinita k C, O, S, N aj., vlastnosti příslušných sloučenin,
- ovlivnění kinetiky tepelně aktivovaných dějů (zejména rekystalizace),
- rozdílnost atomů daného prvku a železa (míra zpevňování tuhého roztoku),

- vliv na technologické parametry ohřevu a tváření (tepelná vodivost a roztažnost, vliv na vnější tření či šíření aj.).

### 2.2.3 Zkoušení tvařitelnosti

Komplexní přístup k výzkumu deformačního chování materiálu vyžaduje [6]:

- rozbor mechanických vlastností a chemického složení zkoumaného materiálu včetně mikro rozborů a zjištění vazeb vybraných prvků,
- metalografický výzkum makrostruktury i mikrostruktury,
- plastometrické experimenty realizované na speciálních přístrojích v podmínkách odpovídajících příslušné technologické operaci,
- popřípadě doplňkové technologické zkoušky či zjednodušenou fyzikální nebo počítačovou simulaci konkrétního tvářecího procesu.

Z ekonomických důvodů je většinou prováděno pouze ověřování mechanických vlastností. Po neúspěšných výsledcích je stanovováno chemické složení, dále pak ověřování vlastností pomocí technologických zkoušek tvařitelnosti. Takto získané poznatky je možné jen obtížně zevšeobecnit. Tvařitelnost za studena se nejčastěji hodnotí zkouškou tahem při pokojové teplotě [12]. Požadovány jsou nízké hodnoty meze kluzu  $R_e$  (resp.  $R_{p0,2}$ ) či pevnosti  $R_m$  a vysoké hodnoty tažnosti např.  $A_{80mm}$  a kontrakce

Oblast homogenních plastických deformací (při zkoušce tahem) je možné obvykle popsat chování materiálu mocninným vztahem typu  $\sigma = C\varepsilon^n$ .

Vyšší hodnota exponentu deformačního zpevnění  $n$  bývá spojena s lepší tvařitelností, protože je výrazněji ovlivněná strukturním zpevněním výchozího materiálu než dislokačním zpevněním. Pro hodnocení hlubokotažnosti se též používá součinitel plastické anizotropie, vyšší hodnoty představují lepší tvařitelnost. Pro zjišťování zásoby plasticity jsou využívány diagramy mezních přetvoření, tzv. FLD diagramy.

Základní zkouškou, ze které lze získat vypovídající hodnoty o mechanických vlastnostech materiálu je zkouška tahem, kterou definuje norma ČSN EN ISO 6892-1 [12]. Výsledkem této zkoušky jsou napětíové a deformační charakteristiky, kterými lze hodnotit tvárnost daného materiálu. Princip zkoušky spočívá v jednoosém zatěžování zkušební plochého vzorku, až bude překročena hodnota meze kluzu materiálu  $R_e$ . Mez kluzu charakterizuje přechod mezi elastickou a elasticko – plastickou oblastí zatěžovací

křivky. V tahovém diagramu se mez kluzu vyskytuje výraznou ( $R_{eH}$ ) nebo nevýraznou ( $R_{p0,2}$ ) závislostí.

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad [\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}] \quad (1)$$

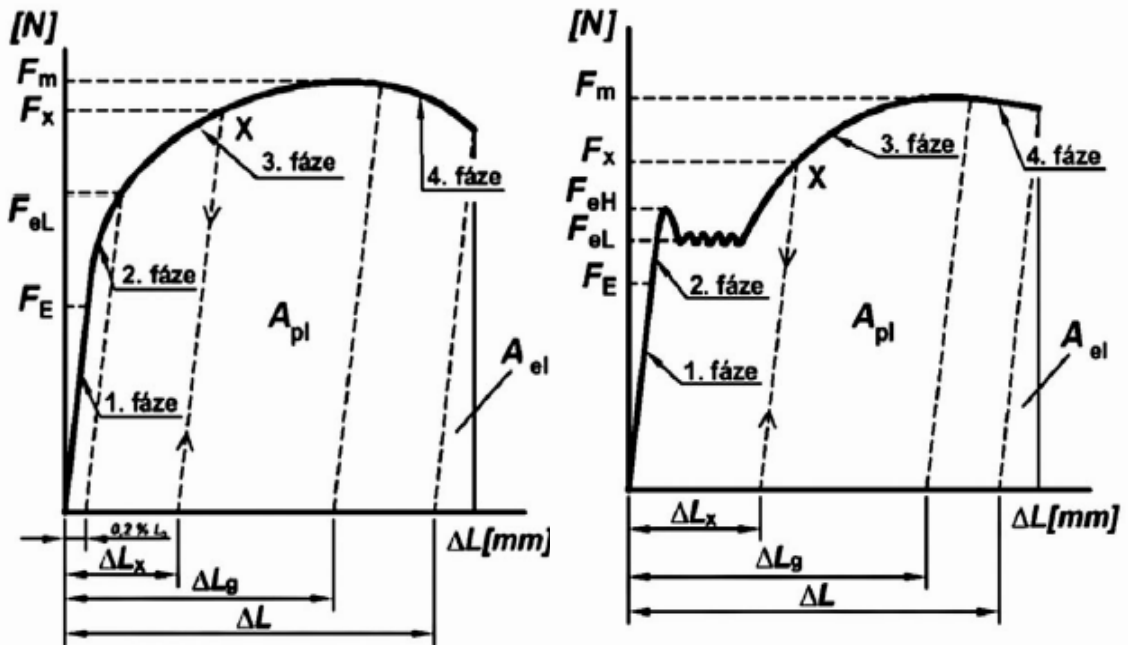
V tahovém diagramu se mez kluzu vyskytuje výraznou ( $R_{eH}$ ) nebo nevýraznou ( $R_{p0,2}$ ) závislostí.

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} \quad [\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}] \quad (2)$$

Mez pevnosti v tahu  $R_m$  je chápána jako smluvní napětí, odpovídající největšímu zatížení  $F_m$ , které předchází porušení deformovaného materiálu.

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad [\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}] \quad (3)$$

Mez kluzu a mez pevnosti jsou mechanické vlastnosti a jako takové jsou funkcí daného materiálu. Pro vyjádření mechanických vlastností (mez kluzu a pevnosti, tažnost a kontrakce) se používají diagramy, které jsou výstupem ze zkoušky tahem. Rozlišujeme graf s výraznou (Obr. 4) či nevýraznou mezí kluzu (Obr. 3).



Obr. 3: Pracovní diagram bez výrazné meze kluzu [7]

Obr. 4: Pracovní diagram s výraznou mezí kluzu [7]

Jako jeden z ukazatelů tvažitelnosti je poměr meze kluzu a meze pevnosti. Pro poměr  $R_e / R_m$  z hlediska plastičnosti platí následující intervaly:

$R_e / R_m \in <0,55 \div 0,65> \Rightarrow$  vynikající plastické vlastnosti,

$R_e / R_m \in <0,65 \div 0,75> \Rightarrow$  horší plastické vlastnosti.

Tažnost  $A$  je trvalé prodloužení měřené délky po lomu. Stanovuje se výpočtem na základě změřené konečné délky  $L_u$ , nebo odečtem z tahového diagramu.

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} = \frac{(\Delta L_u)_{pl}}{L_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4)$$

Exponent deformačního zpevnění  $n$  je brán jako jeden z hlavních ukazatelů hlubokotažnosti. Vysoká hodnota  $n$  brání vzniku lokalizaci deformace a působí rovnoměrné rozdělení deformace při dvojosém tahu. Z hlediska tvařitelnosti je požadováno, aby byla hodnota  $n$  vyšší než 0,21. Tato hodnota je brána také jako kritérium vynikající tažnosti a lze ji dosáhnout u materiálů s optimální velikostí zrna a minimálním obsahem volných atomů C a N. Naopak hodnota  $n$  nižší než 0,21 je brána jako kritérium špatné tažnosti. [13, 4]

Součinitel plastické anizotropie vyjadřuje poměr skutečné deformace šířky  $\varphi_b$  ke skutečné deformaci tloušťky  $\varphi_t$  při jednoosém zatěžování. Vyjadřuje nerovnoměrnost mechanických vlastností v rovině plechu.

Jak uvádí definice, součinitel plastické anizotropie vyjadřuje rozdílné vlastnosti materiálu v závislosti na poloze při tváření. V praxi je důkazem anizotropie válcování plechů, kdy je velmi důležitý směr válcování. Pokud je následně válcovaný plech ohýbán, má rozlišné vlastnosti ve směru vláken a kolmo na směr vláken. Doporučuje se ohýbat po směru vláken, jelikož pokud bude materiál ohýbán kolmo na směr vláken, dochází k praskání materiálu v oblasti ohybu. Součinitel plastické deformace je definován normou ČSN ISO 10113 [14].

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

Tato kapitola je věnována vysvětlení problematiky rychlosti deformace a jejímu vlivu na proces lisování [15, 16, 17, 18].

### 2.3.1 Problematika rychlosti deformace

Jak již bylo uvedeno, oblast výroby výlisků ovlivňuje řada faktorů. Z hlediska současného poznání roste význam rychlosti deformace. Výzkumné práce se této problematice věnují z několika hledisek: vysoké rychlosti deformace, tváření neželezných kovů či ocelových středně a vysoce pevných materiálů, popř. tvorbě materiálových modelů pro numerické simulace tvářecích procesů.

Z hlediska oblasti výzkumu zabývající se vysokými rychlostmi deformace je řešena problematika pro rychlosti od  $1 \text{ s}^{-1}$  (až cca  $500 \text{ s}^{-1}$ ). Tyto rychlosti deformace jsou však z hlediska lisovacího procesu nereálné. Problematika takto vysokých rychlostí deformace je řešena z hlediska např. bariérových zkoušek a věnuje se jí řada literárních pramenů, mezi kterými je možné uvést například [19, 20, 21].

Další oblastí je citlivost na rychlost deformace pro neželezné kovy, mezi které patří slitiny hořčíku a slitiny hliníku.

Někteří autoři se věnují popisu chování materiálu pro různé rychlosti deformace z hlediska chování středně a vysoce pevných ocelových materiálů, mezi které je možné uvést oceli typu DP: Avšak materiálové jakosti středně a vysoce pevných ocelí nejsou používány pro tvarově složité výlisky. Nejčastěji je popisován materiál typu DP500 či DP600. Problematika je citována například v [22, 23].

Tvorba materiálových modelů pro numerické simulace je především doménou firmy TATA STEEL jejímž produktem je Corrus Vegter, který umožňuje sledování chování materiálu také z hlediska rychlosti deformace. Problematika je popsána v pramenech [24, 25, 26, 27].

Ve zdrojích je také sledována poloha křivek FLD v závislosti na rychlosti deformace. Toto řešení je však zaměřeno na vysoké rychlosti deformace nebo pro materiály vyšších pevností, mezi které patří například materiálová jakost DP600. Jako příklad je možné uvést literární zdroj [28, 29, 30, 31].

Problematice se věnují některé disertační práce [22, 31, 32, 33]. Jejich zaměření je především na vysoce pevné oceli či na vysoké rychlosti deformace.

### 2.3.2 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].

$$\text{Poměrná deformace je definována: } \varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (5)$$

$$\text{Pro velkou deformaci je počítána skutečná deformace: } \varphi = \ln \frac{l_1}{l_0} \quad (6)$$

Z hlediska popisu velikosti deformace má skutečná deformace řadu výhod. Pro určitou velikost deformace v tahu i tlaku mají identickou hodnotu, rozdíl je pouze ve znaménku. Pro zjištění celkové deformace je možné její přírůstky sčítat. Z hlediska změny objemu (při zachování objemu) je možné deformace vyjádřit vztahem:

$$\varphi_x + \varphi_y + \varphi_z = 0 \quad (7)$$

Velké plastické deformace lze popsat z vektoru posunutí nebo z vektoru rychlosti toku materiálu. Při velkých deformacích je výstižnější posuzovat okamžitý obraz situace toku materiálu, než vztah mezi počátečním a konečným stavem.

Na problematiku velikosti deformace je možno pohlížet i změnou polohy 2 bodů. Předpokládejme body  $M_0$  a  $N_0$ . Souřadnice  $M_0$  ( $x, y, z$ );  $N_0$  ( $x+dx, y+dy, z+dz$ ), délka úseku mezi těmito body je [34, 35, 36]:

$$dl_0^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 \quad (8)$$

Po deformaci (změně vzdálenosti bodů M a N) je délka úseku:

$$dl^2 = (dx + du)^2 + (dy + dv)^2 + (dz + dw)^2 \quad (9)$$

Přírůstky posunutí se určí dle vztahů:

$$du = \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial y} dy + \frac{\partial u}{\partial z} dz \quad (10)$$

$$dv = \frac{\partial v}{\partial x} dx + \frac{\partial v}{\partial y} dy + \frac{\partial v}{\partial z} dz \quad (11)$$

$$dw = \frac{\partial w}{\partial x} dx + \frac{\partial w}{\partial y} dy + \frac{\partial w}{\partial z} dz \quad (12)$$

Poměrné prodloužení v bodě M ve směru  $M_0N_0$  je:

$$\varepsilon_{MN} = \frac{dl - dl_0}{dl_0} \quad (13)$$

Dosazením přírůstků do délky úseku:

$$dl^2 = a_{xx}dx^2 + a_{yy}dy^2 + a_{zz}dz^2 + 2a_{xy}dxdy + 2a_{yz}dydz + 2a_{xz}dxdz \quad (14)$$

kde

$$a_{xx} = \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2; a_{xy} = \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right)\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\left(1 + \frac{\partial v}{\partial y}\right) + \frac{\partial v}{\partial x}\frac{\partial w}{\partial y} \quad (15)$$

$$a_{yy} = \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(1 + \frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2; a_{yz} = \frac{\partial u}{\partial y}\frac{\partial u}{\partial z} + \left(1 + \frac{\partial v}{\partial y}\right)\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\left(1 + \frac{\partial w}{\partial z}\right) \quad (16)$$

$$a_{zz} = \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 + \left(1 + \frac{\partial w}{\partial z}\right)^2; a_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z}\left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial v}{\partial x}\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\left(1 + \frac{\partial w}{\partial z}\right) \quad (17)$$

V literatuře je možné nalézt alternativní vyjádření deformací:

Lagrangeova

$$\frac{(l_1 - l_0)}{l_0} \quad (18)$$

Eulerova

$$\frac{(l_1 - l_0)}{l_1} \quad (19)$$

Prodloužení

$$\frac{l_1}{l_0}; \frac{l_0}{l_1} \quad (20)$$

Logaritmická (skutečná)

$$\ln \frac{l_1}{l_0} \quad (21)$$

Lagrangeova (tenzorová)

$$\frac{(l_1^2 - l_0^2)}{2l_0^2} \quad (22)$$

Eulerova (tenzometrická)

$$\frac{(l_1^2 - l_0^2)}{2l_1^2} \quad (23)$$

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

$$\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt} \quad [s^{-1}] \quad (24)$$



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

$$d\varphi = \frac{dl}{l_0} \quad [-] \quad (25)$$

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]:

$$\dot{\varphi} = \frac{v}{l} \quad [s^{-1}] \quad (26)$$

kde  $v$  je rychlost pohybu nástroje a  $l$  je dráha v daném okamžiku. Vztah (26) lze odvodit na základě skutečnosti, že:

$$\varphi = \ln \frac{l_0}{l_1} \quad [-] \quad (27)$$

po derivaci vztahu (28) dostáváme rovnici:

$$\dot{\varphi} = \frac{d(\ln \frac{l_0}{l_1})}{dt} \quad [s^{-1}] \quad (28)$$

z čehož vyplývá:

$$\dot{\varphi} = \frac{1}{l_1} \cdot \frac{dl_1}{dt} \quad [s^{-1}] \quad (29)$$

Rychlost pohybu nástroje lze vyjádřit jako poměr změny délky ke změně v čase:

$$v = \frac{dl_1}{dt} \quad [mm \cdot s^{-1}] \quad (30)$$

Po dosazení vztahu 30 do vztahu 29 dostáváme vztah určující relaci mezi deformační rychlostí a rychlostí pohybu příčnicku tahového stroje – vztah 26.

Pokud se na rychlost deformace budeme dívat jako na složky vektoru toku materiálu, je možné tyto složky vyjádřit jako parciální derivace složek posuvů dle času.

$$\dot{u} = \frac{\delta u}{\delta t} = v_x; \quad \dot{v} = \frac{\delta v}{\delta t} = v_x; \quad \dot{w} = \frac{\delta w}{\delta t} = v_z \quad (31)$$

Rychlost deformace je derivace deformace podle času:

$$\dot{\varepsilon}_x = \frac{\delta \varepsilon_x}{\delta t} = \left( \frac{\delta}{\delta t} \right) \left( \frac{\delta u_x}{\delta x} \right) = \left( \frac{\delta}{\delta x} \right) \left( \frac{\delta u_x}{\delta t} \right) = \left( \frac{\delta v_x}{\delta x} \right) \quad (32)$$

Podle toho:

$$\dot{\varepsilon}_y = \frac{\delta v_y}{\delta y}; \dot{\varepsilon}_z = \frac{\delta v_z}{\delta z}; \dot{\gamma}_{xy} = \frac{\delta v_x}{\delta y} + \frac{\delta v_y}{\delta x}; \dot{\gamma}_{yz} = \frac{\delta v_y}{\delta z} + \frac{\delta v_z}{\delta y}; \dot{\gamma}_{zx} = \frac{\delta v_z}{\delta x} + \frac{\delta v_x}{\delta z} \quad (33)$$

V technologické praxi se nejčastěji pohybuje rozsah deformačních rychlostí  $\dot{\varphi}$  od  $10^{-1}$  do  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ . Z hlediska tváření za studena nebyl dosud objeven zásadní faktor 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.

### 2.3.3 Vliv rychlosti deformace na tvařitelnost 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 [37, 38].

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.

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.

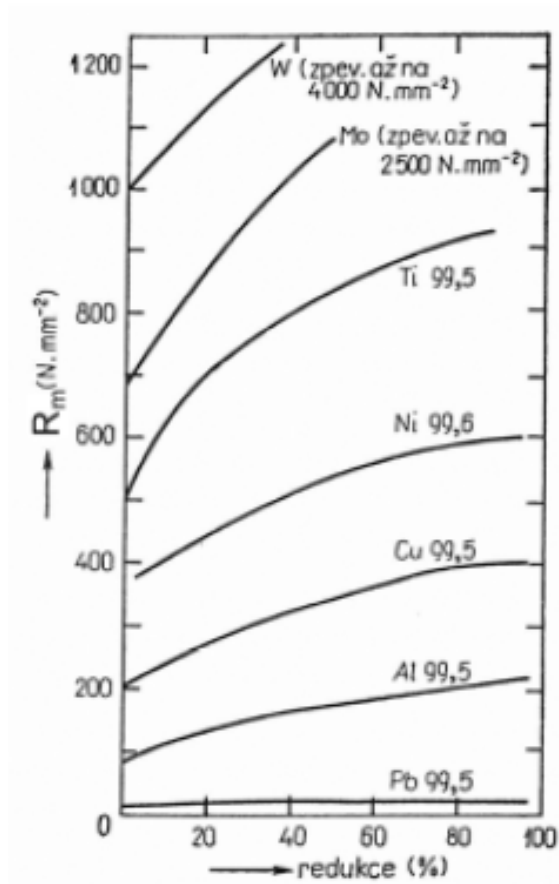
Vysoké tvářecí takty lisovacích linek způsobují, že je materiál tvářen velmi vysokou rychlostí a není schopen dostatečného přetvoření, prudce narůstá hustota dislokací a může dojít ke vzniku vnitřních defektů v materiálu. Extrémní nárůst hodnoty deformační rychlosti může mít za důsledek i skutečnost,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

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

$$k_p = C \cdot \varphi^n \cdot \dot{\varphi}^m \quad \left[ \frac{N}{mm^2} \right], \quad (34)$$

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

Hodnota  $C$  odpovídá přetvárné pevnosti pro rychlost deformace  $\varphi = 1$  a  $\dot{\varphi} = 1$ . Exponent  $m$  vyjadřuje citlivost materiálu na deformační rychlost, jedná se o materiálovou konstantu, která poukazuje na ovlivnění rychlostí deformace. Exponent  $m$  se zjišťuje pomocí základních technologických zkoušek a napodobujících technologických zkoušek. Zkoušení daného materiálu se provádí při různých rychlostech deformace, kde se sledují hodnoty přetvárného odporu, které se následně vynášejí do diagramu. Hodnota  $n$  vyjadřuje exponent deformačního zpevnění. Křivky zpevnění pro různé materiály lze vidět na Obr. 5. Exponent deformačního zpevnění lze určit např. podle Morrisona. Exponenty  $n$  a  $m$  jsou materiálovou konstantou a oba jsou závislé na homologické teplotě. V Tabulka 1 lze vidět poměr hodnot exponentu deformačního zpevnění  $n$  a exponentu citlivosti na deformační rychlost  $m$  pro různé teploty tváření. Z tabulky je zřejmé, že s rostoucí teplotou roste i citlivost na deformační rychlosti. V tabulce si lze také všimnout nulové hodnoty exponentu  $m$  u tváření za studena. Jelikož se jedná o tabulku ze starší literatury, dokazuje tak zmíněnou problematiku dřívějšího zanedbávání vlivu rychlosti deformace.



