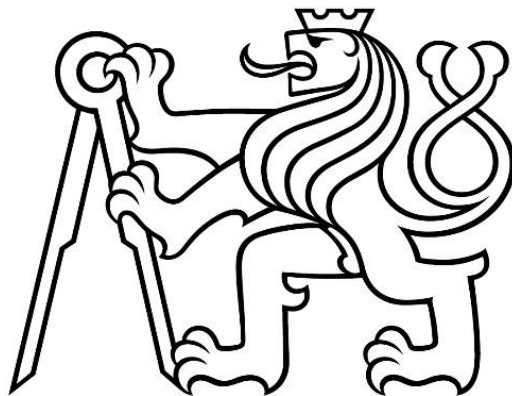


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Chování výšepevných materiálů s ohledem na rychlost  
deformace**

Autor:

Jiří Martínek

Vedoucí práce:

Ing. Vít Novák

Studijní obor:

Teoretický základ strojního inženýrství

Praha 2020

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Martínek** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **475043**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Teoretický základ strojírenství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Chování výšepevných materiálů s ohledem na rychlost deformace**

Název bakalářské práce anglicky:

**The effect of strain rate on position of forming limit curve**

Pokyny pro vypracování:

Vlastnosti materiálů jsou vyhodnocovány při standardních podmínkách, které jsou však velmi vzdálené reálnému lisovacímu procesu. Cílem práce je porovnat chování materiálu při různých rychlostech deformace při stanovení křivek mezní tvářitelnosti. Celá problematika je o to zajímavější, pokud je pro experiment použit materiál o vyšších pevnostních charakteristikách.

- 1) Úvod a seznámení s problematikou
- 2) Popis realizovaného experimentu, stanovení výchozích podmínek
- 3) Sledování vlivu rychlosti deformace na tvářitelnost pro materiál DP500
- 4) Porovnání dosažených výsledků měření
- 5) Shrnutí výsledků a závěrečné zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

ČSN EN 12004-2  
Sheet Metal Forming Processes and Die Design, Vukota Bojanovic  
ASM Handbook Volume 14B: Metalworking: Sheet Forming  
Další literatura na doporučení vedoucího práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Vít Novák, ústav strojírenské technologie FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

**Ing. František Tatiček, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS**

Datum zadání bakalářské práce: **29.04.2020** Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

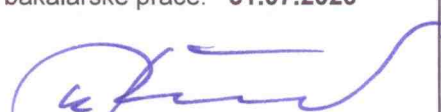
Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2020**



Ing. Vít Novák  
podpis vedoucí(ho) práce



doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



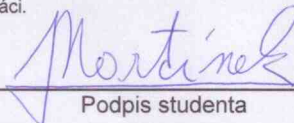
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

25.5.2020

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Praze dne 15. 7. 2020

.....

Jiří Martínek

## **Poděkování**

V první řadě bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Vítu Novákovi za jeho cenné rady a připomínky k bakalářské práci, ale také za kolegiální a přátelský přístup a za veškerý čas a všechnu energii, co mi věnoval. Poté bych mu chtěl poděkovat za pomoc při realizování konkrétního experimentu k mojí bakalářské práci.

Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Františku Tatíčkoví, Ph.D. za cenné rady a připomínky v průběhu celé bakalářské práce.

## Anotace

Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
Téma bakalářské práce:	<b>Chování výšepevných materiálů s ohledem na rychlost deformace</b>
Akademický rok:	2019/2020
Autor:	Jiří Martínek
Vedoucí práce	Ing. Vít Novák
Konzultant	Ing. František Tatíček Ph.D.
Klíčová slova:	Tváření, tvářitelnost, deformace, rychlost deformace, materiálové zkoušky, křivka mezní deformace, FLD, systém Aramis, zkouška Nakajima, digitální korelace obrazu, výšepevné oceli, HCT500X+Z100-B-O
Abstrakt:	<p>Bakalářská práce se v teoretické části zabývá tvářením a s ním související rychlostí deformace. Dále je zde popisován princip digitální korelace obrazu. Tuto problematiku je třeba znát pro vyhodnocení experimentu, jehož podmínky jsou z velké části dány normou a jsou dalším tématem teoretické části. Následujícím tématem je diagram mezního přetvoření, který je třeba pochopit pro správné měření a vyhodnocení experimentu. Poslední kapitolou teoretické části jsou výšepevné oceli (DP oceli), z nichž je právě jeden konkrétní typ následně měřen. V experimentální části byla provedena série zkoušek plechu z materiálu HCT500X+Z100-B-O o tloušťce 0,6 mm pro rychlosti posuvu tažníku 2mm/s a 12mm/s a byly vytvořeny FLC křivky. Bylo zjištěno, že rychlejší posuv tažníku posune křivku FLC na FLD diagramu směrem dolů ve směru hlavních deformací.</p>