Obr. 5: Křivky zpevnění pro různé technické kovy [6]

Tabulka 1: Hodnoty exponentu deformačního zpevnění  $n$  a exponent citlivosti materiálu na rychlost deformace  $m$  pro vybrané podmínky tváření

Proces	$n$	$m$
Tváření za studena		
<i>většina kovových materiálů</i>	0,25	0
<i>silně zpevňující materiály</i>	0,45	0
Tváření za poloohřevu	0,15	0,15
Tváření za tepla	0	0,25
<i>ideálně plastický materiál</i>	0	0
<i>superplastický materiál</i>	0	0,5 - 0,8

Jak již bylo výše uvedeno, rychlost deformace je definována jako  $\dot{\phi} = \frac{d\varepsilon}{dt}$ . Vliv rychlosti deformace na přetvárný odpor je obvykle aproximován výrazem:  $\sigma = C e^{m\dot{\phi}}$ .

Pro jednu materiálovou šarži ( $m = \text{konst.}$ ), pro určitou velikost deformace ( $\varphi = \text{konst.}$ ) a pro dvě různé rychlosti deformace plyne vztah:  $\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left(\frac{\dot{\varepsilon}_2}{\dot{\varepsilon}_1}\right)^m$ .

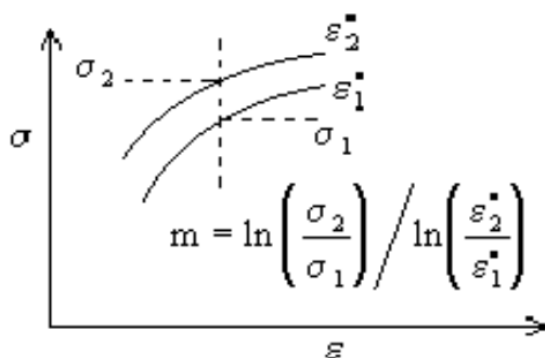
K experimentálnímu stanovení součinitele  $m$  je možné použít několik různých metod, nejčastěji jsou používány dvě metody [6]:

Je sledován přirozený přetvárný odpor při dvou různých konstantních rychlostech deformace, metoda vyžaduje dvojnásobný počet vzorků (Obr. 6).

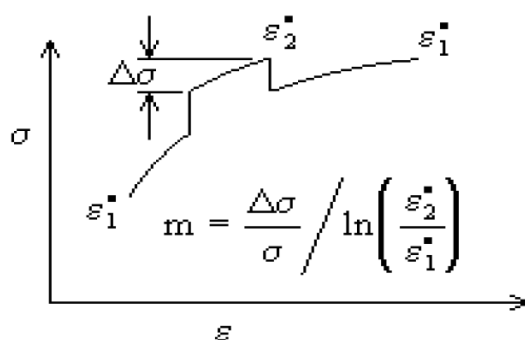
Rychlost deformace je proměnná během zkoušky, stanovení je možné realizovat na jednom zkušebním vzorku, ale zkouška vyžaduje použití stroje s řízením rychlosti deformace (Obr. 7).

Pro společný účinek deformace a rychlosti deformace je obvykle předpokládán model chování materiálu:  $\sigma = C\varepsilon^n \dot{\varphi}^m$ . 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).

Při přepínání na jinou deformační rychlost v průběhu zkoušky by mělo v závislosti napětí – deformace být realizováno tak, aby nedocházelo ke vzniku žádných nespojitostí, které by zkreslily hodnoty  $R_m$ ,  $A_g$  nebo  $A_{gt}$ . Tento vliv by bylo možné snížit vhodným postupným přepínáním mezi zkušebními rychlostmi. Z tohoto hlediska je nejméně příznivá situace při vysokých rychlostech posuvu příčnicku. Pro eliminaci možného vzniku nespojitosti v průběhu zkoušky při vysokých rychlostech deformace je doporučeno, aby zkouška probíhala při konstantní rychlosti deformace.



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



Obr. 7: Závislost napětí a deformace pro vzorek se změnou rychlosti deformace v průběhu zkoušky[6]:

#### 2.3.4 Ukázka průběhu lisovacího procesu

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

$$\text{Poměrná deformace je definována: } e = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (35)$$

$$\text{Pro velkou deformaci je vyhodnocovaná skutečná deformace: } \varepsilon = \ln \frac{l_1}{l_0} \quad (36)$$

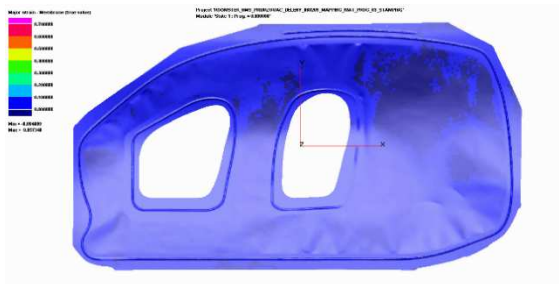
Z hlediska popisu velikosti deformace má skutečná deformace řadu výhod. Pro určitou velikost deformace v tahu i tlaku mají identickou hodnotu, rozdíl je pouze ve znaménku. Pro zjištění celkové deformace je možné její přírůstky sčítat. Z hlediska změny objemu (při zachování objemu) je možné deformace vyjádřit vztahem:

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = 0 \quad (37)$$

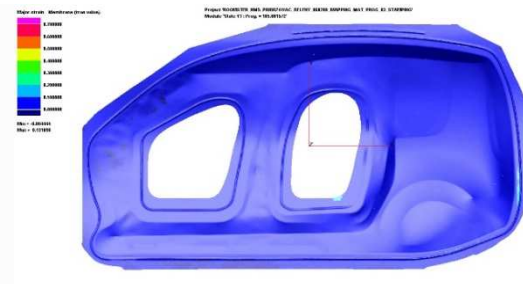
Velké plastické deformace lze popsat z vektoru posunutí nebo z vektoru rychlosti toku materiálu. Při velkých deformacích je výstižnější posuzovat okamžitý obraz situace toku materiálu, než vztah mezi počátečním a konečným stavem.

Na Obr. 8 a Obr. 9 je příklad výsledků numerické simulace z lisovacího procesu výroby dveřních ráků. Jednotlivé snímky představují fázi hlubokého tažení výroby výlisku.

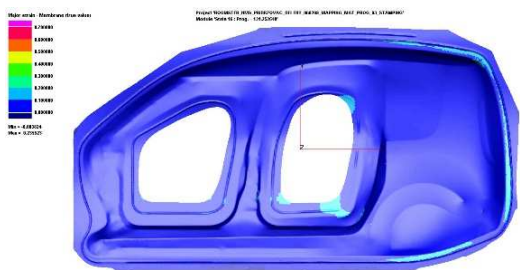
Na obrázcích je prezentován vývoj hlavní deformace výlisků a deformace tloušťky materiálu ve vybraných fázích výrobního procesu. Z průběhů je patrné, že v závěrečné fázi procesu, kdy nástroj nevykonává prakticky žádný pohyb se deformace výrazně zvětšuje. Z hlediska hlavní deformace naroste v kritických místech výlisku její velikost v posledních 8% zdvihu až o 50%, změna tloušťky materiálu až o 40%. Z průběhu tvorby výlisku je patrné, že rychlost deformace přímo nekoresponduje s rychlostí pohybu nástroje.



7%



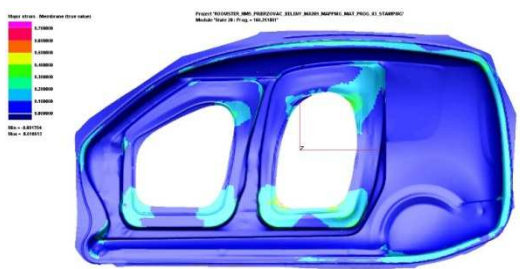
60%



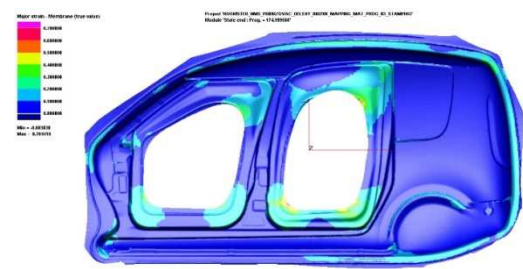
75%



83%

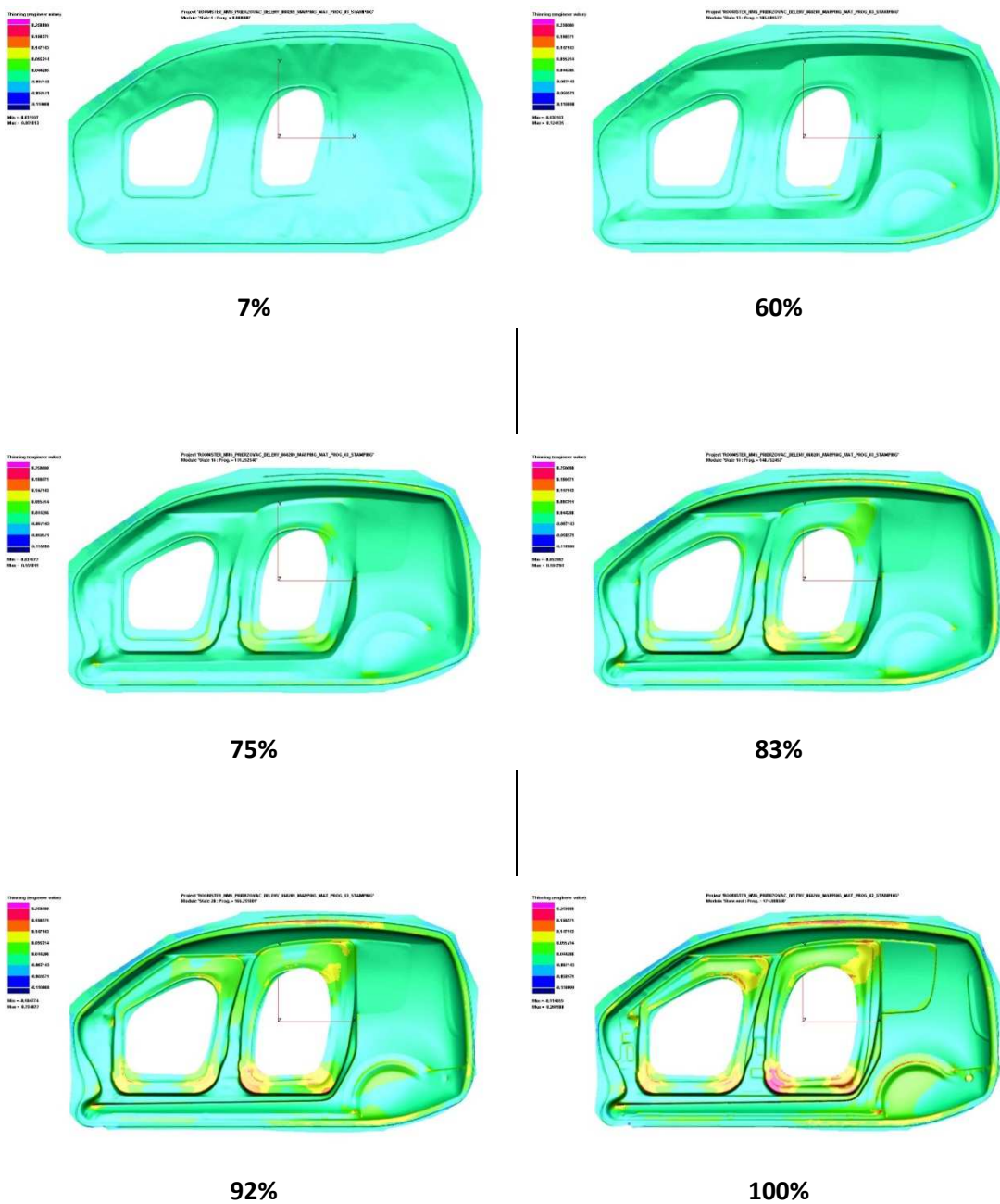


92%



100%

Obr. 8: Vývoj deformace výlisku dveřních rámců



Obr. 9: Vývoj změny tloušťky plechu výlisku dveřních ráků



## 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].

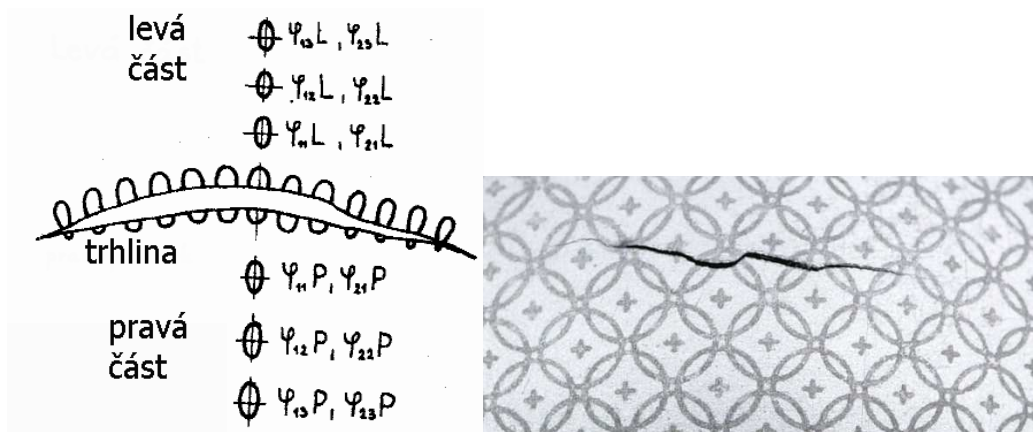
Mezní deformace se obvykle zjišťují pomocí deformačních sítí. Na zkoumaný vzorek se nanese síť, která se po skončení deformační změny vyhodnocuje.

Diagramy mezních přetvoření se zjišťují na skutečných výliscích (původní diagramy Keelera a Goodwina) nebo laboratorními zkouškami. Pro stanovení diagramu mezních deformací laboratorními zkouškami můžeme použít:

- 1) *hydrostatickou vypínací zkoušku* (nedochází ke tření mezi nástrojem a materiálem – nástrojem je tlaková kapalina),
- 2) *trhací zkoušku s vrubem* (lze zkonstruovat pouze levou část diagramu),
- 3) *tažnou zkoušku s různými tvary tažníků*,
- 4) *tažnou zkoušku s polokulovitým tažníkem a s pásky z kruhových přístřihů* (nebezpečí, kde vznikne trhlina – je požadavek, aby trhlina vznikla na vrchlíku),
- 5) *tažnou zkoušku s polokulovitým tažníkem a s kruhovými přístřihy s kruhovým odlehčením* (většinou vyžaduje specializovaný stroj, neboť je problém s upínáním vzorku).

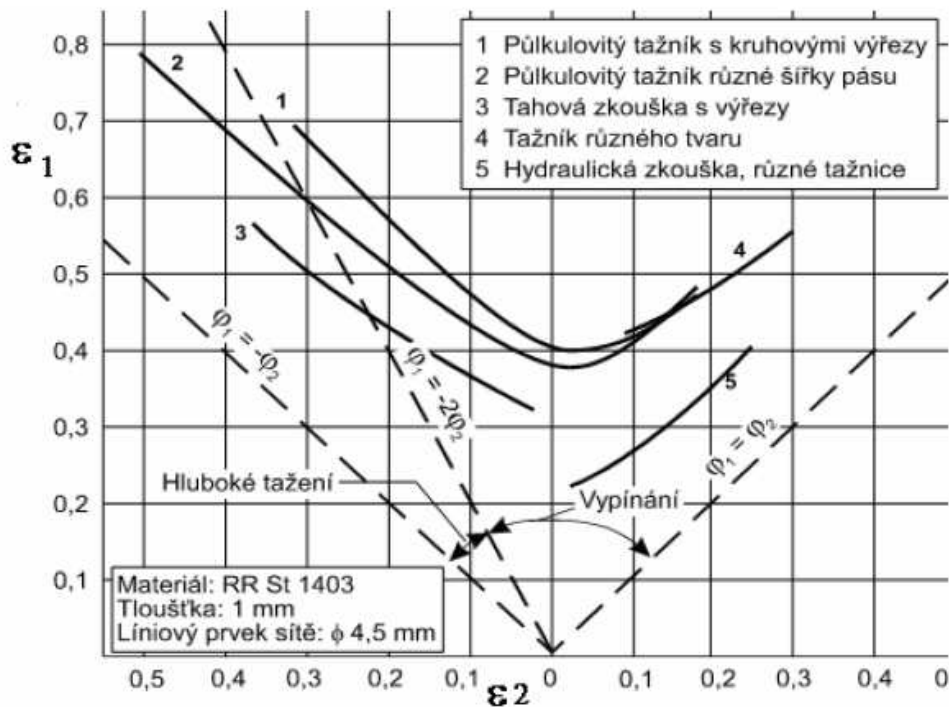
### 2.4.1 Realizace diagramu FLD

Po zatížení vzorku (laboratorního vzorku, či reálného výlisku) a vzniku trhliny provedeme určení velikosti deformace  $\phi_1$  a  $\phi_2$  v okamžiku vzniku trhliny. Vzhledem k tomu, že je velice obtížné provést vlastní měření v místě trhliny, je možné provádět aproximace deformace z okolní zdeformované sítě do místa trhliny. Jedna z možností aproximace je Veeremanova interpolace. Její princip spočívá ve změření 3 deformovaných elementů sítě na obě strany od trhliny. Pro každý element sítě se provede výpočet poměrných logaritmických deformací (Obr. 10).

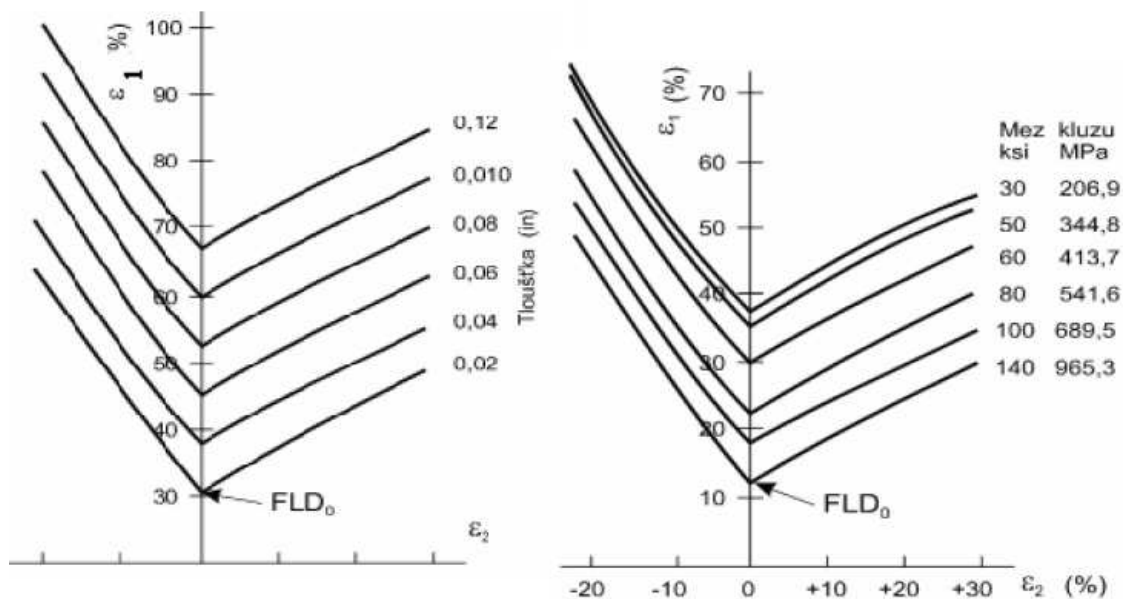


Obr. 10: Rozbor a ukázka vzniku trhliny

Na Obr. 11 je ukázka vlivu jednotlivých zkušebních metod na polohu křivek v diagramu FLD, na Obr. 12 je prezentován vliv vybraných faktorů na polohu křivek v diagramu FLD.