## Annotation

University:	Czech Technical University in Prague Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Department of Manufacturing Technology
Head of the department:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
Theme of bachelor thesis:	<b>The effect of strain rate on position of forming limit curve</b>
Academic year	2019/2020
Autor:	Jiří Martínek
Supervisor:	Ing. Vít Novák
Consultant:	Ing. František Tatíček Ph.D.
Keywords:	Forming, formability, deformation, strain rate, material testing, forming limit curve, FLD, system Aramis, Nakajima test, digital image correlation, high strength steels, HCT500X+Z100-B-O
Abstract:	<p>The bachelor thesis in the theoretical part describes metal forming and related strain rate. Next, there is a description of the digital image correlation. This topic is necessary to understand for evaluation of the experimental part which conditions are described in the next chapter of the theoretical part. The next discussed topic is forming limit diagram, which is needed to know when evaluating the experiment. The last chapter of theoretical part is dual phase steels of which one type is measured. In the experimental part, a series of tests were executed on HCT500X+Z100-B-O of thickness 0,6 mm for punch speed of 2mm/s and 12mm/s and FLC curves were made. It was figured out, that the faster speed of punch moves the FLC curve on the FLD diagram downwards in the direction of the major strain.</p>

## OBSAH:

1. Úvod .....	9
2. Tváření.....	10
2.1. Rychlost deformace.....	11
3. Optické systémy pro měření přetvoření plechu .....	14
3.1. systém ARAMIS .....	14
3.1.1. Digitální korelace obrazu (DIC) .....	15
3.1.2. Dvourozměrná korelace (2D) .....	15
3.1.3. Třírozměrná korelace (3D) .....	18
3.2. Systém ARGUS .....	20
4. Diagram mezního přetvoření (FLD).....	21
5. Zkušební podmínky .....	23
5.1. Zkušební vzorky .....	24
5.1.1. Tloušťka vzorků.....	24
5.1.2. Geometrie vzorků .....	24
5.1.3. Počet různých geometrií vzorku .....	25
5.1.4. Počet zkoušek pro každou geometrii .....	26
5.2. Nanášení patternu.....	26
5.3. Příprava nástroje.....	27
5.4. Vyhodnocení deformace .....	28
5.4.1. Poloha měřených bodů.....	28
6. Výšepevné oceli (DP oceli) .....	29
7. Experimentální část .....	32
7.1. Průběh zkoušky .....	32
7.1.1. Kalibrace měřicího zařízení .....	32
7.1.2. Příprava zkušebních vzorků.....	32
7.1.3. Odmaštění a očištění .....	33
7.1.4. Nanesení patternu .....	34
7.1.5. Kontrola nástřiku .....	35
7.1.6. Mazání nástroje.....	36
7.1.7. Vyhodnocení vzorku.....	37

7.2.	Materiál HCT500X+Z100-B-O .....	38
7.3.	Zkušební zařízení BUP600 a ARAMIS 4M Adjustable .....	40
7.4.	Naměřená data.....	42
7.5.	Komentář k naměřeným datům .....	43
8.	Závěr.....	44
9.	Seznamy .....	46
9.1.	Seznam použité literatury.....	46
9.2.	Seznam obrázků .....	49
9.3.	Seznam tabulek .....	50
10.	Přílohy .....	51



## 1. Úvod

Vlastnosti materiálů jsou vyhodnocovány při podmínkách, které jsou nařízeny normou. Nicméně při reálném lisovacím procesu se takových podmínek nedostává.

V automobilkách při výrobě karosářských výlisků je z důvodu nových nařízení EU kladen velký důraz na snižování hmotnosti karoserie. Nicméně požadavky na pasivní bezpečnost uživatelů automobilů se nemění, tudíž je třeba zachovat tuhost a pevnost. Řešením, které automobilky aplikují čím dál víc, je používání vysokopevnostních materiálů. Užíváním těchto materiálů je možné redukovat tloušťku plechu, a tudíž i snížit celkovou hmotnost karoserie.