Obr. 11: Vliv zkušební metody na polohu křivek v diagramu FLD

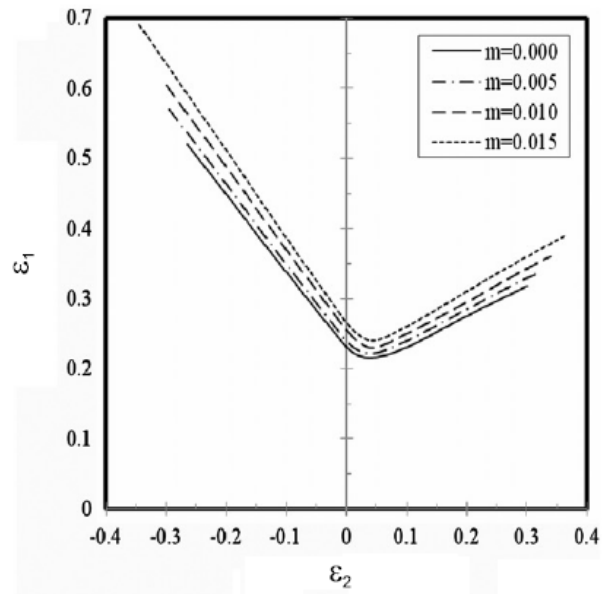


Obr. 12: Vliv tloušťky materiálu mechanických vlastností na polohu křivek v diagramu FLD.

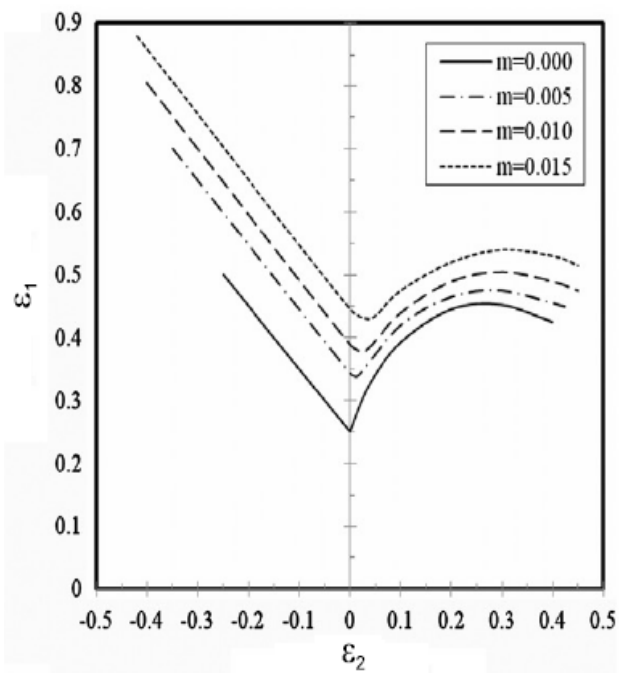
#### 2.4.2 Vliv rychlosti deformace na polohu křivek ve FLD

Na ústavu materiálového inženýrství na Šanghajske univerzitě byl proveden výzkum, při kterém byl experimentálně zjištěn vliv rychlosti deformace na polohu křivek ve FLD diagramu. Hlavním výstupem bylo, že iniciace lokalizace deformace je nezávislá na citlivosti materiálu na deformační rychlost. Avšak odchylka tempa růstu (perturbation growth rate) je výrazně ovlivněna citlivostí materiálu na deformační rychlost a větší hodnota  $m$  tempo růstu snižuje. Také poměr rychlosti deformace má výrazný vliv na odchylku tempa růstu. Dále pro materiál, který není citlivý na rychlost deformace, se hodnota rychlosti růstu  $\omega$  (tj. normalizovaná hodnota  $\omega$  s ohledem na rychlost deformace) změní z negativní na pozitivní. To znamená, že odchylka tempa růstu se výrazně zmenší před vznikem kritického napětí a roste do lokalizovaného krčku hned po vzniku krčku [29, 30].

Na Obr. 13 a Obr. 14 jsou zobrazeny zjištěné diagramy FLD v závislosti na citlivosti materiálu na deformační rychlost. Z diagramů je zřejmé, že v obou případech se nám limitní křivky posouvají směrem nahoru v závislosti na rostoucí hodnotě  $m$ .



Obr. 13: Vliv parametru  $m$  na křivky v FLD diagramu s efektivní nestabilitou přístupu [30]



Obr. 14: 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. Tato problematika nabývá na významu, jak roste požadavek na zvyšování produktivity práce či je kladen požadavek na snižování tloušťky materiálu. Problematika rychlosti deformace je poměrně komplexní. V rámci práce se nepředpokládá, že by byla vyřešena do všech důsledků. Práce si klade za cíl sledování vlivu citlivosti materiálu na rychlost deformace při reálném lisovacím procesu. Sledovat děj pomocí reálného lisovacího procesu je komplikované, neboť není obvykle možné provést sledování vlastního procesu. Cílem práce je tedy provedení konstrukčního řešení zařízení umožňující sledování vlivu rychlosti deformace. Jedná se o popis děje z hlediska průběhu sil, deformací, možnost vizuálního sledování procesu. Standardně používaná zařízení toto neumožňují. Proto se předpokládá navržení konstrukčního řešení, které tyto nedostatky eliminuje a bude schopno sledování průběhu tvářecího procesu pomocí různých snímačů a děj popisovat parametry těmito snímači získanými. 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 bude popsán způsob vyhodnocení výsledků. Metodika povede k ověření, zda problematika rychlosti deformace má vliv na mechanické vlastnosti materiálu. Provést odhad reálných rychlostí deformace odpovídající obvyklým lisovacím procesům, vytipování obvyklých hlubokotažných materiálů používaných pro výrobu karoserie v automobilovém průmyslu, vytvoření metodiky popisu chování materiálu v závislosti na rychlosti deformace odpovídající obvyklým rychlostem deformace při lisovacích operacích, aby výsledky byly porovnatelné se zkouškou tahem.

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.

### **3.1 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?

### **3.2 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, díky kterým lze 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 nebo teploty a to vše pomocí moderních a přesných elektronických měřících systémů. Díky přesnějšímu vyhodnocování tvařitelnosti materiálů lze potom mezi sebou lépe porovnávat jednotlivé vlastnosti materiálů z hlediska tvařitelnosti

a citlivosti na zmíněné faktory. Nejjednodušším takovýmto zařízením je zařízení pro zkoušku tahem. Modernější verze tohoto zkušebního zařízení umožňují měnit rychlost příčnicku, která je ve výsledku stejná jako rychlost deformace. Avšak v reálném lisovacím procesu je rychlost deformace závislá na rychlosti nástroje, ale nepřímo. Materiál se často deformuje v jiném směru, než se pohybuje nástroj (nejčastěji kolmo k pohybu nástroje). V případě zkoušky tahem tomu však takto není, materiál se deformuje jen ve směru pohybu příčnicku. Již složitější skupinou zkušebních zařízení jsou plastometry, které již umožňují lépe sledovat faktory ovlivňující tvařitelnost materiálu při přesně daných podmínkách.

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, aby po vzniku trhliny bylo provedeno zastavení pohybu zkušebního nástroje. Geometrie funkčních částí navrženého zařízení by měla odpovídat 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**

### **4.1.1 Popis zkušebního zařízení**

Jako nejlepší varianta zařízení, které bylo zkonstruované na ČVUT v Praze, Fakultě strojní, Ústavu strojírenské technologie, vychází ze zařízení pro zkoušku vrubové houževnatosti dle Charpy, které se používá pro zkoušku rázem v ohybu. Na Obr. 15 je zobrazeno modifikované zařízení. Místo kladiva pro přerážení vzorku je umístěna hlava s lisovacím nástrojem ve tvaru polokoule. Hlavní výhodou této varianty je možnost využití gravitace a tíhy kyvadla jako zdroj energie pro pohyb nástroje. [I-1, I-2]

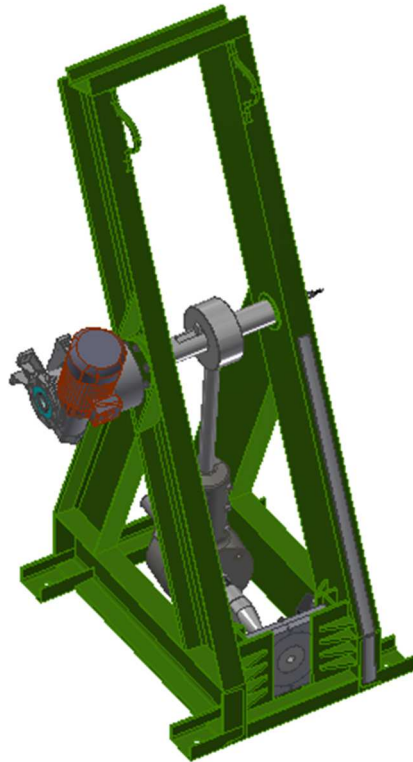




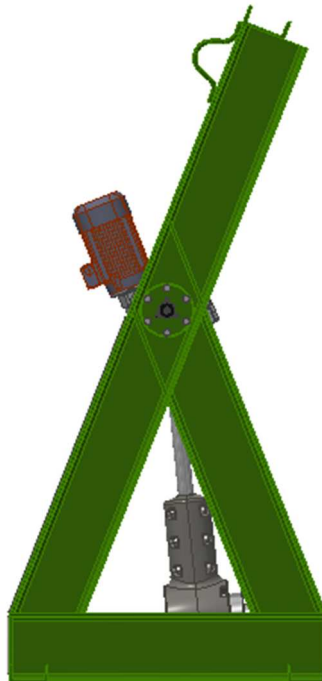
*Obr. 15: Celkový pohled na navrhované zkušební zařízení*

Na Obr. 16 a Obr. 17 je patrný celkový pohled na model konstrukčního řešení zkušebního zařízení.

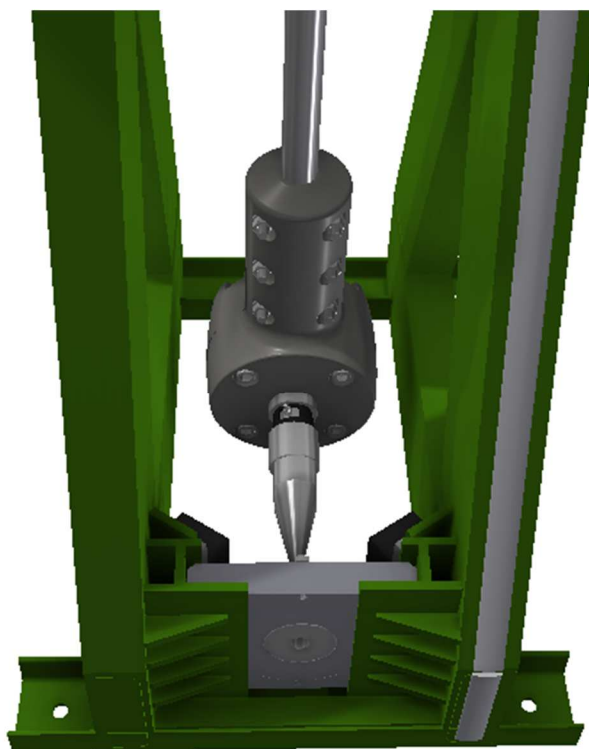
Na Obr. 18 je pohled na tvářecí nástroje, které provádějí zkoušení vloženého materiálu, na Obr. 19 je pohled zepředu na funkční část nástroje. Detailní výkresová dokumentace k zařízení je uvedena v Příloze 1.



*Obr. 16: Celkový pohled na model zkušebního zařízení*



*Obr. 17: Boční pohled na model zkušebního zařízení*



Obr. 18: Pohled na model funkční části zkušebního zařízení



Obr. 19: Přední pohled na model funkční části zkušebního zařízení

#### 4.1.2 Návrh funkční plochy nástroje

Předpokladem tohoto zařízení a zároveň velikou výhodou oproti běžným zkušebním zařízením, je variabilita použitelnosti nástrojů. Do dělené hlavy připevněné na otáčejícím se rameni je možné umístit nástroje o různých tvarech a velikostech. Díky tomuto lze pomocí zařízení lépe popsat danou problematiku citlivosti rychlosti deformace. Na Obr. 20 je zobrazen konstrukční návrh sestavy tažníku a pojistné matice upevněný v dělené hlavě. Tažník je zasunut do hlavy na otáčejícím se rameni a pomocí

matice M60 je zajištěn v hlavě proti pohybu. V návrhu byl uvažován průměr tažníku 50 mm a délku pracovní části 300 mm. Po prvotních experimentech však došlo ke konstrukční úpravě a došlo ke změně navrženého tažníku na průměr 20 mm. Délka nástroje je navržena vzhledem k potřebnému prostoru pro brzdící mechanismy, jelikož nesmí dojít k dotyku mohutné hlavy s přebytečnou energií a přidržovacím systémem.



*Obr. 20: Výměnný univerzální nástroj*

Délka matice jednak fixuje funkční část nástroje vůči hlavě a dále je konstruována tak, aby k ní bylo možné připevnit dodatečné závaží, které umožní vyvodit dostatečnou energii pro vytvoření trhliny na zkušební vzorku tak, aby změna rychlosti pohybu nástroje v průběhu zkoušky byla minimální.

Dalším důležitým segmentem je brzdící mechanismus. Jedná se o prvky, které mají za úkol akumulovat přebytečnou energii pohybujících se částí, aniž by došlo k poškození zařízení.

Další částí nástroje popisovaného zařízení je přidržovací systém (Obr. 21), pomocí kterého je prováděno upínání analyzovaného zkušební vzorku. Přidržovací systém se skládá ze dvou hlavních komponent, kterými jsou tažnice a přidržovač s brzdící lištou ke zvýšení efektu přidržovače. Systém umožňuje změnu tvaru přidržovače a tím sledovat jeho vliv na výsledky lisovacího procesu. Vlastní upínání vzorku je řešeno pomocí osmi šroubů velikosti M16, vhodnou velikostí krouticího momentu jejich utažení je možné ovlivňovat velikost přidržovací síly. Tažnice obsahuje navíc vložený segment,

který umožňuje snadnou změnu tvaru tažnice, v případě zkušebního nástroje definuje tažnou hranu sloužící k tvarování plechu.



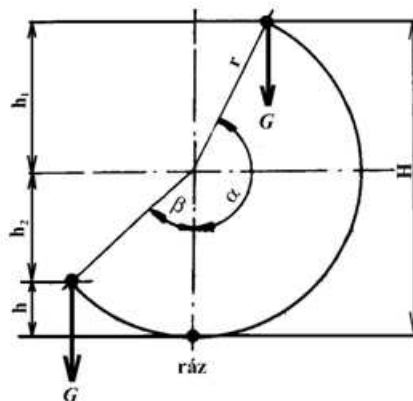
Obr. 21: Systém přidržovače a tažnice

#### 4.1.3 Princip zkoušky

Funkční část nástroje upnutá do dělené hlavy (Obr. 22) je vyzdvižena do výšky  $H$  (úhel  $\alpha$ ), čímž je dodána potenciální energii o velikosti  $W_{p1} = G \cdot H$ . Po uvolnění pojistky začne nástroj vykonávat pohyb směrem k dolní úvrati a potenciální energie se postupně mění na kinetickou. Část této kinetické energie je spotřebována na deformaci vzorku (tzv. nárazová práce  $K$ ) a zbytek energie ( $W_{p2} = G \cdot h$ ) je využita na překmitnutí kladiva do výšky  $h$  (úhel  $\beta$ ). Práce spotřebovaná na přeražení zkušební tyče (nárazová práce)  $K$  je dána rozdílem potenciálních energií  $W_{p1}$  a  $W_{p2}$ : [39]

$$K = W_{p1} - W_{p2} = G \cdot (H - h) = G \cdot [(r + h_1) - (r - h_2)] = G \cdot r \cdot (\cos \beta - \cos \alpha) \quad [J] \quad (38)$$

Protože 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 nástroj po přeražení vzorku.



kde :

$H$  je výchozí výška kladiva vzhledem ke zkušební tyči

$h$  je konečná výška kladiva vzhledem ke zkušební tyči

$\alpha$  je výchozí úhel kladiva

$\beta$  je konečný úhel kladiva

$r$  je poloměr kyvu bříty

$G$  je tíha kladiva

Obr. 22: Princip měření na Charpyho kladivu

Rychlost kyvadla se stanoví pomocí rovnice:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot l \cdot (1 - \cos \alpha)} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (39)$$

Kde za  $g$  dosadíme hodnotu normálního tíhového zrychlení ( $9,80665 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ). Hodnota rychlosti kyvadla by neměla přesáhnout  $5,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

## 4.2 Snímací systémy

Snímací systémy zastupují hlavní vyhodnocovací prvky zařízení a slouží k popisu průběhu prováděné zkoušky. Na zkušebním stroji jsou použity snímací systémy pro měření polohy ramene (měření úhlu) a dále systém pro měření a vyhodnocení vyvozené síly. Úhlový snímač má za úkol sledovat aktuální polohu hlavy s upnutým tažníkem. Snímač je umístěn na otáčejícím se hřídeli, jeho poloha je vztahována vůči rámu stroje. Systém pro měření a vyhodnocení síly registruje a analyzuje velikost působících sil v průběhu experimentu.

### 4.2.1 Úhlový potenciometr

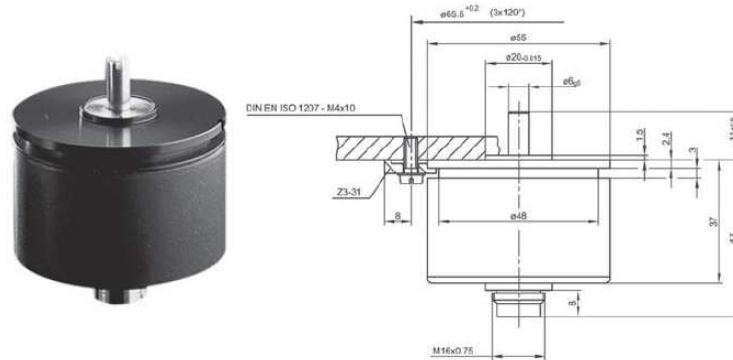
Pro snímání změny úhlu kyvadla je použit průmyslový potenciometr z vodivého plastu. Úhlový potenciometr je určen pro měření úhlů, určování polohy, měření tolerance a kontinuální snímání polohy. Snímač je vyroben jako robustní voděodolná konstrukce a proto je často využíván pro měření úhlové polohy v průmyslovém prostředí, kde se nachází velké množství nečistot nebo vlhkostí. [40]

Senzor bude umístěn z boku zařízení na otáčejícím se hřídeli. Upevnění snímače k boku zařízení je provedeno pomocí šroubového spojení se šroubem M4x10. Schéma upevnění i se základními rozměry lze vidět opět na Obr. 23. Pořízený úhlový potenciometr je znám svou vynikající přesností měření. Reprodukovatelnost potenciometru je garantována jako  $\pm 0,075\%$  a opakovatelnost jako  $\pm 0,002\%$ , tzn.  $0,007^\circ$ .

Základní parametry úhlového potenciometru:

- úhlový rozsah:  $360^\circ$  (kontinuálně),
- maximální rychlost snímání:  $3\,000 \text{ min}^{-1}$ ,
- frekvenční odezva:  $5 - 2\,000 \text{ Hz}$  ( $\pm 5\%$ ),

- teplotní rozsah snímání: -40 – 100 °C,
- životnost:  $100 \times 10^6$  cyklů.