Dalším důležitým faktorem, který ovlivňuje ekonomiku automobilek, je rychlost, za kterou dokáže jeden výlisek vyrobit. Rychlost celého tvářecího procesu úzce souvisí s rychlostí deformace (potažmo s rychlostí pohybu nástroje), která nám ovlivňuje polohu FLC křivky. Tato křivka zobrazuje při jaké hlavní a vedlejší deformaci dochází ke vzniku trhliny. Vyskytnou-li se aktuální deformace pod touto křivkou, jsme v bezpečné oblasti a na výlisku nevznikne trhlina. Zvyšováním rychlosti deformace se poloha této křivky vzhledem k vodorovné ose snižuje, tudíž se zmenšuje prostor bezpečné oblasti, ve které můžeme tvářet, což znamená menší přípustné přetvoření do hlavního a vedlejšího směru deformace.

Z důvodu ověření, zda rychlost deformace má opravdu vliv na polohu FLC křivky, bude provedena série zkoušek pro různé rychlosti posuvu nástroje. Analýza deformací měřených vzorků bude provedena za pomoci bezkontaktního měřicího systému ARAMIS. Výsledky z tohoto měření budou dále vyhodnoceny a zakresleny do FLD (Forming Limit Diagram) diagramu jako FLC křivky.

Pochopením problematiky vlivu rychlosti deformace na tvářecí proces je možné předejít nadměrné zmetkovitosti, způsobené vysokými požadavky na rychlost výroby a tudíž i rychlosti deformace.

## 2. Tváření

Tváření je technologický proces, jehož smyslem je způsobit původnímu materiálu trvalou deformaci do námi požadovaného tvaru, který bude splňovat předepsané rozměrové a geometrické tolerance. Podle převládajícího směru deformace se dělí na:

- Plošné tváření – deformace probíhá pouze ve dvou směrech
- Objemové tváření – deformaci ve třetím směru již není možné zanedbat, a tedy deformace probíhá ve všech třech směrech hlavních deformací

Pro vznik trvalé (plastické) deformace je zapotřebí překročit mezní napětí (mez kluzu). V případě, že toto napětí není překročeno, vrátí se zatěžované těleso zpět do původního stavu. Mechanismus vzniku plastické deformace funguje na základě dislokační teorie, tedy vznikem a pohybem poruch mřížky. Dva základní mechanismy deformace jsou:

- Skluz
- Dvojčatění

Tváření se podle tvářecí teploty rozděluje na:

- tváření za tepla
- za poloohřevu
- za studena.

Tváření za studena probíhá za teplot nižších než je rekrystalizační teplota daného materiálu (přibližně 0,4 x teplota tavení v Kelvinech). Při tváření za studena se zlepšují mechanické vlastnosti materiálu, dochází ke zpevňování materiálu a ke zvyšování meze kluzu. Ke zpevňování dochází kvůli tomu, že roste hustota poruch krystalové mřížky a vznikající dislokace si začnou vzájemně překážet. Deformace tudíž probíhá za zvyšujícího se napětí. Tento druh tváření se díky těmto žádoucím okolnostem používá v automobilovém průmyslu při výrobě karoserií a je aplikován v experimentu této práce. V problematice tváření je třeba zajistit, aby nedošlo k porušení soudržnosti materiálu (tedy ke vzniku trhlin). Schopnosti tělesa se deformovat až do porušení soudržnosti se říká tvářitelnost. [13],[17],[19]

## 2.1. Rychlost deformace

Největší podíl všech výlisků je vyráběn na klikových lisech. Ze samotného principu funkce klikového lisu není rychlost deformace konstantní, jelikož v úvratích se pohybuje beran lisu minimální rychlostí. V minulosti této problematice nebyl přikládán přílišný důraz a byla zjednodušována. V dnešní době je však záhodno tuto problematiku řešit, protože se automobilky v rámci ekonomické rentability snaží o snižování výrobních časů. Tyto vysoké takty automobilek způsobují, že tvářený materiál není schopen dostatečného přetvoření, a tak se i tvárný materiál poruší křehkým lomem z důvodu přiblížení hodnot k mezi pevnosti a mezi kluzu. [21],[22]

Deformace je základním pojmem v teorii tváření. Při deformaci tělesa se přemísťují jeho jednotlivé body, přičemž deformace je právě ono přemístění z místa původního do místa výsledného. Neuvažuje se přemístění celého tuhého tělesa. Poměrná deformace  $\varepsilon$  je definována jako:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1), [17]$$