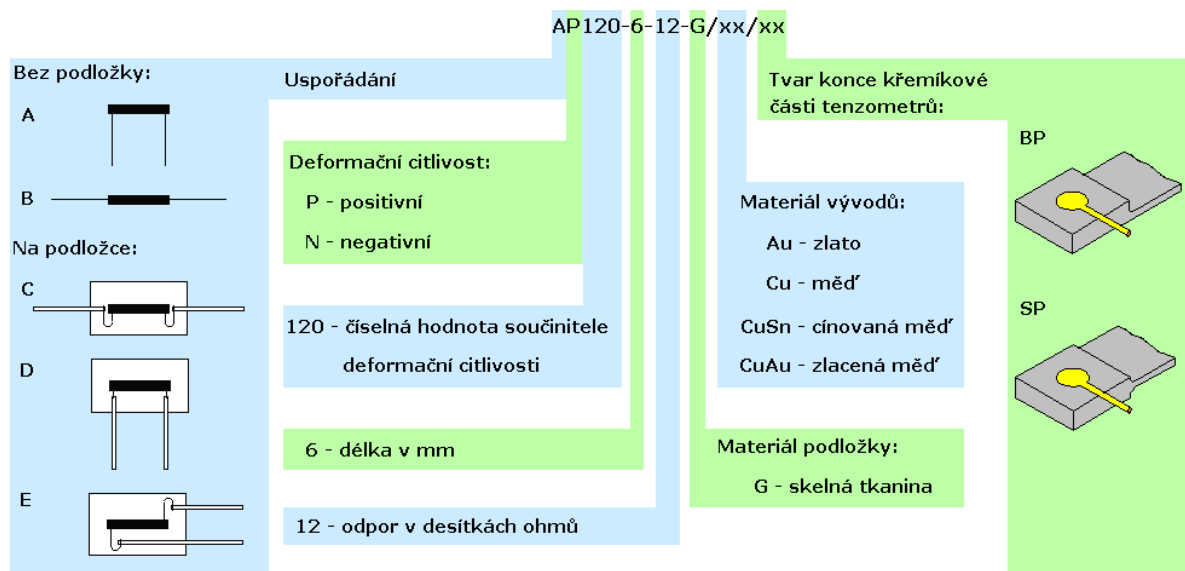


Obr. 23: Úhlový potenciometr

#### 4.2.2 Polovodičový tenzometr

Tenzometrický rezistor (tenzometr) je odporový senzor, u něhož je změna elektrického odporu závislá na změně deformací tenzometru.

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. Vysvětlení značení tenzometrů je patrný z Obr. 24.



Obr. 24: Systém značení tenzometrů

Pro analýzu byl použit polovodičový tenzometr typu AP130-6-35/Au/BP, N-Sort, se jmenovitým ohmickým odporem 350  $\Omega$ , který byl zapojen v plném (Wheatstoneově) můstku. Jeho umístění je patrné z Obr. 25



Obr. 25: Upevnění polovodičového tenzometru na nástroji

#### 4.2.3 Vyhodnocovací systém

Měřicí systém je navržený pro provádění dynamických zkoušek plechových polotovarů plastickou deformací. Sestává se z elektroniky, která je umístěna v plastové rozvodnici, softwaru a tenzometrického deformačního členu. Pro záznam úhlu natočení nástroje je použit úhломěr firmy Kistler 2123A.

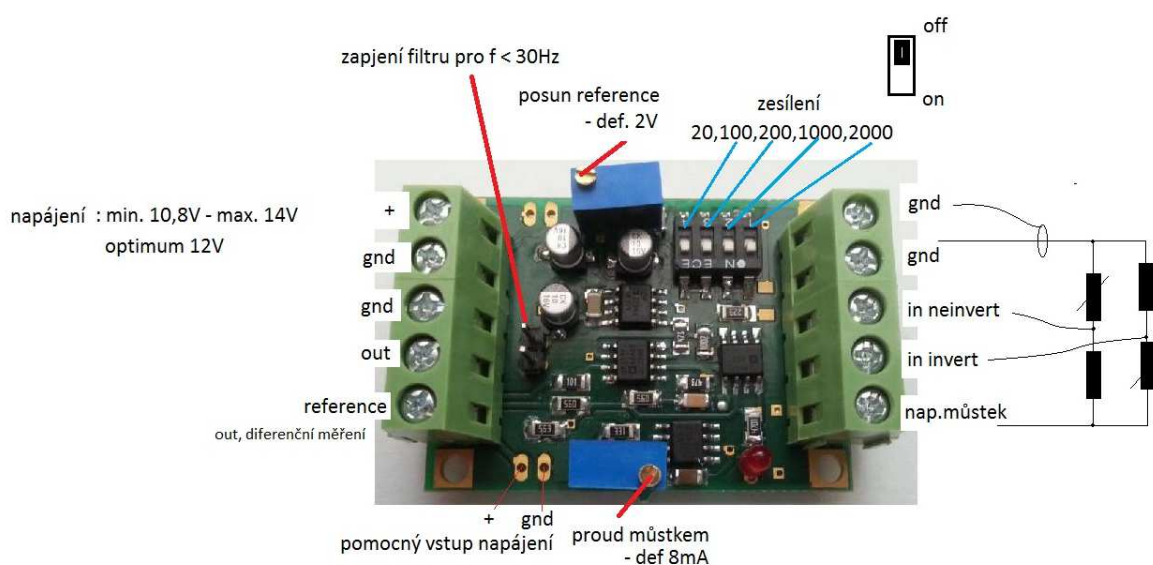
Základem měřicí jednotky je rozvodnice (Obr. 26) obsahující napájecí konektor, vypínač a datový konektor pro připojení k měřicí kartě. Napájecí napětí zařízení je 24 V, je použit napájecí adaptér model: SYS1308-2424-W2E, se stabilizovaným výstupním napětím 24 V a proudem 1 A. Jako komunikační prvek jsou použity 9-ti a 15-ti pinové konektory. 15-ti pinový konektor, který slouží pro připojení analogového úhломěru, je od firmy Kistler typ 2123A. Jeden 9-ti pinový konektor slouží pro připojení laserové závory a druhý pro připojení deformačního členu. Deformační člen je osazen plným tenzometrickým můstkem s použitím polovodičových tenzometrů. Převodník napětí z tenzometrického můstku je nastaven na zesílení 200x. Napětí z převodníku je měřeno diferenčním vstupem měřicí karty. [41, 42]

Na Obr. 27 je patrné zapojení zesilovače, především možnosti přepínání zesílení. Zesílení je možné nastavit na v rozsahu 20x až 2000x. Pokud se zesílení přepne, tak je nutné přepnout i nastavení v aplikaci. Přepnutí nastavení v aplikaci zajistí správné přepočítávání síly v exportovaných souborech. Měření je kalibrováno pro zesílení 100x, 200x a 1000x.

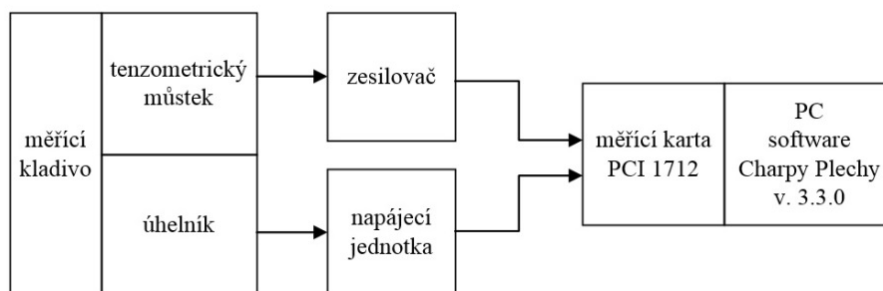




Obr. 26: Pohled na rozvodnici



Obr. 27: Zesilovací jednotka s popisem vstupů a výstupů

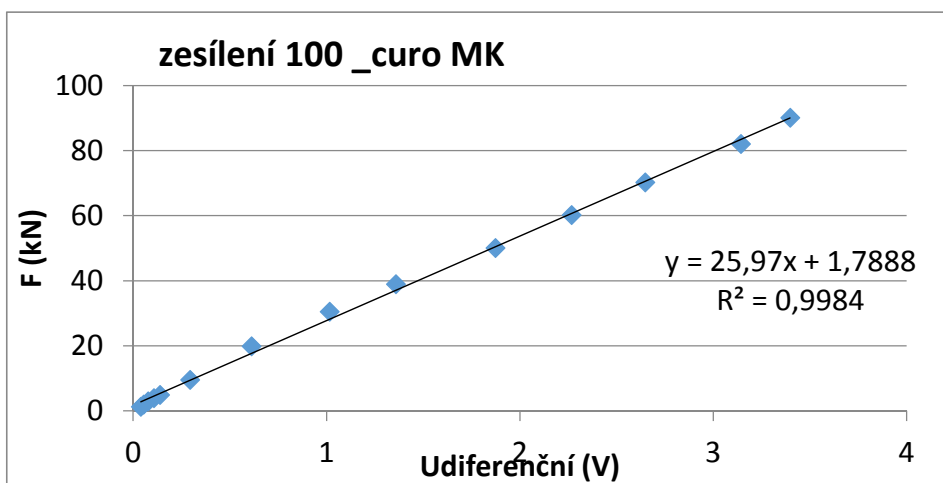


Obr. 28: Blokové schéma měřicího řetězce

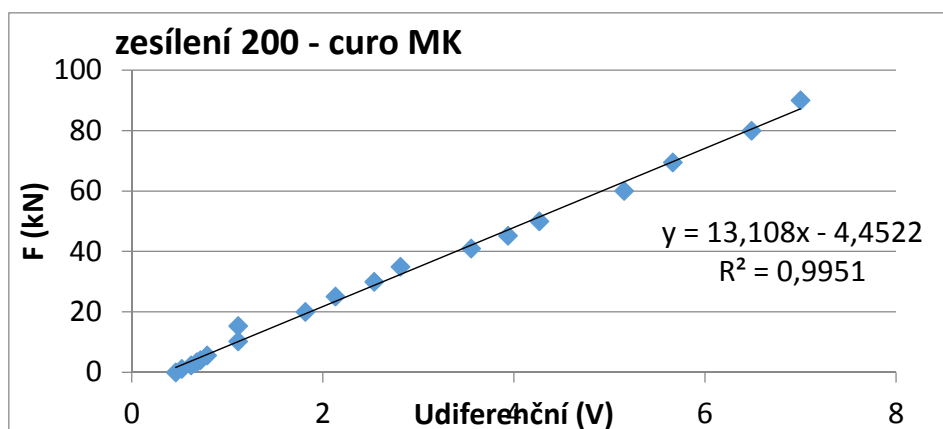
Naměřená data jsou vyhodnocována v softwaru Charpyplechy v. 3.3.0 a do počítače vstupují pomocí měřicí karty Advantech 1712L-AE. Bližší charakteristika této karty je uvedena v Příloha 2.

#### 4.2.4 Kalibrace polovodičového tenzometru

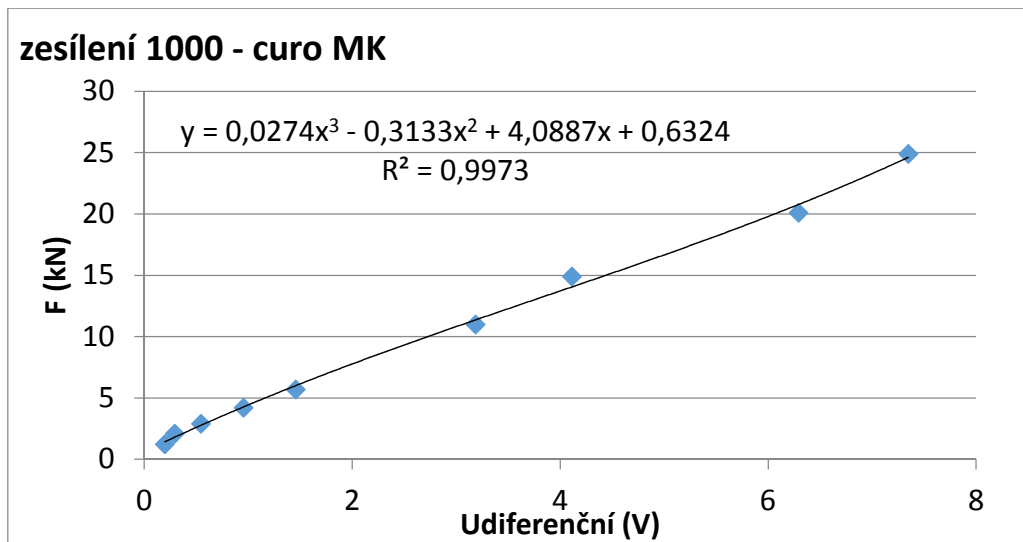
Kalibrace byla provedena na mechanickém zkušebním stroji v přípravku pro zkoušku tlakem. Při kalibraci byl tažník s kulovou plochou o poloměru 20 mm namáhán zatěžující silou a pro ni bylo registrováno napětí. Hodnota zatěžující síly byla volena v rozsahu 1 až 90 kN. Tím vznikla kalibrační závislost pro příslušný tenzometrický snímač. Kalibrační závislosti byly ověřovány pro zesílení 100x (Obr. 29), 200x (Obr. 30) a 1000x (Obr. 31), následně byla zakomponována do vytvořeného vyhodnocovacího software. Jednotlivé regresní závislosti jsou pro jednotlivá zesílení uvedena u příslušných závislostí, dále je také uvedena hodnota spolehlivosti.



Obr. 29: Kalibrace při zesílení 100 x



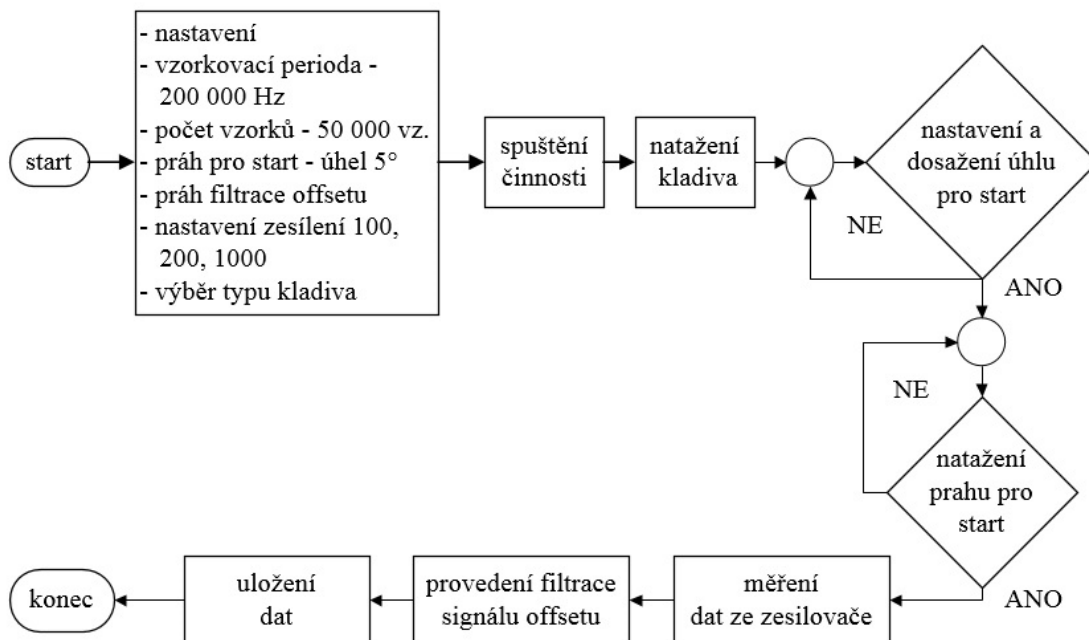
Obr. 30: Kalibrace při zesílení 200 x



Obr. 31: Kalibrace při zesílení 1000 x

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

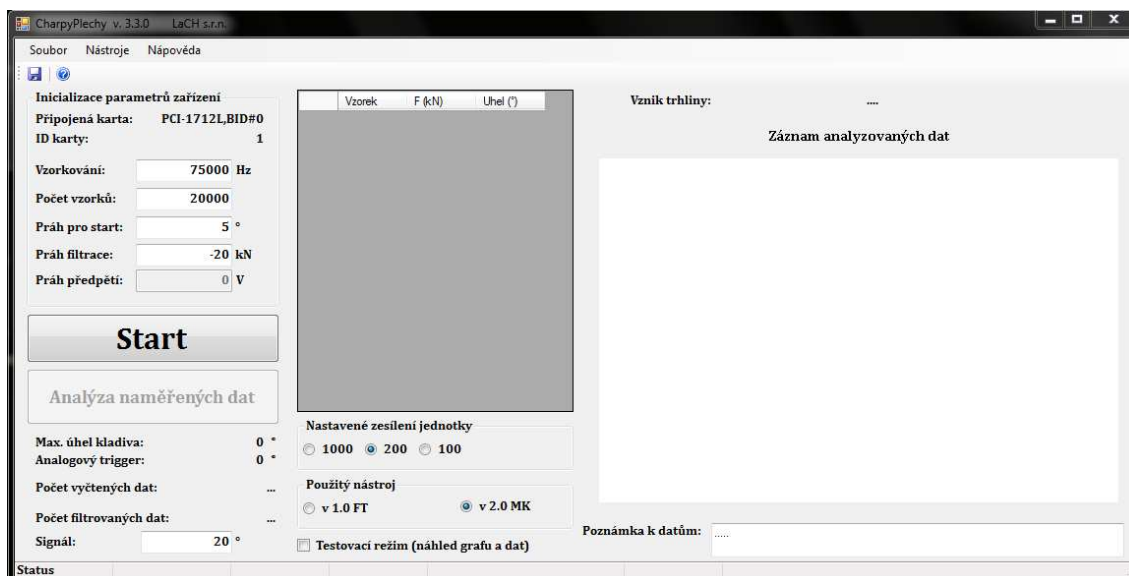
Pro vyhodnocení průběhu experimentu byl vytvořen software. Hlavní činnosti související s průběhem a vyhodnocením zkoušky plynou z vývojového digramu na Obr. 32. [I-2]



Obr. 32: Vývojový diagram činností souvisejících s dokumentací průběhu zkoušky

### 5.1 Základní popis vyhodnocovacího software

Na Obr. 33 je zobrazeno hlavní okno obslužné aplikace. Hlavními částmi je nastavení, zobrazení dat, ukládání dat. Pro jednoduchost obsluhy je každá položka doplněna ToolTipTextem pro nápovědu.



Obr. 33: Celkový pohled na okno aplikace

V rámci nastavení zkoušky (Obr. 34) je třeba se věnovat základním parametrům, mezi které patří vzorkování, nastavení počtu naměřených dat, práh pro start, práh filtrace a práh předpětí. V rámci vzorkovací frekvence je možné nastavit počet hodnot za jednotku času, které budou uloženy. Maximálně je možné nastavit vzorkování  $10^6$  Hz, což je maximální frekvence, kterou dokáže analyzovat připojená počítačová karta sloužící ke sběru dat. Doporučená vzorkovací frekvence je 1000 až 75000 Hz (toto omezení je pouze v důsledku použitého počítače, který nedokáže zpracovat více dat z karty a při vyšší frekvenci dochází k výpadku měření a nekonzistenci dat). Počet vzorků je hodnota o minimálním počtu registrovaných hodnot, které budou uloženy. V závislosti na podmínkách zkoušky je třeba volit dostatečný počet hodnot, doporučená hodnota je mezi 5000 a 15000 hodnot. Maximální počet dat je nutné experimentálně určit v závislosti na úhlu, ze kterého je kladivo spouštěno, ve vazbě na vzorkovací frekvenci. Pro většinu aplikací stačí 30000 hodnot. Bližší specifikace je uvedena v metodice zkoušení. Práh pro start je poloha, kdy je spuštěno vlastní měření, což představuje vychýlení nástroje na příslušný úhel. Práh filtrace je parametr sloužící k odfiltrování dat, ve kterých nedochází ke změnám měřené veličiny. Práh předpětí slouží k posunutí hodnot měřené veličiny o definované napětí.

**Inicializace parametrů zařízení**

Připojená karta: PCI-1716,BID#3  
 ID karty: 2

Vzorkování: 250000 Hz  
 Počet vzorků: 100000  
 Práh pro start: 2 V  
 Práh filtrace: 0 V  
 Práh předpětí: 0 V

Obr. 34: Detailní pohled na základní nastavení před začátkem zkoušky

Po základním nastavení je možné provést spuštění zkoušky stisknutím tlačítka Start, čímž dojde k iniciaci měření. Vlastní měření se spouští automaticky 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 zaznamená celková vyčtená data, 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 (Obr. 35) se spouští stisknutím tlačítka nového měření. Před dalším měřením se program zeptá, jestli jsou data uložena.