Přičemž  $l_0$  je původní délka a  $l$  je výsledná délka. Pro velké deformace navrhl Ludvik takzvanou skutečnou (logaritmickou nebo přirozenou) deformaci:

$$d\varepsilon = \frac{dl}{l} \quad (2), [17]$$

$$\varphi = \ln \frac{l}{l_0} \quad (3), [17]$$

Matematicky se stav deformace popisuje tenzorem deformace:

$$\varepsilon_{ij} = \begin{pmatrix} e_{xx} & e_{yx} & e_{zx} \\ e_{xy} & e_{yy} & e_{zy} \\ e_{xz} & e_{yz} & e_{zz} \end{pmatrix} \quad (4), [17]$$

Pro zjednodušení zápisu indexů se někdy používá následující vyjádření tenzoru deformace:

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} e_x & \gamma_z/2 & \gamma_y/2 \\ \gamma_z/2 & e_y & \gamma_x/2 \\ \gamma_y/2 & \gamma_x/2 & e_z \end{pmatrix} \quad (5), [17]$$

U velkých deformací změna jedné složky může ovlivnit změnu ostatních složek, tudíž analýza deformačního stavu jako tenzoru může vést k chybám. Mezi složkou tenzoru a zkosem platí následující vztah:

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \gamma_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (6), [17]$$

Pro velké deformace je jednodušší posoudit okamžitý obraz než vztah mezi původním a výsledným stavem. Proto se vektor přemístění nahrazuje vektorem rychlosti toku materiálu, jehož složky můžeme vyjádřit jako:

$$u' = \frac{\partial u}{\partial t} = v_x \quad (7), [17]$$

$$v' = \frac{\partial v}{\partial t} = v_y \quad (8), [17]$$

$$w' = \frac{\partial w}{\partial t} = v_z \quad (9), [17]$$

Rychlost deformace tedy je parciální derivace jednotlivých deformací (posuvů) podle času:

$$\dot{\varepsilon}_x = \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} * \frac{\partial u_x}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} * \frac{\partial u_x}{\partial t} = \frac{\partial v_x}{\partial x} \quad (10), [17]$$

Rychlost deformace je tedy přírůstek deformace v čase na měřené délce. [17],[18],[19],[20],[26],[27]

Vezmeme-li v potaz, že je přetvárná rychlost materiálu ovlivňována rychlostí deformace a stupněm deformace (Mezní stupeň deformace je hodnota, při které je dosaženo maximálních přípustných deformací, než na výlisku vznikne trhлина. Více viz 4. kapitola), lze použít tento mocninný zákon:

$$k_p = C * \varphi^n * \dot{\varepsilon}^m \quad [N/mm^2] \quad (11), [17]$$

Následující rovnice (12) je vztah pro rychlost deformace v recipročních sekundách, která se počítá při zkoušce tahem. Deformaci lze rozdělit na deformaci měřeného vzorku a na pružnou deformaci zkušebního zařízení. Do měřeného vzorku se tudíž přenáší pouze část rychlosti posuvu příčnicku.

$$\dot{\epsilon}_m = v_c / \left( \frac{mS_0}{C_M} + L_0 \right) \quad (12), [28]$$

Příčemž  $C_M$  je tuhost zkušebního zařízení v newtonech na milimetr,  $L_0$  je zkoušená délka zkušebního tělesa v milimetrech,  $m$  je směrnice v megapascalch u závislosti napětí-prodloužení v procentech měřené průtahoměrem v daném okamžiku zkoušky,  $S_0$  je počáteční průřezová plocha v milimetrech čtverečných a  $v_c$  je rychlost posuvu příčnicku v milimetrech za sekundu. [28]

### 3. Optické systémy pro měření přetvoření plechu

Optické měření deformací plechu je velmi výhodné kvůli tomu, že neovlivňujeme měření kontaktními senzory. Měřenou součást neměříme pouze v místě senzorů, ale celoplošně.

#### 3.1. systém ARAMIS

ARAMIS je bezkontaktní optický systém, který pracuje na principu DIC. Měřit je možné jak celou plochu, tak diskrétní body. Velikost měřicího rozsahu se pohybuje řádově od několika čtverečních milimetrů až metrů. Pokud chceme měřit ve 3D, pak je pro měření deformací optickým systémem vždy zapotřebí, aby měřený povrch snímaly minimálně dvě kamery (viz Obr. 1). Tyto dvě kamery snímají pohyb jednotlivých fazet v čase. Znalostí toho, jak se každý bod pohyboval v čase (z jednotlivých posuvů), dokážeme určit jednotlivé deformace kterékoliv fazety. Na základě hlavních a vedlejších deformací zjištěných měřením jsme schopni zjistit polohu kteréhokoliv bodu v FLD. Aktuální tloušťku plechu (ztenčení) jsme schopni spočítat z rovnice (13): [2],[3],[4],[13]

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (13),[17]$$



Obr. 1, Snímací hlava (kombinace vysokorychlostních kamer a světel) [2]

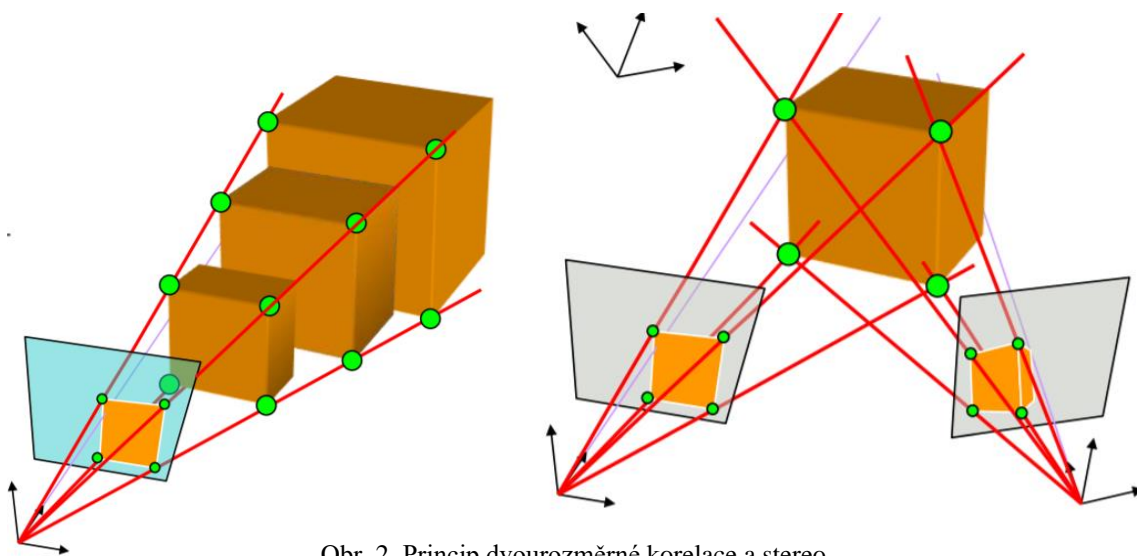
### 3.1.1. Digitální korelace obrazu (DIC)

Digitální korelace obrazu je optická metoda měření deformací, a to jak ve 2D, tak ve 3D. Principem je vysokofrekvenční pořizování snímků, (u statických dějů až 200MHz), které jsou mezi sebou následně porovnávány. Na snímcích se sleduje posuv a deformace jednotlivých bodů v průběhu času. Mezi hlavní výhody, potažmo důvody, proč se DIC používá, patří, že je měřena celá plocha, že materiál není nijak narušen přilepením měřicího senzoru a dále široké spektrum velikosti měřených vzorků. ( $10^{-9}$ - $10^2$ m) [1]

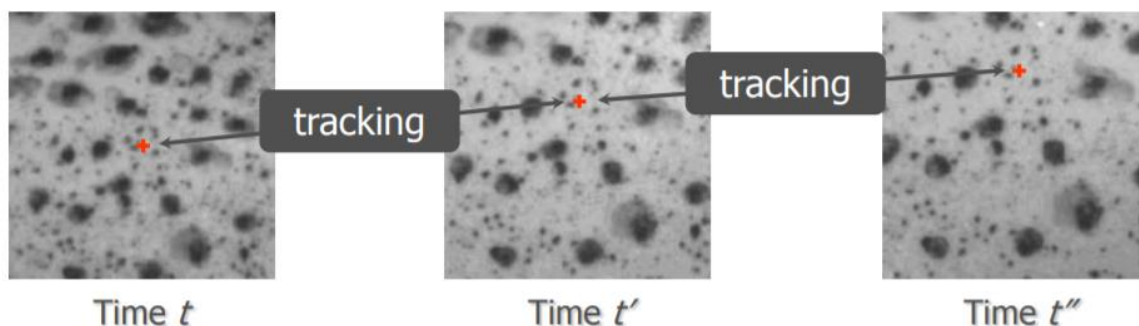
### 3.1.2. Dvourozměrná korelace (2D)