<b>Start</b>		<b>Nové měření</b>	
Analýza naměřených dat		Analýza naměřených dat	
Max. úhel kladiva:	0 °	Max. úhel kladiva:	0 °
Analogový trigger:	0 V	Analogový trigger:	-4.5372 V
Počet vyčtených dat:	...	Počet vyčtených dat:	1000
Počet filtrovaných dat:	...	Počet filtrovaných dat:	
<input type="checkbox"/> Testovací režim (náhled grafu a dat)		<input type="checkbox"/> Testovací režim (náhled grafu a dat)	

Obr. 35: Dialogové okno opakovaného spuštění aplikace

Ukládání měření je možné provádět stisknutím tlačítka pro uložení (symbol diskety) nebo v měnu Soubor/Uložit (Obr. 34). 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 dat. Uložená data jsou ve formátu \*.csv, které je možné otevřít v Excelu, MATLABu, Scilabu atp.

Text v souboru s detaily k uloženým datům obsahuje všechny zadané a změřené parametry, spolu s časem uložení dat a počítačem, který data uložil. Příklad výpisu z průběhu zkoušky je uveden Obr. 36.

```
Uložení dat CharpyPlech: 05-20-2015 09:09:52
-----
Soubor s daty:
C:\Users\martin\Desktop\pokus123456789.csv
-----
Parametry
Vzorkovací frekvence: 10000 Hz
Počet změřených vzorků: 10000 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: martin_PC2
Uložil IP: 10.31.0.120
-----
```

Obr. 36: Ukázka výpisu průběhu zkoušky

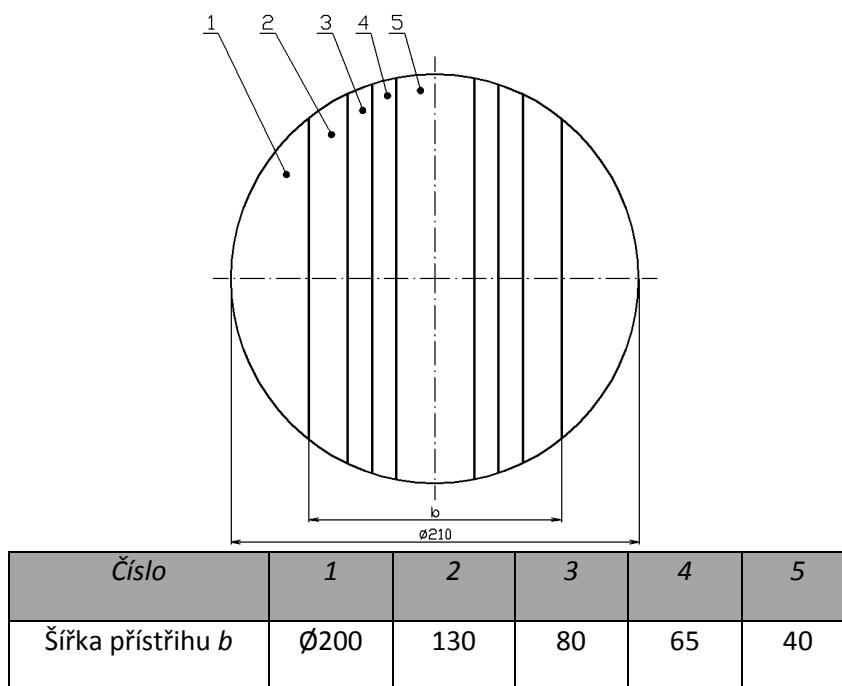
## 6 Návrh metodiky zkoušky pro sledování citlivosti na rychlost deformace na navrženém zkušebním zařízení.

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]

### 6.1 Příprava vzorků

Při manipulaci s polotovary pro zhotovování přístřihů musí být nakládáno velmi opatrně. Musí být zabráněno jejich nadměrnému zašpinění, poškrábání či jinému znehodnocení povrchu plechu. Podobně je nutné s materiálem zacházet po celou dobu od přípravy vzorku po realizaci zkoušky. Před přípravou zkušebních vzorků je třeba provést ověření materiálové jakosti, tloušťky analyzovaného materiálu apod. Materiálovou jakost je doporučeno ověřovat i zkouškou tahem.

Pro každý tvar zkušební vzorku je navržena šablona. Pomocí šablony je možné řešit umístění zkušební vzorku na polotovar z hlediska jeho maximálního využití, dále je provedeno orýsování tvaru šablony na analyzovaný zkušební plech. Tvary šablon vycházejí z Obr. 37. Vlastní zkušební vzorek je z polotovaru připravován stříháním. Po stříhání je třeba provést úpravu střížné hrany pro eliminaci otřepů. Různé tvary přístřihů viz. Obr. 37, simulují různé stavy napjatosti při zkoušce, což představuje různé způsoby zatěžování a vyvozené deformace.



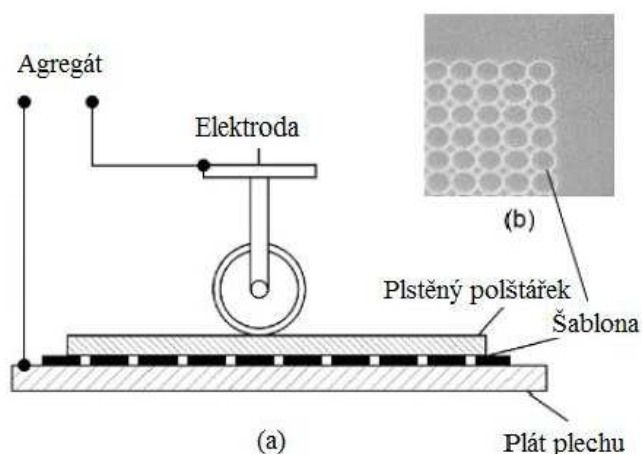
Obr. 37 Tvary zkušebních přístřihů



## 6.2 Vytvoření měrné sítě

Na připravený, odmaštěný a otřepů zbavený zkušební vzorek je provedeno nanesení měrných sítí pro sledování velikosti deformace. Doporučené metody vytváření měrných sítí jsou elektrolytickým leptáním, popř. může být síť vytvářena laserem. Zvolená metoda nanášení měrných sítí nesmí nadměrně ovlivnit stav povrchu zkušební vzorku. Velikost elementu měrné sítě je třeba volit co nejmenší s ohledem na způsob vyhodnocování deformací, pro ruční vyhodnocování je doporučena kružnicová měrná síť s velikostí elementu 2 mm. V případě digitálních metod vyhodnocování je vhodné volit menší velikosti elementů.

S ohledem na možnosti vytváření měrných sítí a na způsob vyhodnocování bylo pro ověřování zvoleno elektrochemického leptání. Princip metody je vyobrazen na Obr. 38.



Obr. 38: (a) Základní princip, (b) Příklad šablony

Po vytvoření měrné sítě je provedena konzervace povrchu zkušební vzorku lisovacím či konzervačním olejem, který zároveň může sloužit jako mazadlo v průběhu zkoušky, ale nesmí ovlivňovat vlastní průběh zkoušky. Lisovací olej je možné nanášet na vzorek válečkem či hadrem, je třeba zajistit jeho rovnoměrnou distribuci a vytvoření konstantní, rovnoměrné tloušťky.

## 6.3 Zakládání zkušební vzorku do nástroje

Zkušební vzorek je následně vložen mezi přidržovač a tažnici. Při vkládání je třeba dbát na to, aby byl přístřih vystředěn a zapadl do připravené plochy zkušební

nástroje. Poté je sestavený nástroj s vloženým zkušebním vzorkem založen do lisu, kde je provedeno slisování silou 120 kN. Cílem je zajištění deformace zkušebního vzorku v oblasti přidržovače a brzdící lišty. Následně je přístřih v nástroji fixován pomocí osmi šroubů M16, které jsou utaženy momentovým klíčem na utahovací moment 20 Nm.

#### 6.4 Zakládání nástroje do stroje

Po utažení šroubů je sestava nástroje s upnutým zkušebním vzorkem založena do stroje. Je třeba dbát na správný směr vložení nástroje, kdy hlavy utahovacích šroubů v tažnici směřující proti kulovému vrchlíku nástroje upnutém v upínací hlavě. Poté je spuštěn program (Charpy Plechy v 3.3.0) pro zaznamenání průběhu zkoušky.

#### 6.5 Nastavení softwaru

Před vlastním měřením je třeba v programu „Charpy plechy v 3.3.0“ nastavit parametry měření (viz. Obr. 39). Položka „Vzorkování“ neboli vzorkovací frekvence se nastaví na hodnotu 10 – 250 kHz, položka „Počet změřených vzorků“ na hodnotu 50 000. Při těchto hodnotách je bezpečně zaručeno plynulé zaznamenání celého průběhu experimentu. Další položkou, kterou je nutno nastavit je „Práh pro start“ neboli definování úhlu úhломěru. Dále je možné nastavit zesílení převodníku napětí ze snímače síly na hodnotu 100x a 200x. Detailní vysvětlení nastavení je provedeno v kapitole 5.1 Základní popis vyhodnocovacího software.

The image shows a software window titled "Inicializace parametrů zařízení" (Device parameter initialization). It contains several configuration fields:

Připojená karta:	PCI-1716,BID#3
ID karty:	2
Vzorkování:	250000 Hz
Počet vzorků:	50000
Práh pro start:	2 V
Práh filtrace:	0 V
Práh předpětí:	0 V

Obr. 39: Nastavení parametrů měření

## **6.6 Příprava vysokorychlostní kamery pro měření**

Před měřením je třeba též připravit vysokorychlostní kameru (či jiné digitalizační zařízení umožňující sledovat opticky průběh děje). Pomocí tohoto zařízení se sleduje průběh lisovacího procesu až do vzniku trhliny a chování materiálu při deformaci. Vysokorychlostní kameru je třeba umístit jednak do bezpečné vzdálenosti a zároveň tak, aby byla co nejvíce ve směru pohybu nástroje a mohla sledovat průběh vzniku trhliny. Na kameru je třeba umístit vhodný typ objektivu, je doporučen objektiv 50. Dále je třeba nastavit kameru, kdy jedna z důležitých položek je snímkovací frekvence. Doporučeno je alespoň 10 000 FPS, minimální hodnota snímkování je 3 000 FPS. Tato minimální hodnota snímkování a zvolený objektiv je kompromis mezi bezpečnou vzdáleností kamery od vlastního děje, dostatečnou velikostí elementu na videosekvenci, realizovatelností dostatečného osvětlení analyzovaného vzorku a čitelností měrné sítě.

Z ochranných důvodů je před kameru umístěno krycí sklo, aby nedošlo k jejímu poškození v případě odlétávajících částic při provádění zkoušky. Při umístění přípravku s přístřihem do zařízení je třeba dbát, aby měrná síť byla kamerou viditelná, obraz byl zaostřen. Vzorek je třeba dostatečně nasvítit např. pomocí LED svítidel pro dobrou čitelnost videozáznamu.

## **6.7 Provedení zkoušky**

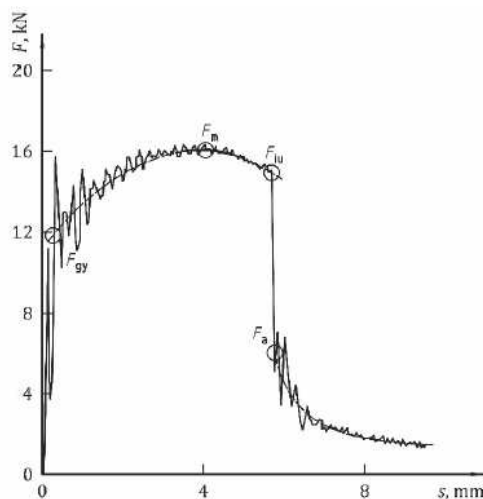
Po stisku tlačítka Start dojde k iniciaci měřicího zařízení, na displeji se zobrazí červenou barvou podsvícené okno, ve kterém je zobrazena hodnota úhlu aktuálního vychýlení zkušebního nástroje. V okamžiku dosažení předdefinovaného úhlu („Práh pro start“) je automaticky spuštěno měření a uvolnění zkušebního nástroje. Po realizaci zkoušky je třeba tlumit dodatečné překmity nástroje, celou soustavu uvést do klidu.

Po zpracování naměřených dat softwarem „CharpyPlechy v 3.3.0“ je třeba následným stiskem tlačítka „Analýza naměřených dat“ provést jejich vyhodnocení a uložení. Zároveň je proveden zápis informačních dat o průběhu zkoušky.

## 6.8 Vyhodnocení naměřených výsledků

Vyhodnocení zkoušky vychází z normy ČSN EN ISO 14556. Na Obr. 40 je ukázka průběhu zkoušky pomocí Charpyho kladiva. Při zkoušce je možné vyhodnocovat charakteristiku nárazové práce.

Energie odpovídající maximální síle,  $W_m$ , se určí integrací plochy pod křivkou síla-průhyb v intervalu  $s = 0$  do  $s = s_m$ .



Obr. 40: Průběh zkoušky pomocí Charpyho kladiva

Energie odpovídající okamžiku iniciace trhliny,  $W_{iu}$ , se určí integrací plochy pod křivkou síla-průhyb od  $s = 0$  do  $s = s_{iu}$ .

Energie odpovídající zastavení trhliny,  $W_a$ , se určí integrací plochy pod křivkou síla-průhyb od  $s = 0$  do  $s = s_a$ .

Uložená data jsou zapsána do formátu csv. Tento soubor je možné otevřít například v excelu, kde následně probíhá vyhodnocování. Pro vyhodnocování je třeba do excelu nakopírovat hlavičku s daty. Následně je třeba ze sloupce B vypočítat čas jednotlivých zaznamenaných hodnot (vzorků) tak, že čas = pořadí\*(1/vzorkovací perioda).

Ve sloupci E jsou informace o síle, data je třeba oříznout pomocí offsetu – průběh síly je posunut tak, aby síla začínala v hodnotě 0 N. Dále je třeba spočítat rychlost nástroje při nárazu:  $v = \sqrt{2gl(1 - \cos \alpha)}$ , kde  $l$  je délka ramene,  $\alpha$  je úhel dopadu nástroje.

Následně je třeba určit dráhu pohybu nástroje, jedná se o vzdálenost, při které nástroj působí na vzorek. Poté je dráha převedena na jednotky mm a je možné určit energii, která je součinem síly a dráhy pro jednotlivé vzorkovací frekvence, pro určení

celkové energie je třeba provést integraci. Pro průběh síly je možné určit maximum a je možné určit časový okamžik inicializace trhliny. Pro tuto hodnotu je odečtena hodnota energie. Tuto hodnotu a průběh zkoušky je pak možné porovnávat s různými úhly dopadu nástroje na vzorek.

Dalšími vyhodnocovanými daty jsou videosekvence z průběhu zkoušky, které byly pořízeny kamerou i-Speed od firmy Olympus. Videosekvence je otevřena v software i-Speed Suite, který umožňuje obrazovou analýzu. Při vyhodnocování je třeba nejprve nastavit měřítko. To je realizováno tak, že se nejprve vyberou 2 body, mezi kterými je vzdálenost známá. Těmi body mohou být například protilehlé body elementu měrné sítě před deformací. Následně je možné v libovolném kroku provést analýzu deformace elementů. Z hlediska analýzy vlivu rychlosti deformace na polohu FLC křivky je třeba hledat stav vzorku před vznikem trhliny. Pro tento stav je třeba určit velikost deformace a následně provést porovnání výsledků pro různé rychlosti deformace. Výsledky deformace je možné srovnat s velikostí deformace vzorků získané zkouškou hloubením podle Erichsena.

## 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 Ověření navržené metodiky

Podle navržené metodiky bylo ověřeno chování vybraných zkušebních vzorcích šarže materiálové jakosti DC06.

#### 7.1.1 Příprava vzorků

Na základě postupů stanovených v metodice byl odebrán materiál pro výrobu zkušebních vzorků. Materiál byl označen pro jeho pozdější identifikaci. Následně byly dle navržené metodiky připraveny zkušební vzorky stříháním ve tvaru uvedeném v kapitole 6.1. podle navržených šablon. Jednotlivé zkušební vzorky byly řádně označeny. Následně byly odstraněny otřepty ze střížných hran. Pro ověření metodiky byly použity plné kruhové přístřihy o průměru 200 mm.

#### 7.1.2 Vytvoření měrné sítě

Podle navržené metodiky byla na jednotlivé zkušební vzorky vytvořena měrná síť elektrolyticky. Velikost elementu měrné sítě byla 2 mm. Po vytváření měrné sítě byl povrch důkladně opláchnutý, neutralizovaný a nanesen konzervační olej.

#### 7.1.3 Zakládání zkušební vzorku do nástroje

Zkušební vzorek byl následně vložen mezi přidržovač a tažnici a podle metodiky byl zkušební vzorek zajištěn šrouby v nástroji.

#### 7.1.4 Zakládání nástroje do stroje

Následně byla podle metodiky založena sestava nástroje do zkušebního stroje.

#### 7.1.5 Nastavení softwaru

Pro vlastní zkoušku byly nastaveny tyto parametry: Vzorkování bylo nastaveno na 75 kHz, Počet změřených vzorků na hodnotu 50 000, Práh pro start byl volen v hodnotě 5°, zesílení převodníku napětí ze snímače síly bylo voleno 100x.

#### 7.1.6 Příprava vysokorychlostní kamery pro měření

Před vlastním měřením byla nastavena vysokorychlostní kamera, nasvícení povrchu zkušebního vzorku bylo prováděno pomocí LED světla 200 W. S ohledem na intenzitu nasvícení byla zvolena frekvence snímání 5000 FPS. Kamera byla osazena objektivem 50.

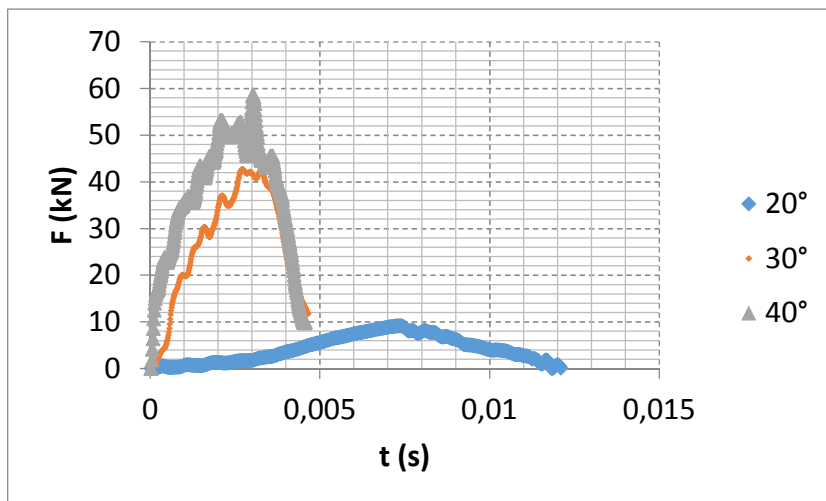
#### 7.1.7 Provedení zkoušky

Vlastní zkouška byla provedena podle metodiky. Zvoleny byly úhly vychýlení nástroje 20°, 30° a 40°. Následně bylo provedeno vyhodnocení průběhu zkoušek. Při analýze byly vyhodnocovány výsledky ze snímačů osazených na zkušebním stroji a výsledky získané pomocí vysokorychlostní kamery. Všechna získaná data po provedených zkouškách byla uložena.

## 7.2 Vyhodnocení naměřených výsledků

Pro jednotlivé provedené zkoušky byla vyhodnocena naměřená data získaná ze snímačů a z vysokorychlostní kamery. [I-5, I-6]

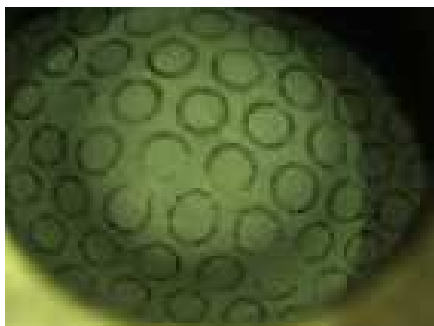
Průběh zkoušky pro vybrané vzorky pro nastavené úhly 20, 30 a 40° jsou patrné z Obr. 44.



Obr. 41: Průběh síly pro vybrané jakosti pro úhel dopadu nástroje 20°

Na obrázku 42 a 43 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. 42: Šarže A, 20°, snímek před vznikem trhliny



Obr. 43: 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. Detailní přehled analyzovaných materiálových jakostí je uveden v Tabulka 3: Použité šarže oceli DC06 pro výrobu zkušebních vzorků.