Dvourozměrná korelace využívá pouze jedno snímací zařízení (kameru). Kvůli neschopnosti vidět do prostoru není tato korelace schopná určit velikost (hloubku) měřeného objektu. Důsledkem toho je, že se 200% izotropická deformace jeví stejně, jako kdybychom objekt posunuli do poloviny vzdálenosti počáteční polohy a snímacího zařízení. Kvůli tomu musíme zajistit, aby byl objekt rovinný, rovnoběžný a ekvidistantní od snímacího zařízení v průběhu celého experimentu (viz Obr. 2). Za těchto podmínek je ale možné měřit jenom plošné deformace. [1]

Metoda spočívá v zapamatování si určitého bodu, který je jedinečný. Poté sledujeme jeho posuv v průběhu deformačního děje (viz Obr. 3). [1]

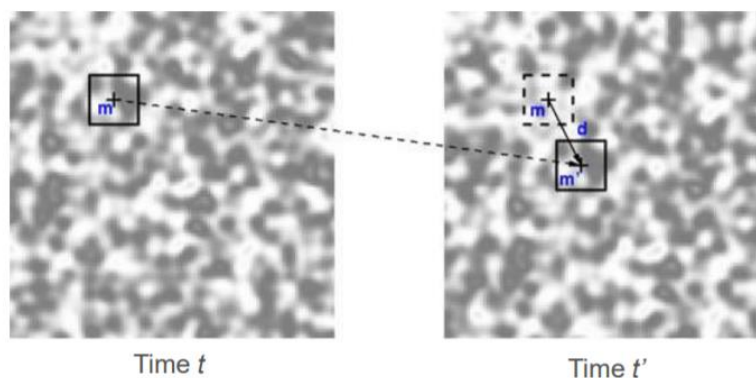


Obr. 2, Princip dvourozměrné korelace a stereo triangulace [1]



Obr. 3, Pohyb zvoleného bodu v čase [1]

V praxi ale nemůže být sledován jen jeden určitý bod kvůli tomu, že není na celé sledované ploše unikátní, a tudíž by mohlo dojít k chybě. Z tohoto důvodu se používá soubor bodů, nazývaný fazeta. Tímto opatřením výrazně zvýšíme pravděpodobnost toho, že vybraný soubor bodů bude unikátní. Na jedinečnost fazet má také vliv nanosený pattern na povrchu měřeného materiálu. Viz kapitola 5.2. [1]

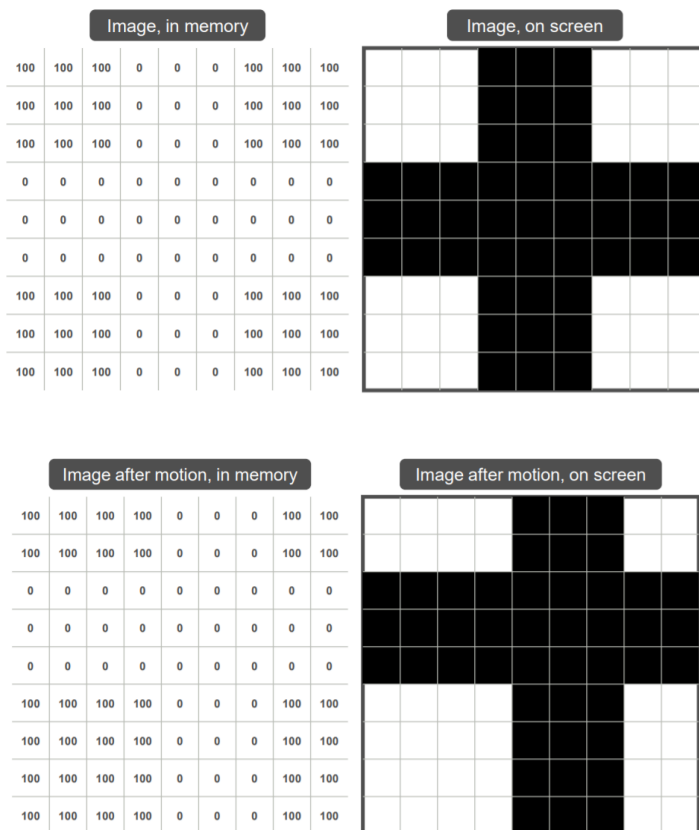


Obr. 4, Pohyb fazety v čase [1]

Vyhodnocování pomocí DIC probíhá dle následujícího příkladu: Kamera získá fotku o rozlišení 9x9 pixelů. Vzorek má nástřík do tvaru kříže. Bílé pixely mají hodnotu šedi 100 a černé pixely mají hodnotu šedi 0. Zvolíme si fazetu 5x5 pixelů. Fotka na obrazovce je převedena do paměti pomocí matice přirozených čísel podle stupně šedi každého jednotlivého pixelu. Následně se nástřík pohne například o 1 pixel doprava a o 1 pixel nahoru (viz Obr. 5). Poté hledáme, kam se posunula naše fazeta 5x5 pixelů.