### 8.1 Popis materiálové jakosti DC06+ZE50/50-B-PO

Jedná se o legovanou ušlechtilou nízkouhlíkovou feritickou ocel, která je mikrolegována 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 Tabulka 2. [43, 44, 45]

Tabulka 2: Chemické složení zkušebního materiálu DC06

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

Tento materiál je vyráběn jako úplně uklidněný (stabilní), kde toto uklidnění je realizováno mikrolegováním hliníkem a titanem. Jedná se o materiál používaný v automobilovém průmyslu pro výrobu nejsložitějších výlisků. Pro analýzu chování materiálu byly zajištěny vzorky materiálové jakosti DC06 různých šarží od několika výrobců (viz. Tabulka 3).

Tabulka 3: Použité šarže oceli DC06 pro výrobu zkušebních vzorků

<b>Šarže</b>	<b>Materiál</b>	<b>Tloušťka [mm]</b>	<b>Č. svitku</b>	<b>Výrobce</b>
<b>A</b>	DC06+ZE50/50-B-PO	0,76	7719454	AM Liege
<b>B</b>	DC06+ZE50/50-B-PO	0,76	2R64801	TKS
<b>C</b>	DC06+ZE50/50-B-PO	0,76	7719464	AM Liege
<b>D</b>	DC06+ZE50/50-B-PO	0,7	7701769	AM Liege
<b>E</b>	DC06+ZE50/50-B-PO	0,76	8042006	Salzgitter
<b>F</b>	DC06+ZE50/50-B-PO	0,76	7711770	AM Liege
<b>G</b>	DC06+ZE50/50-B-PO	0,75	2S31301	TKS
<b>H</b>	DC06+ZE50/50-B-PO	0,75	2R83001	TKS

Mechanické vlastnosti ověřené zkouškou tahem jednotlivých šarží zkušebního materiálu DC06 jsou uvedeny v Tabulka 4

Tabulka 4: Mechanické vlastnosti jednotlivých šarží zkušebního materiálu DC06 ověřené zkouškou tahem

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>
<b><math>R_{p0,2}</math> [MPa]</b>	148,8	168,1	152,0	164,1	157,9	164,1	168,0	162,7
<b><math>R_m</math> [MPa]</b>	289,3	301,2	295,0	301,2	302,9	299,0	301,9	298,9
<b><math>A_{80mm}</math>[%]</b>	38,32	38,09	37,97	37,07	36,55	40,45	36,62	37,09
<b><math>n</math> [-]</b>	0,250	0,247	0,247	0,233	0,233	0,237	0,245	0,253
<b><math>r</math> [-]</b>	3,36	2,70	3,08	2,80	2,62	2,63	2,60	2,66

Hodnoty zjišťované zkouškou tahem platí pro směr kolmý ke směru válcování, šířka zkušební vzorku byla 20 mm, výchozí měřená délka byla 80 mm. Součinitel plastické anizotropie  $r$  a exponent deformačního zpevnění  $n$  byly určeny v oblasti homogenní deformace v rozsahu prodloužení 10 až 20%. [13, 14]

U použitého zkušební materiálu se jedná o povrchovou úpravu s elektrolyticky vyloučenou vrstvou zinku o jmenovité tloušťce 5  $\mu\text{m}$  na každé straně (Tabulka 5). Plech je poté fosfátován, olejován a dodáván ve svitcích. [43]

Tabulka 5: Elektrolytický zinkový povlak zkušebního materiálu DC06

<b>Zinková vrstva materiálu DC06+ZE50/50-B-P-O</b>			
<b>Jmenovitá vrstva</b>		<b>Minimální vrstva</b>	
Tloušťka	Hmotnost	Tloušťka	Hmotnost
[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ]
5,0	36,0	4,1	29,0

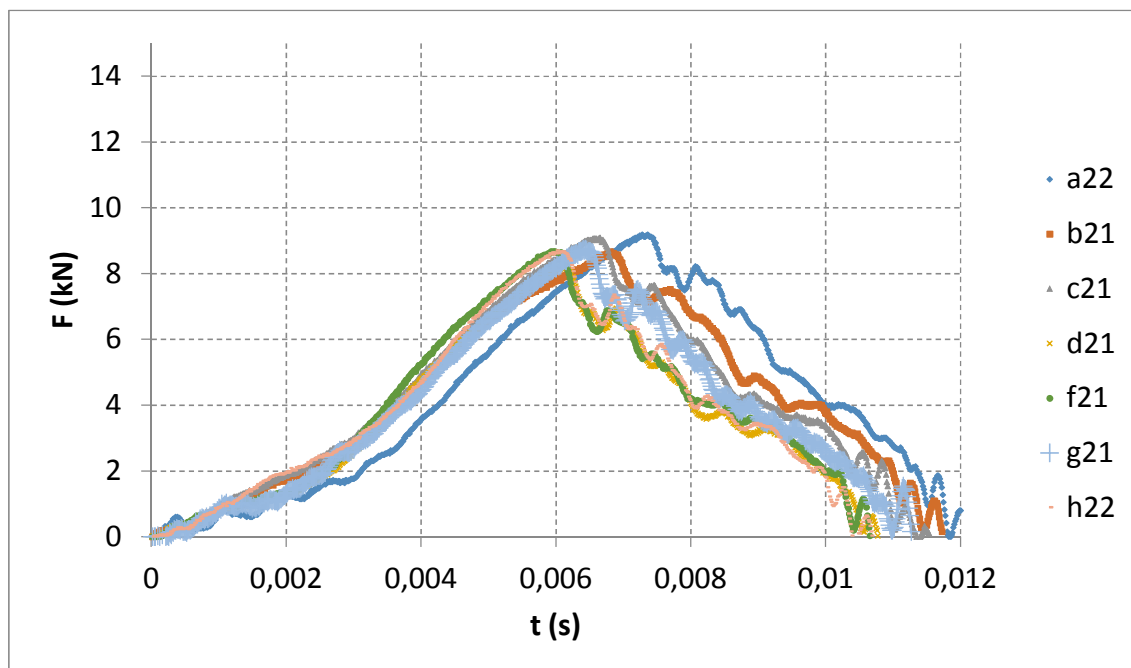
Tloušťka elektrolyticky vyloučené vrstvy povlaku se stanoví na každé straně. Každý jednotlivý výsledek musí odpovídat požadavkům na minimální hmotnost povlaku uvedenou v Tabulka 5.

## 8.2 Vyhodnocení naměřených výsledků

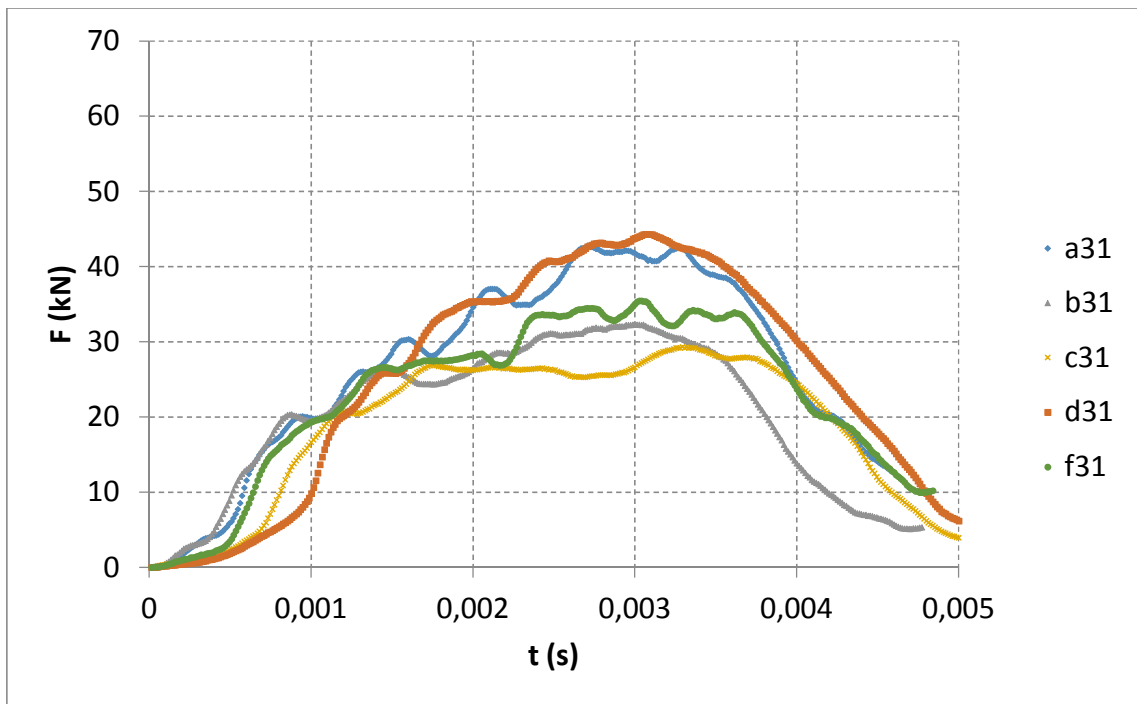
Zkouška byla provedena dle navržené metodiky na vzorcích kruhového přístřihu tak, aby výsledky bylo možné porovnávat se statickou zkouškou hlubokotažnosti dle Erichsena. Pro jednotlivé provedené zkoušky byla vyhodnocena naměřená data získaná ze snímačů a z vysokorychlostní kamery. Dále bylo provedeno měření hlubokotažnosti zkouškou hloubení podle Erichsena, se kterými byly výsledky též porovnávány. [I-5,I-6]

### 8.2.1 Vyhodnocení výsledků pomocí zkušebního stroje

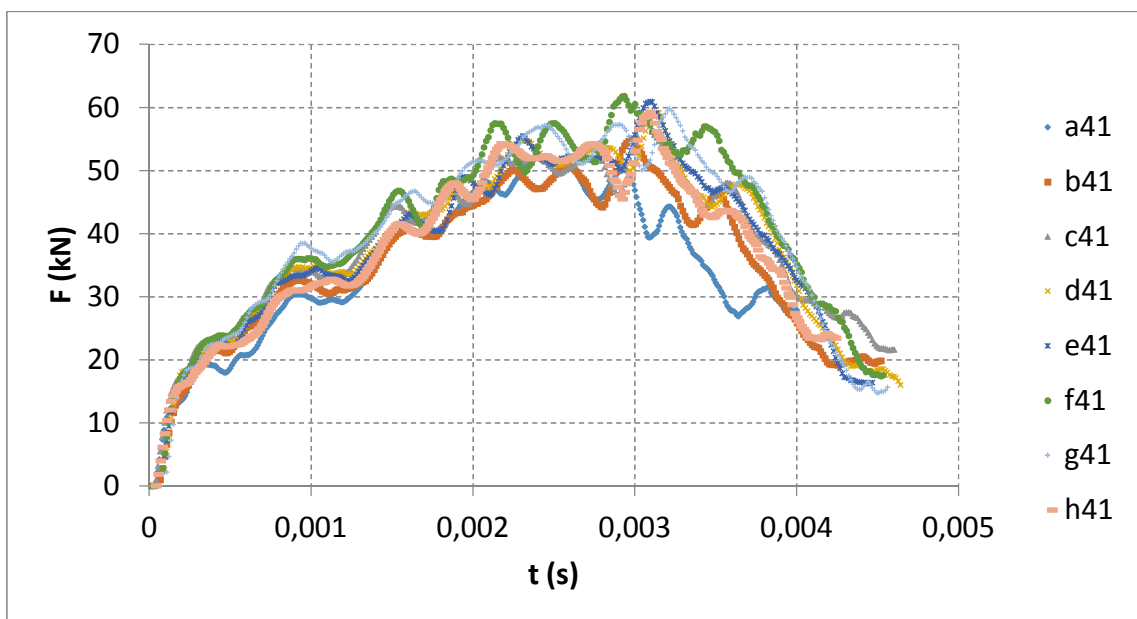
Na zkušebním stroji byly provedeny zkoušky pro všechny materiálové jakosti pro zkušební vzorek o průměru 200 mm kruhového tvaru. Získané výsledky zkoušky jsou uvedeny v Příloze 3, Příloze 4 a Příloze 5. Průběhy zkoušek pro jednotlivé rychlosti deformace v závislosti na úhlu dopadu nástroje, jsou patrné z Obr. 44, Obr. 45 a Obr. 46.



Obr. 44: Průběh síly pro vybrané jakosti pro úhel dopadu nástroje 20°



Obr. 45: Průběh síly pro vybrané jakosti pro úhel dopadu nástroje  $30^\circ$



Obr. 46: Průběh síly pro vybrané jakosti pro úhel dopadu nástroje  $40^\circ$

Tabulka 6: Přehled průměrných hodnot získaných vyhodnocením výsledku experimentů

	Úhel dopadu nástroje	$W_m$ [J]	$W_{iu}$ [J]	$F_{max}$ [kN]
A	20°	9,3	14,4	8,8
	30°	20,9	35,2	40,9
	40°	24,8	28,7	57,5
B	20°	12,2	13,6	8,6
	30°	15,1	29,9	33,2
	40°	30,0	38,8	55,7
C	20°	9,6	14,9	9,1
	30°	17,3	32,7	33,2
	40°	32,5	41,2	55,8
D	20°	9,2	14,9	8,6
	30°	16,4	38,9	38,7
	40°	33,5	40,0	55,6
E	20°	10,1	13,5	9,0
	30°	14,2	31,6	35,2
	40°	28,5	35,6	51,4
F	20°	9,8	13,7	8,9
	30°	13,9	33,0	33,8
	40°	31,6	37,2	55,2
G	20°	9,6	14,1	9,2
	30°	14,8	30,9	32,6
	40°	26,8	36,7	53,1
H	20°	9,9	13,8	8,8
	30°	15,1	33,1	31,8
	40°	29,8	39,5	52,8

Vzhledem ke značnému rozsahu provedených experimentů jsou v Tabulka 6 uvedeny průměrné hodnoty energie odpovídající okamžiku iniciace trhliny ( $W_{iu}$ ), energie odpovídající zastavení trhliny ( $W_m$ ) a maximální působící síly ( $F_{max}$ ). Detailní hodnoty jsou uvedeny v přílohách.

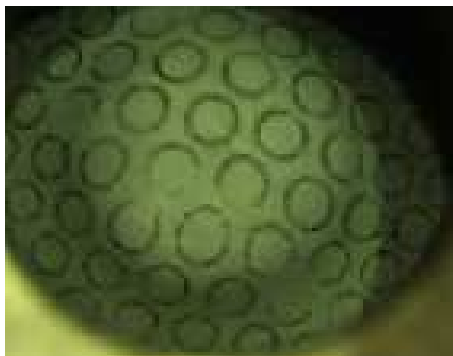
### 8.2.2 Vyhodnocení testu podle Erichsena

Byly vytvořeny zkušební vzorky pro ověření hlubokotažnosti podle Erichsena. Na těchto vzorcích byla nanášena měrná síť, vzorky byly následně deformovány. Z hlediska charakteru porovnávaných parametrů nebyla vyhodnocována hloubka, kdy došlo ke vzniku trhliny. Zkouška byla při dosažení trhliny ukončena, ale dále byla vyhodnocována velikost deformace elementů měrné sítě. Získané výsledky jsou uvedeny

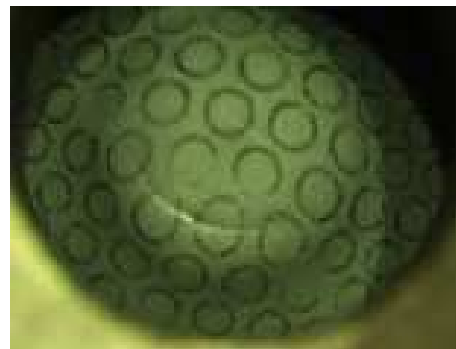
v příloze, graficky jsou porovnávány s výsledky získanými pomocí navrženého zkušebního zařízení na obr. 51-58. Velikosti deformace byla určena pomocí stereomikroskopu a dále byla dopočtena pomocí aproximace do velikosti deformace v trhlině.

### 8.2.3 Vyhodnocení výsledků pomocí vysokorychlostní kamery

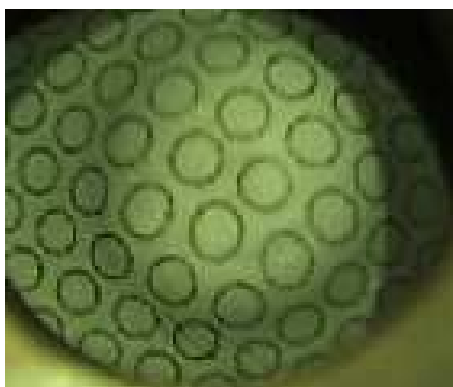
Videosekvence získané ze zkoušek vysokorychlostní kamerou byly analyzovány pomocí software dle navržené metodiky. Na Obr. 47 je snímek deformovaného vzorku před vznikem trhliny, na Obr. 48 je následující snímek videosekvence, kde je patrný vznik trhliny. Analogicky je zobrazený průběh vzniku trhliny na Obr. 49 a Obr. 50. Analogickým způsobem byla vyhodnocena deformace na všech analyzovaných vzorcích- Vlastní výsledky jsou uvedeny v Příloze 6. [I-7, I-8]



Obr. 47: Šarže A, 20°, snímek před vznikem trhliny



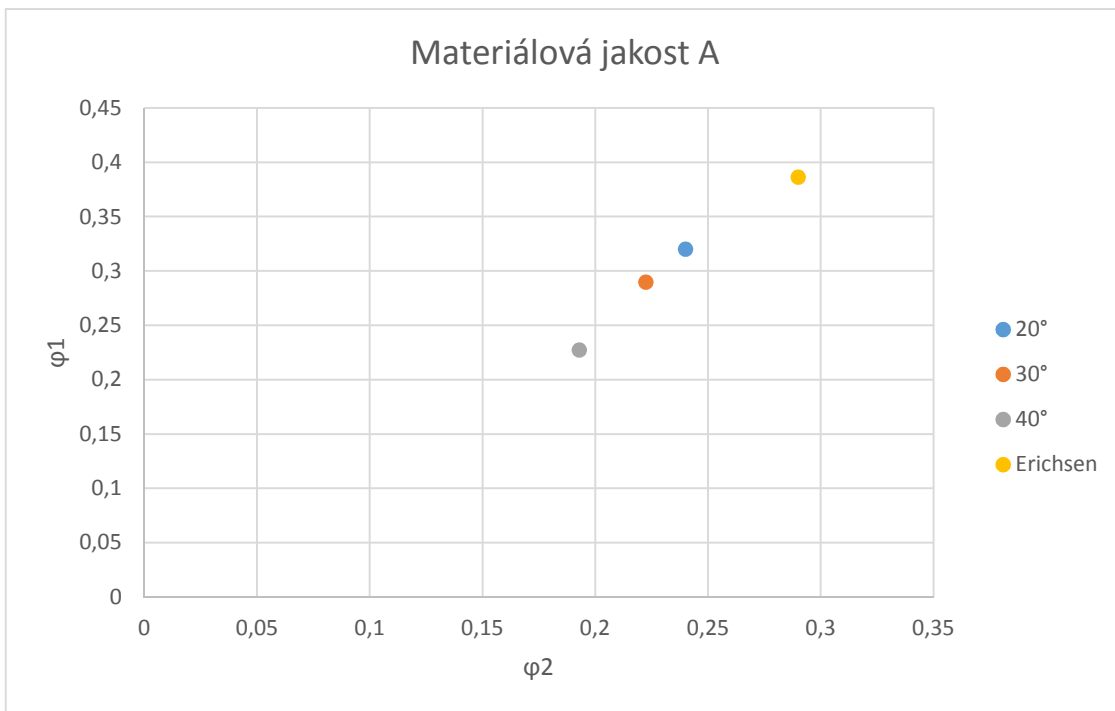
Obr. 48: Šarže A, 20°, snímek po vzniku trhliny



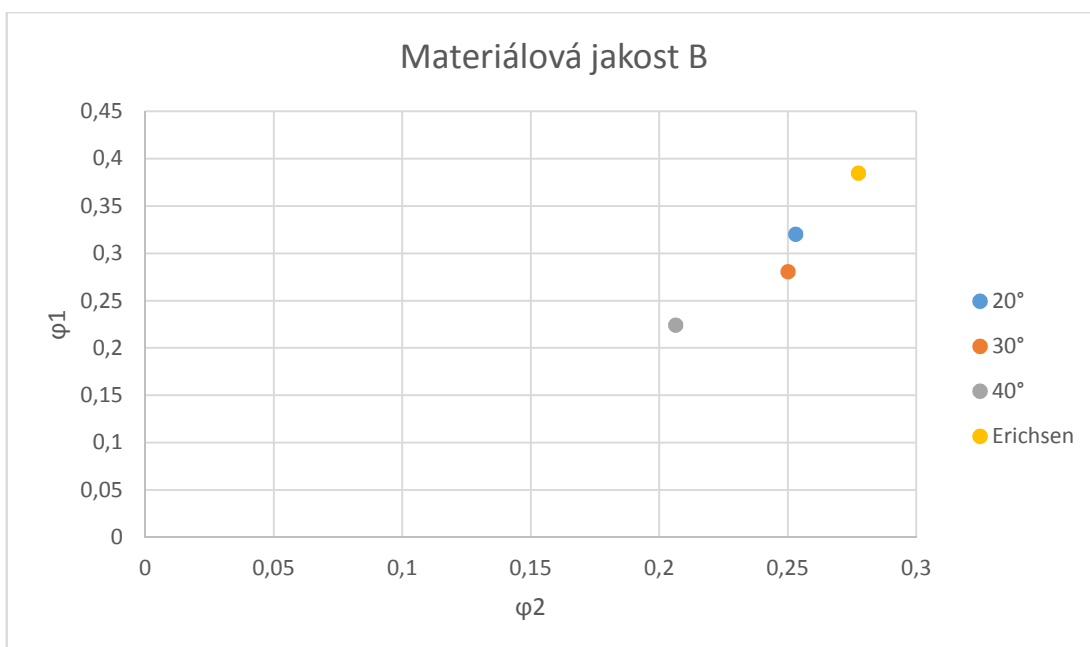
Obr. 49: Šarže A, 40°, snímek před vznikem trhliny



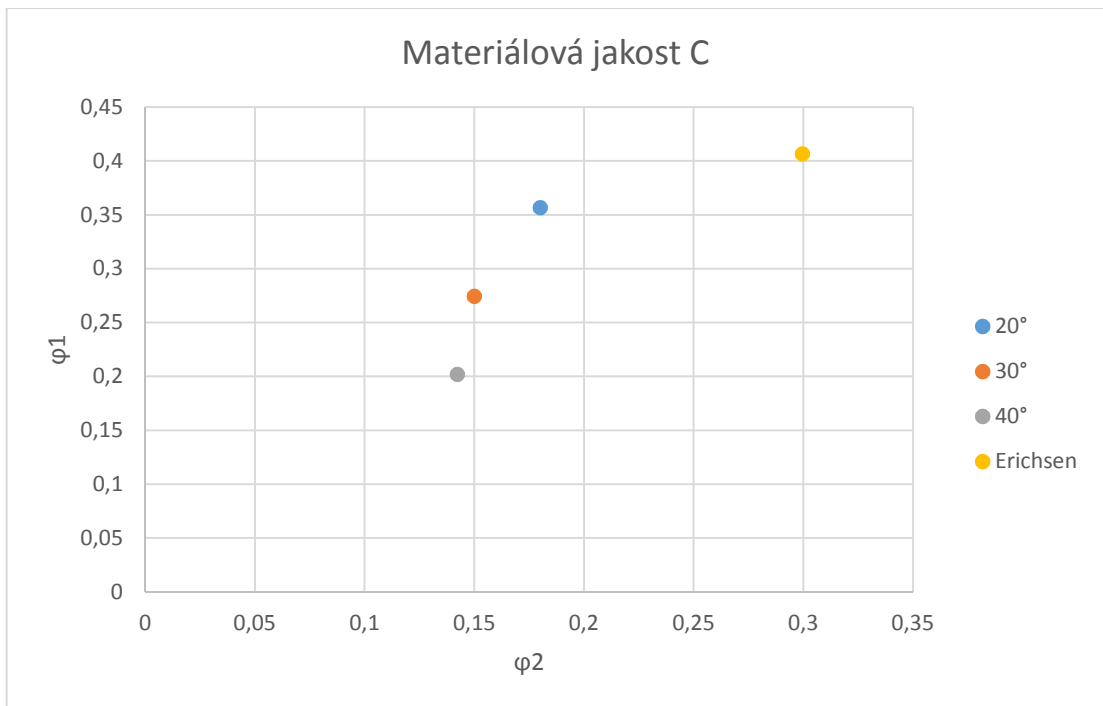
Obr. 50: Šarže A, 20°, snímek po vzniku trhliny



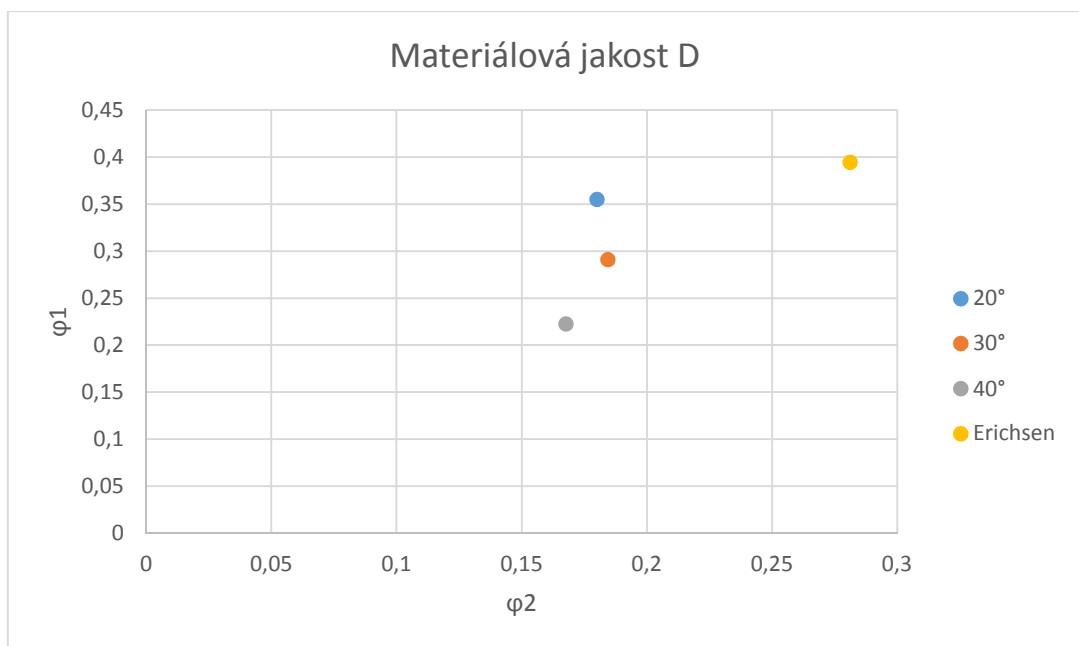
Obr. 51: Poloha bodů v diagramu FLD pro různé podmínky zkoušení pro materiálovou šarží A



Obr. 52: Poloha bodů v diagramu FLD pro různé podmínky zkoušení pro materiálovou šarží B

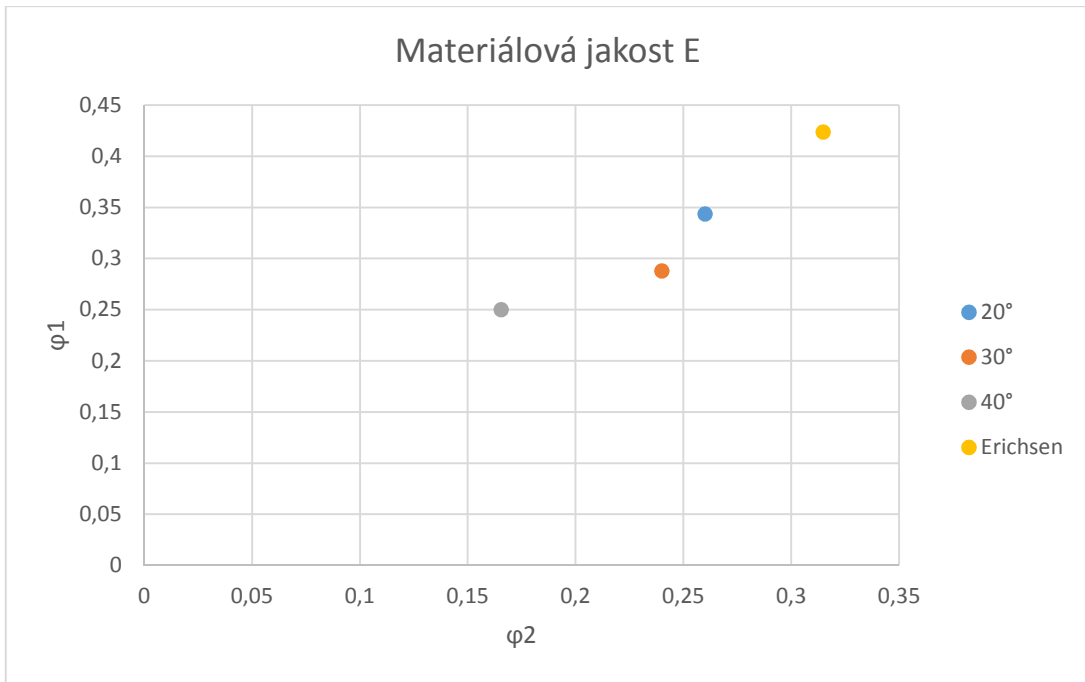


Obr. 53: Poloha bodů v diagramu FLD pro různé podmínky zkoušení pro materiálovou šarží C

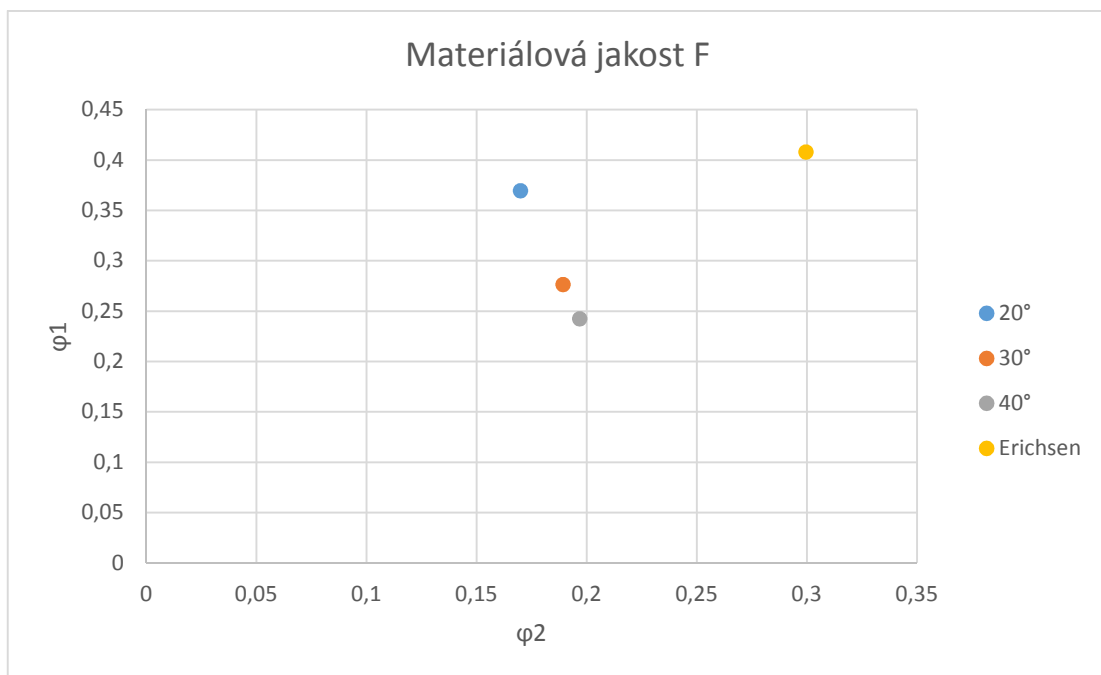


Obr. 54: Poloha bodů v diagramu FLD pro různé podmínky zkoušení pro materiálovou šarží D

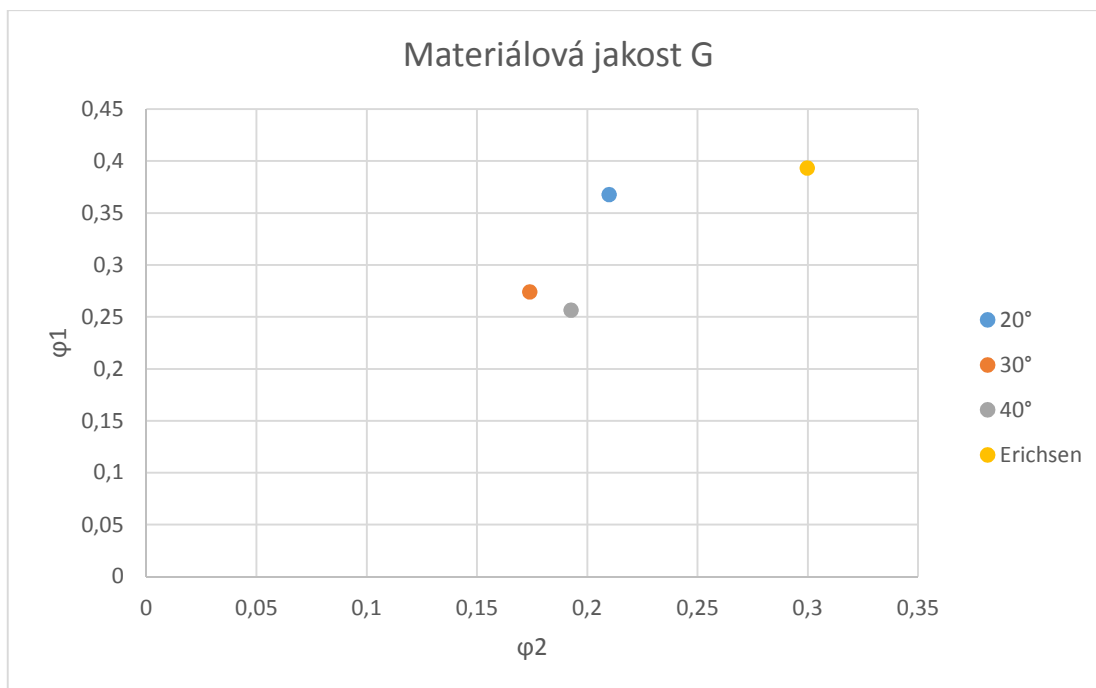




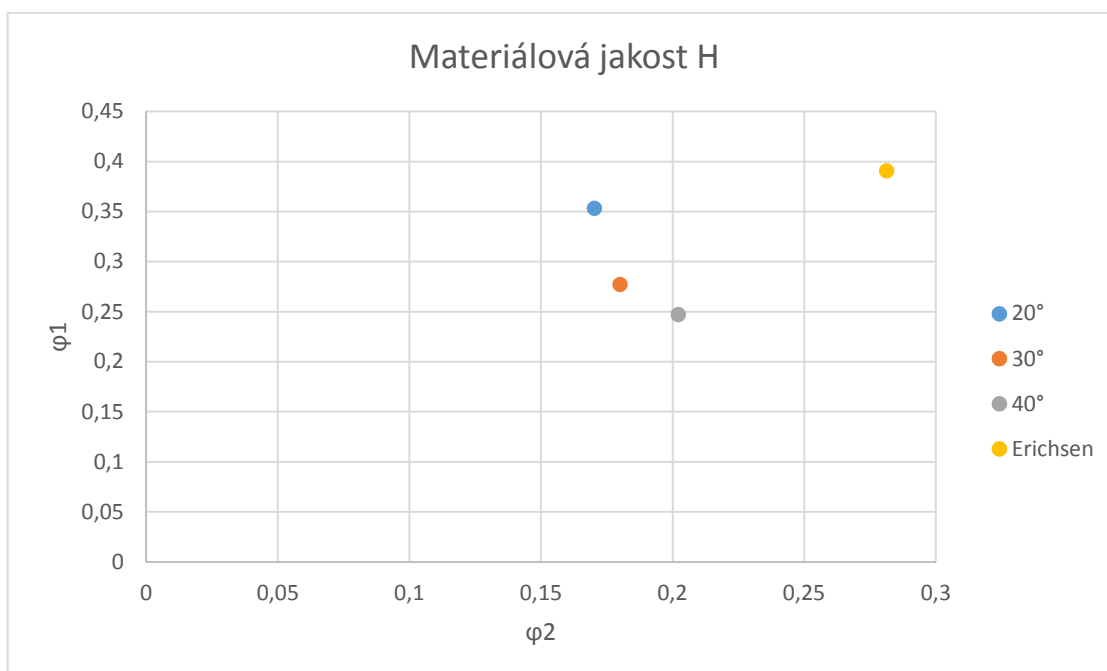
Obr. 55: Poloha bodů v diagramu FLD pro různé podmínky zkoušení pro materiálovou šarží E



Obr. 56: Poloha bodů v diagramu FLD pro různé podmínky zkoušení pro materiálovou šarží F



Obr. 57: Poloha bodů v diagramu FLD pro různé podmínky zkoušení pro materiálovou šarží G



Obr. 58: Poloha bodů v diagramu FLD pro různé podmínky zkoušení pro materiálovou šarží H

U jednotlivých šarží je jasně patrný vliv rychlosti deformace. Největší zásobu plasticity materiálu vykazuje statická zkouška podle Erichsena při minimální rychlosti deformace, s rostoucí rychlostí deformace se velikost zásoby plasticity snižuje. Velikost rychlosti deformace koresponduje s úhlem vychýlení zkušebního nástroje před zkouškou, s rostoucí hodnotou úhlu roste velikost rychlosti deformace. [I-9]

## 9 Závěr

V disertační práci je popsána problematika chování materiálu při plošném tváření. Jsou řešeny faktory, které ovlivňují tvařitelnost materiálu v podmínkách plošného tváření. Teoretická část práce je především zaměřena na chování materiálu při změně rychlosti deformace. Na základě dosažené úrovně poznání v oblasti lisování velkoplošných výlisků plyne nutnost se touto problematikou zabývat. Citlivostí materiálu na rychlost deformace se však většina autorů nezabývá z hlediska lisovacího procesu a z hlediska obvyklých materiálových jakostí používaných pro výrobu pohledových dílů karoserie. Jak z teoretické části práce plyne, citlivost na rychlost deformace je běžně řešena v oblastech vysokých rychlostí deformace (např. bariérových zkoušek) a dále pak na středně a vysoce pevných ocelových materiálových jakostech (oceli typu DP apod.) či neželezných kovech.

V rámci práce byly stanoveny 5 hlavních cílů práce:

- 1) Konstrukční návrh experimentálního zařízení pro sledování citlivosti materiálu na rychlost deformace při podmínkách blízkých 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.

Návrh konstrukčního řešení experimentálního zařízení umožňujícího sledování chování materiálu na změnu rychlosti deformace spočíval v realizaci ideového návrhu, stanovení výhod a nevýhod jednotlivých variant, ověření pevnostních výpočtů. Následně byla vybrána varianta, která nejlépe vyhoví zadání. Poté byl realizován návrh konstrukčního řešení funkčních částí, systému upínání zkušebních vzorků, návrhu konstrukce z hlediska dostatečné energie pro realizaci deformace, aby nedocházelo ke snižování rychlosti pohybu nástroje v průběhu zkoušky. Dále bylo třeba vyřešit návrh vhodných snímačů k popisu vlastního děje. Navržené konstrukční řešení umožňuje realizovat experimenty v širokém spektru rychlostí deformace, Pro malé rychlosti pohybu nástroje je třeba vkládat do upínací hlavy závaží. [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 získaných výsledků s běžně používanými statickými zkouškami ověřující chování materiálu pro operace hlubokého tažení.

Následně bylo ověřeno chování materiálové jakosti DC06+ZE50/50-B-PO, které bylo zastoupeno 8 šaržemi materiálu, pro omezení již tak širokého rozsahu experimentální části byl tvar zkušební vzorku omezen pouze na kruhový tvar přístřihu dle navržené metodiky. Pro experimenty byly voleny úhly dopadu nástroje 20°, 30° a 40°. Pro každý úhel a pro každou šarži materiálu byla snaha vytvořit minimálně 10 zkušebních vzorků, což se ne u všech šarží z hlediska požadovaného počtu zkušebních vzorků nepodařilo vyřešit. Přesto bylo realizováno a vyhodnoceno více než 200 zkušebních vzorků. Získaná data byla analyzována a vyhodnocena, výsledky jsou prezentované v kapitole 7.3. [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, kdy z grafů pro všechny analyzované šarže materiálu plyne, že s rostoucí rychlostí deformace vznikne trhlina při menší dosažené deformaci. Největší deformace do vzniku trhliny je dosažena při Erichsenově zkoušce hlubokotažnosti. [I-7, I-8, I-9]

Z výsledků experimentu je také patrné, že s rostoucí rychlostí deformace roste energie potřebná pro vznik trhliny. S vyšší hodnotou energie při vyšších rychlostech deformace souvisí i velikost tvářecích sil, které jsou také vyšší. To klade výrazně vyšší nároky na tvářecí stroje. Tato práce potvrzuje zkušenosti z praxe, kdy zvyšování rychlosti pohybu nástroje může vést k přetěžování tvářecích strojů a tím pádem se zvyšuje riziko jejich poškození. Je třeba si uvědomit, že poškození tvářecích strojů nebo nástrojů vede k odstávce zařízení, čímž vznikají značné ztráty.