Zkontrolujeme možné shody na několika pozicích a použijeme podobnostní číslo (korelační funkci) na zhodnocení. Klasická korelační funkce spočívá v součtu druhých mocnin rozdílů hodnot každého z pixelů před posunutím a po posunutí.

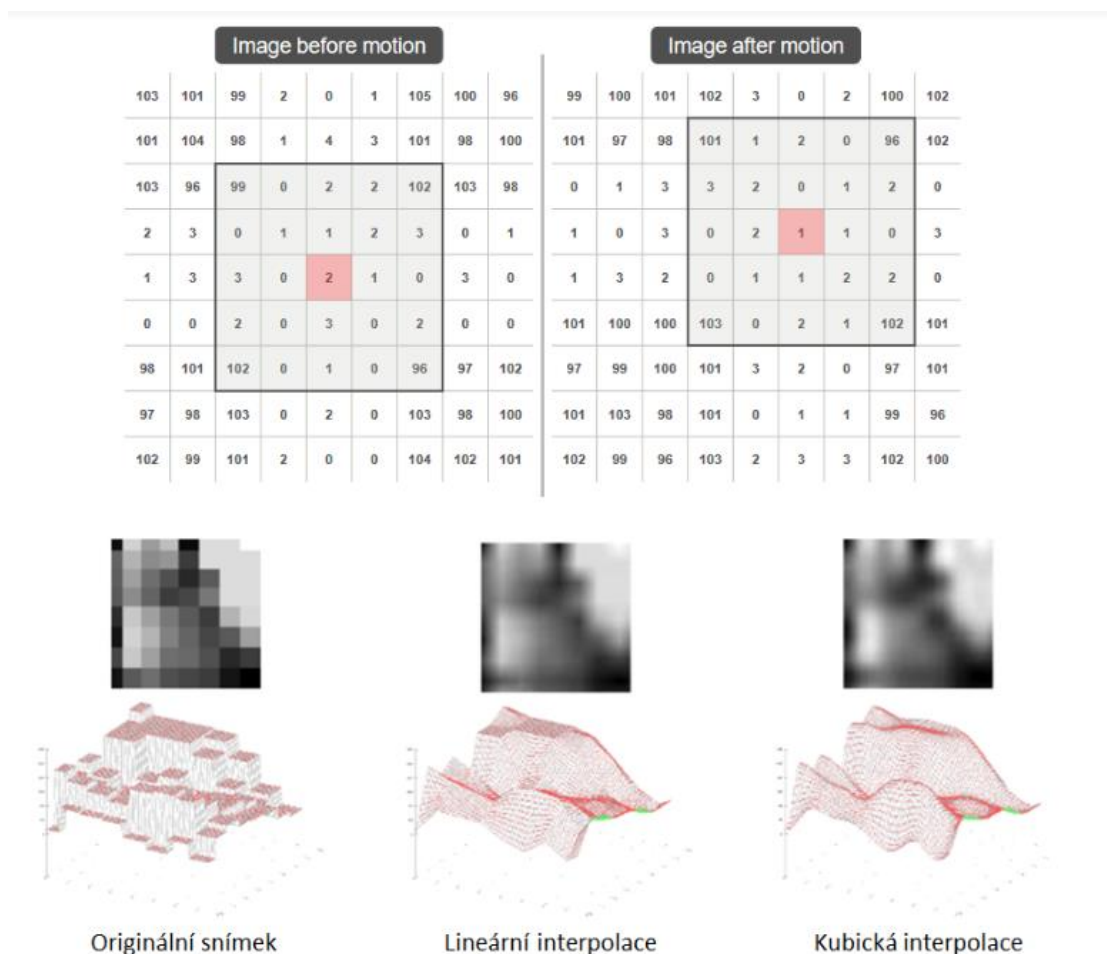


Obr. 5, Obrázek v paměti počítače a na obrazovce monitoru před a po posunutí [1]

Problémem ale je to, že ve skutečnosti nejsme schopni udělat absolutně černou s hodnotou šedi 0 a absolutně bílou s hodnotou šedi 100. Stává se to kvůli změně světelných podmínek v průběhu měření a také protože nástřík může měnit svoji šedost (zesvětlovat či ztmavovat) při roztažení či kompresi. Tudiž nejsme schopni dosáhnout absolutní shody ( $C=0$ ).