Výsledky této práce nelze brát jako konečné. Bude třeba se věnovat analýzám chování materiálu pro další navržené tvary zkušebních vzorků, které představují jiné deformační stavy. Tím bude vznikat část diagramu FLD závislá na změně rychlosti deformace.

Bylo by vhodné výsledky této práce verifikovat pomocí numerických simulací. Je otázkou, jak budou výsledky simulací závislé na změně rychlosti deformace při lisovacím procesu korespondovat s provedenými experimenty a jak se s touto problematikou vypořádají materiálové modely používané pro numerické simulace.

Při vyšších rychlostech deformace jsou na navrženém zařízení patrné rezonance. Vzhledem k tomu, že tyto vyšší rychlosti se blíží barierovému rychlostem, což není předmětem práce, nebyla tomu věnována v rámci práce další pozornost. Bylo by však vhodné zabývat se otázkou jejich potlačení.

Dále by bylo vhodné zabývat se analýzou dalších materiálových jakostí, které jsou běžně používány pro stavbu karoserie automobilu. Jedná se především o oceli s vyšší mezí kluzu (HX, HC, popř. pak oceli podle výrobců DP, CP apod.).

Další oblastí možného vylepšení práce je použití optického systému, který bude umožňovat sledování vzniku deformace v reálném čase a provádět analýzu deformace na povrchu plechu. Pro realizaci práce nebyl tento systém k dispozici. Dalším omezením může být požadavek na vysokou rychlosti snímání při vlastním měření.

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 užitného 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.

## 9.1 Splnění cílů práce

### 1) Konstrukční návrh zařízení pro sledování citlivosti materiálu na rychlost deformace při podmínkách blížících 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.**

### 2) 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.**

### 3) 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.**

### 4) 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 deformace. **Cíl by splněn.**

### 5) Ověření chování materiálové jakosti DC 06 dle navržené metodiky

Na vybraných šaržích materiálové jakosti DC 06 bylo ověřeno chování materiálu při různých rychlostech deformace. Získané celkové výsledky z průběhu měření byly porovnány s výsledky hlubokotažnosti dle Erichsena a jsou uvedeny v Kap. 7.3, detailní výsledky jsou uvedeny Příloze 3 až Příloze 7. **Cíl byl splněn.**

## 9.2 Přínosy práce

- Bylo navrženo konstrukční řešení zařízení, které umožňuje analyzovat chování materiálu při různých rychlostech deformace. Zařízení je konstrukčně řešeno tak, že výměnou tvářecích nástrojů umožňuje sledování libovolných tvarů nástrojů, umožňuje vytvoření například modulově zmenšených nástrojů reálných výlisků. Koncepce zařízení neumožňuje použití reálných lisovacích nástrojů, protože není možné vyvodit dostatečně velké deformace pro vznik trhliny, zabezpečit, že se v průběhu experimentu nebude značně měnit rychlost pohybu nástroje.
- Byl vytvořen software, který umožňuje registrovat a analyzovat naměřené hodnoty z průběhu experimentu.
- Byla navržena metodika zkoušení materiálu při různých rychlostech deformace.
- Navržené konstrukční řešení, vytvořený software, vytvořená metodika byly ověřeny experimentem.
- Výsledky práce umožní nový způsob popisu definování chování materiálu z hlediska rychlosti deformace. Na základě dlouhodobého sledování bude možné definování parametru citlivosti na rychlost deformace a rozdělit používané materiály podle vhodnosti pro nejsložitější díly karoserie automobilu, například výlisků dveřních ráků. Výsledky této práce pak umožní zvýšit rychlost lisovacího procesu a tím snížit finanční ztráty spojené s lisováním těchto dílů.



## Seznam použitých symbolů a zkratk

$r$	Součinitel plastické anizotropie	[-]
$n$	Exponent deformačního zpevnění	[-]
$A_{80\text{ mm}}$	Celková tažnost vzorku o výchozí délce 80 mm	[%]
$R_m$	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu, plastické prodloužení měřené průtahoměrem	[MPa]
$\Delta r$	Stupeň plošné anizotropie	[-]
TRIP	Transformation Induced Plasticity	
TWIP	Twinning Induced Plasticity	
FM	Dvoufázové feriticko-martenzitické oceli	
CP	Vícefázové oceli	
IF	Interstitial free (bezintersticiální oceli)	
BH	Bake hardening (IF oceli s BH efektem)	
FCC	krychlová plošně středěná krystalografická mřížka (face centered cubic)	
BCC	krychlová prostorově středěná krystalografická mřížka (body centered cubic)	
$\epsilon$	Skutečná plastická deformace	[-]
$S_0$	Počáteční průřezová plocha zkoušené délky	[mm <sup>2</sup> ]
$A$	Tažnost v procentech	[%]
$a_0$	Počáteční tloušťka plochého zkušebního tělesa	[mm]
$b_0$	Počáteční šířka zkoušené délky plochého zkušebního tělesa	[mm]
$L_u$	Konečná měřená délka po lomu	[mm]
$L_o$	Počáteční měřená délka	[mm]
$F$	Síla působící na zkoušený materiál	[N]
$L_e$	Měřená délka průtahoměru	[mm]

$m_E$	Směrnice pružné části závislosti napětí - prodloužení v procentech měřené průtahoměrem	[MPa]
E	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
e	Poměrná deformace	[-]
$\varepsilon$	Skutečná deformace	[-]
$\dot{\varepsilon}$	Deformační rychlost	[s <sup>-1</sup> ]
v	Rychlost posuvu příčnicku	[mm.min <sup>-1</sup> ]
m	Exponent citlivosti na rychlost deformace	[-]
$k_p$	Přetvárná pevnost	[MPa]
$A_g$	Plastické prodloužení v procentech měřené průtahoměrem při maximálním zatížení	[%]
$A_{gt}$	Celkové prodloužení v procentech měřené průtahoměrem při maximálním zatížení	[%]
FLD	Diagram mezních přetvoření	
FLC	Křivka mezních přetvoření	
FPS	Snímků za sekundu	
$d_1$	Velikost elementu měrné sítě po deformaci	[mm]
$d_0$	Výchozí velikost elementu měrné sítě	[mm]

## **Přílohy:**

### **Příloha 1**

Dostupné i na CD. Obsahuje kompletní výkresovou dokumentaci k experimentálnímu zkušebnímu stroji v celkovém počtu 43 stran.

### **Příloha 2**

Dostupné pouze na CD. Obsahuje technický popis použité výpočtové karty PCI-1712/L.

PCI-171220150714145348.pdf	1
strana	
4daqsc199-201_ETC_212-213.pdf	11 stran

### **Příloha 3**

Dostupné pouze na CD. Obsahuje grafy závislosti síly na dráze při úhlu dopadu 20° pro vzorky A, B, C, D a F na 26 stranách.

### **Příloha 4**

Dostupné pouze na CD. Obsahuje grafy závislosti síly na dráze při úhlu dopadu 30° pro vzorky A, B, C, D, E, F, G a H na 37 stranách.

### **Příloha 5**

Dostupné pouze na CD. Obsahuje grafy závislosti síly na dráze při úhlu dopadu 40° pro vzorky A, B, C, D, E, F, G a H na 37 stranách.

### **Příloha 6**

Dostupné pouze na CD. Obsahuje záznamy z vysokorychlostní kamery při úhlu dopadu 20°, 30° a 40° pro vzorky A, B, C, D, E, F, G a H.

## 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, 520s.
- [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, 16 s.
- [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  $10^3$  s<sup>-1</sup>*. 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, 21s.
- [26] CAREL TEN HORN, et al. TATA STEEL. *Corus Research Development & Technology. The Corus-Vegter Lite material model: High accuracy with few parameters*. Mumbai, 8s.
- [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, 170 s.
- [32] ŠLAIS, M. *Studium vlivu rychlostních a teplotních parametrů na tvařitelnost 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, 94s.
- [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 tvařitelnost 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-Informations-Zentrum, Düsseldorf. *Schmelztauchveredeltes Band und Blech*. 2008, 47 s.
- [45] Stahl-Informations-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, 6 s.
- [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., KUBELKOVÁ, 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, 5 s.
- [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)

### **Další publikační činnost autora:**

- [II-1] TATÍČEK, F., PAČÁK, T., KUBELKA, M. *Přehled technologií pro dělení materiálu v zápusťkových kovárnách*. In: Kovárenství, 2014, vol. 49, pp. 37-40. ISSN 1213-9289.
- [II-2] KUBELKA, M., TATÍČEK, F., PILVOUSEK, T., PAČÁK, T., CVEŠPER, D. *The Analysis of Pressed Parts Deformation on Small Radii*. In: METAL 2014 Conference Proceedings. Ostrava: Tanger, 2014. ISBN 978-80-87294-52-9, 6 s.
- [II-3] PAČÁK, T., KUBELKA, M., TATÍČEK, F., PILVOUSEK, T. *The Analysis and Elimination of Springback in Stamping Using Numerical Simulations*. In: Technological Forum 2014. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2014, pp. 102-106. ISBN 978-80-87583-10-4.
- [II-4] ŠANOVEC, J., KUBELKA, M., TATÍČEK, F. *The Guidelines for Developing Technologies Forming in the Manufacture of Car Bodies*. In: Technological Forum 2014. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2014, pp. 229-231. ISBN 978-80-87583-10-4.
- [II-5] CHRÁŠŤANSKÝ, L., KUBELKA, M., PAČÁK, T., CVEŠPER, D., TATÍČEK, F. *The Issue of Ensuring the Dimensional Stability of Molded Car Body Joints*. In: Technological Forum 2014. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2014, pp. 60-65. ISBN 978-80-87583-10-4.
- [II-6] CHRÁŠŤANSKÝ, L., TATÍČEK, F., KUBELKA, M., PAČÁK, T., HÁLEK, J. *The Issue of Ensuring the Dimensional Stability of Molded Car Body Joints*. In: Proceedings of International Conference on Innovative Technologies IN-TECH 2014. Rijeka: Faculty of Engineering University of Rijeka, 2014, pp. 373-376. ISSN 1849-0662.
- [II-7] KUBELKA, M., TATÍČEK, F., CVEŠPER, D., PAČÁK, T., PILVOUSEK, T. *The Verification of Size Deformations on Small Radii*. In: Proceedings of International Conference on Innovative Technologies IN-TECH 2014. Rijeka: Faculty of Engineering University of Rijeka, 2014, pp. 341-344. ISSN 1849-0662.
- [II-8] MACHEK, V., TATÍČEK, F., KUBELKA, M. *The Metallic Glasses*. In: Technological Forum 2014. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2014, pp. 199-201. ISBN 978-80-87583-10-4.
- [II-9] TURZA, L., KUBELKA, M., TATÍČEK, F., CVEŠPER, D. *Risk Analysis at Forming-Stamping*. In: Technological Forum 2014. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2014, pp. 113-117. ISBN 978-80-87583-10-4.

- [II-10] TATÍČEK, F., KUBELKA, M., PAČÁK, T. *Analýza problémů s deformacemi odlučovací elektrody*. [Výzkumná zpráva]. Praha: ČVUT, Fakulta strojní, Ú 12133, 2013. U12133/2013/034, 8 s.
- [II-11] TATÍČEK, F., KUBELKA, M., PAČÁK, T. *Příprava vzorků pro ověření mechanických vlastností svarových částí* [Výzkumná zpráva]. 2013. U12133/2013/033, 4 s.
- [II-12] TATÍČEK, F., TURZA, L., PAČÁK, T., KUBELKA, M. *Analýza SW pro simulaci tepelného zpracování* [Výzkumná zpráva]. Praha: ČVUT FS, Ú 12133, 2013. U12133/2013/036, 21 s.
- [II-13] PILVOUSEK, T., ŠANOVEC, J., TATÍČEK, F., KUBELKA, M. *Trojrozměrná digitalizace nástrojů pro hluboké tažení tvarově složitých dílů automobilové karoserie a jejich adaptace pro systémy numerických simulací*. In: Technological Forum 2012. Praha: ČVUT FS, 2012, pp. 53-58. ISBN 978-80-01-05076-7.
- [II-14] TATÍČEK, F., DOUDA, J., HORVÁT, L., PILVOUSEK, T., KUBELKA, M. *Analýza povrchů teplosměnných ploch z vysokolegovaných ocelí*. In: Technological Forum 2011. Praha: ČVUT FS, Ústav strojírenské technologie, 2011, pp. 164-168. ISBN 978-80-01-04853-5.
- [II-15] KUBELKA, M., PILVOUSEK, T., TATÍČEK, F., HÁJEK, J., OUŠKA, M. *Sledování BH efektu u oceli HX 220 BD pro různé stavy deformace a stavy tepelného vytvrzení*. In: Technological Forum 2011. Praha: ČVUT FS, Ústav strojírenské technologie, 2011, pp. 41-46. ISBN 978-80-01-04853-5.
- [II-16] TATÍČEK, F., PILVOUSEK, T., KUBELKA, M. *Automatizace a mechanizace v plošném tváření*. In: MM Průmyslové spektrum. 2010, vol. 12, pp. 68-69. ISSN 1212-2572.
- [II-17] HERMAN, A., ŠTOURAC, F., KUBELKOVÁ, I., KUBELKA, M., DOLEŽAL, J. *Reduction of energy loss in Al alloys transport*. In: Technological Forum 2016. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2016, pp. 218-222. ISBN 978-80-87583-17-3.
- [II-18] MACHEK, V., TATÍČEK, F., KUBELKA, M., PAČÁK, T. *The Surface Quality of Hot-rolled Steel Sheets and Wide Steel*. In: Technological Forum 2015. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2015, pp. 220-225. ISBN 978-80-87583-13-5
- [II-19] ŠANOVEC, J., KUBELKA, M. *Intelligent Mechatronic Tools and Equipment*. In: Technological Forum 2015. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2015, pp. 261-263. ISBN 978-80-87583-13-5.

- [II-20] CHRÁŠŤANSKÝ, L., HÁLEK, J., TATÍČEK, F., PAČÁK, T., KUBELKA, M. *The Methods of Fixation and Stabilization of Hemmed Joints for Panel Parts of Car Body Parts*. In: Technological Forum 2015. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2015, pp. 57-60. ISBN 978-80-87583-13-5.
- [II-21] PAČÁK, T., KUBELKA, M., TATÍČEK, F., CHRÁŠŤANSKÝ, L. *The Methodology and Determination of the Springback in Large Metal Stamping*. In: Technological Forum 2015. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2015, pp. 97-101. ISBN 978-80-87583-13-5.
- [II-22] PILVOUSEK, T., ŠANOVEC, J., KUBELKA, M., PAČÁK, T. *Laser Scanning Technology in Numerical Simulations of Deep Drawing Processes*. In: Technological Forum 2015. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2015, pp. 102-107. ISBN 978-80-87583-13-5.

## Seznam obrázků:

Obr. 1: Vliv obsahu legujících prvků na růst meze kluzu austenitu .....	14
Obr. 2: Přehled faktorů ovlivňující lisovací proces .....	15
Obr. 3: Pracovní diagram bez výrazné meze kluzu [7].....	20
Obr. 4: Pracovní diagram s výraznou mezí kluzu [7] .....	20
Obr. 5: Křivky zpevnění pro různé technické kovy [6] .....	28
Obr. 6: Závislost napětí a deformace pro různé vzorky s konstantní rychlosti deformace vzorku [6]:.....	29
Obr. 7: Závislost napětí a deformace pro vzorek se změnou rychlosti deformace v průběhu zkoušky[6]: .....	29
Obr. 8: Vývoj deformace výlisku dveřních ráků .....	31
Obr. 9: Vývoj změny tloušťky plechu výlisku dveřních ráků .....	32
Obr. 10: Rozbor a ukázka vzniku trhliny.....	34
Obr. 11: Vliv zkušební metody na polohu křivek v diagramu FLD .....	34
Obr. 12: Vliv tloušťky materiálu mechanických vlastností na polohu křivek v diagramu FLD.....	35
Obr. 13: Vliv parametru $m$ na křivky v FLD diagramu s efektivní nestabilitou přístupu [30].....	36
Obr. 14: Vliv parametru $m$ na křivky v FLD diagramu s modifikovanou efektivní nestabilitou [30] .....	36
Obr. 15: Celkový pohled na navrhované zkušební zařízení .....	41
Obr. 16: Celkový pohled na model zkušebního zařízení .....	42
Obr. 17: Boční pohled na model zkušebního zařízení .....	42
Obr. 18: Pohled na model funkční části zkušebního zařízení.....	43
Obr. 19: Přední pohled na model funkční části zkušebního zařízení.....	43
Obr. 20: Výměnný universální nástroj.....	44
Obr. 21: Systém přidržovače a tažnice .....	45
Obr. 22: Princip měření na Charpyho kladivu .....	45
Obr. 23: Úhlový potenciometr .....	47
Obr. 24: Systém značení tenzometrů .....	47
Obr. 25: Upevnění polovodičového tenzometru na nástroji .....	48
Obr. 26: Pohled na rozvodnici .....	49
Obr. 27: Zesilovací jednotka s popisem vstupů a výstupů .....	49
Obr. 28: Blokové schéma měřicího řetězce .....	49
Obr. 29: Kalibrace při zesílení 100 x .....	50
Obr. 30: Kalibrace při zesílení 200 x .....	50
Obr. 31: Kalibrace při zesílení 1000 x .....	51
Obr. 32: Vývojový diagram činností souvisejících s dokumentací průběhu zkoušky....	52
Obr. 33: Celkový pohled na okno aplikace.....	53
Obr. 34: Detailní pohled na základní nastavení před začátkem zkoušky .....	54
Obr. 35: Dialogové okno opakovaného spouštění aplikace.....	54
Obr. 36: Ukázka výpisu průběhu zkoušky .....	55
Obr. 37 Tvary zkušebních přístřihů .....	56

Obr. 38: (a) Základní princip, (b) Příklad šablony .....	57
Obr. 39: Nastavení parametrů měření .....	58
Obr. 40: Průběh zkoušky pomocí Charpyho kladiva .....	60
Obr. 41: Průběh síly pro vybrané jakosti pro úhel dopadu nástroje 20° .....	64
Obr. 42: Šarže A, 20°, snímek před vznikem trhliny .....	64
Obr. 43: Šarže A, 20°, snímek po vzniku trhliny .....	64
Obr. 44: Průběh síly pro vybrané jakosti pro úhel dopadu nástroje 20° .....	67
Obr. 45: Průběh síly pro vybrané jakosti pro úhel dopadu nástroje 30° .....	68
Obr. 46: Průběh síly pro vybrané jakosti pro úhel dopadu nástroje 40° .....	68
Obr. 47: Šarže A, 20°, snímek před vznikem trhliny .....	70
Obr. 48: Šarže A, 20°, snímek po vzniku trhliny .....	70
Obr. 49: Šarže A, 40°, snímek před vznikem trhliny .....	70
Obr. 50: Šarže A, 20°, snímek po vzniku trhliny .....	70
Obr. 51: Poloha bodů v diagramu FLD pro různé podmínky zkoušení pro materiálovou šarži A .....	71
Obr. 52: Poloha bodů v diagramu FLD pro různé podmínky zkoušení pro materiálovou šarži B .....	71
Obr. 53: Poloha bodů v diagramu FLD pro různé podmínky zkoušení pro materiálovou šarži C .....	72
Obr. 54: Poloha bodů v diagramu FLD pro různé podmínky zkoušení pro materiálovou šarži D .....	72
Obr. 55: Poloha bodů v diagramu FLD pro různé podmínky zkoušení pro materiálovou šarži E .....	73
Obr. 56: Poloha bodů v diagramu FLD pro různé podmínky zkoušení pro materiálovou šarži F .....	73
Obr. 57: Poloha bodů v diagramu FLD pro různé podmínky zkoušení pro materiálovou šarži G .....	74
Obr. 58: Poloha bodů v diagramu FLD pro různé podmínky zkoušení pro materiálovou šarži H .....	74