V určitých případech může dojít k falešné shodě. Ta může nastat tehdy, jsou-li zvoleny příliš malé fazety, a tudíž je na obou fazetách velmi podobný nástřík. Pomocí modelu fotometrické transformace jsme schopni tento problém vyřešit (viz Obr. 6). Jednotlivé

pixely jsou diskrétní, tudíž potřebujeme vytvořit spojité prostředí ke zprostředkování interpolace. [1]



Obr. 6, Optimalizační algoritmy vyžadují spojitost ve vyhodnocované oblasti [1]

### 3.1.3. Třírozměrná korelace (3D)

Přidáním druhé kamery získáme možnost sledovat tělesa a jejich chování v prostoru. Tyto dvě kamery společně fungují na podobném principu jako lidská perspektiva. Výhodou 3D korelace je možnost měřit jakýkoliv tvar a pohyb, měření celého objektu (nejen lokálně) a dále to, že metoda není intruzivní. Použití dvou zobrazovacích senzorů v třírozměrné struktuře se nazývá stereo triangulace (viz Obr. 2). Pro stereo triangulaci je třeba spočítat průsečík dvou optických vln. Nutnou podmínkou je to, aby obě tyto vlny měly stejný souřadný systém. Proto je nutné stereo sestavu zkalibrovat. Pro kalibraci používáme kalibrační desku (viz Obr. 7).

Podmínky pro kalibraci jsou:

- a) kalibrační deska se nesmí mezi snímky deformovat
- b) musíme znát vzdálenost dvou bodů na kalibrační desce
- c) kamery musí být ve správné osové vzdálenosti
- d) úhel kamer pro snímání kalibrační destičky musí být  $25^\circ$
- e) úhel světel pro nasvícení kalibrační destičky musí být  $10^\circ$  [1]



Obr. 7, Kalibrační deska CQ/CP20 55 x 44

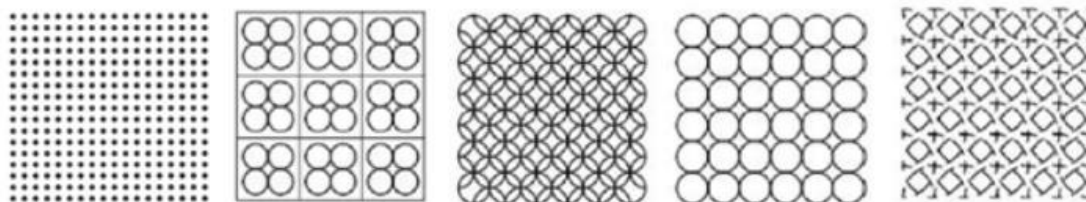
Tab. 1, Specifikace kalibrační desky

Vzdálenost 1	47,521 mm
Vzdálenost 2	47,526 mm
Certifikovaná teplota	20 °C
Koeficient teplotní roztažnosti	$4,00 * 10^{-6}$
Kalibrační panel 55	Keramický
ID	CP20/55/D06337
Typ	CP 20/ MV 55x44 mm <sup>2</sup>
Identifikačních bodů	389

### 3.2. Systém ARGUS

Argus je bezkontaktní optický 3D měřicí systém pro měření a analýzu deformací plechu po tváření. Tento systém pracuje na bázi série snímků s vysokým rozlišením, které jsou foceny ručně, každý z jiného úhlu poté, co proběhne deformace. Vyhodnocením těchto snímků získáme hodnoty deformací jednotlivých bodů, kde jejich hodnotu můžeme srovnat s FLC křivkou na FLD diagramu. Systémem ARGUS je možné měřit díly velikosti 10 mm až po díly v řádech metrů. Rozsah měřené deformace začíná na 0,5 procenta a končí u stovek procent.

Před tvářecí operací je na povrch plechu nanесena síť měřicích bodů, a to buď elektrochemicky nebo laserem. Nejčastějším elementem sítě je kružnice, přičemž platí, že zmenšením měřicích elementů se zhoršuje přesnost. Výhodou kruhových elementů je to, že se deformují do elips, které mají hlavní osy stejné se směrem hlavních deformací. Poté, co proběhne tváření, je vyhodnoceno protažení nanesených kružnic do hlavního a vedlejšího směru. Tato metoda, pomocí které se analyzují tvářené plechy, se nazývá metoda měrných sítí. Systém není závislý na procesu tváření, protože vyhodnocuje až výsledný stav plechu po tváření.



Obr. 8, ARGUS - druhy měrných sítí [13]

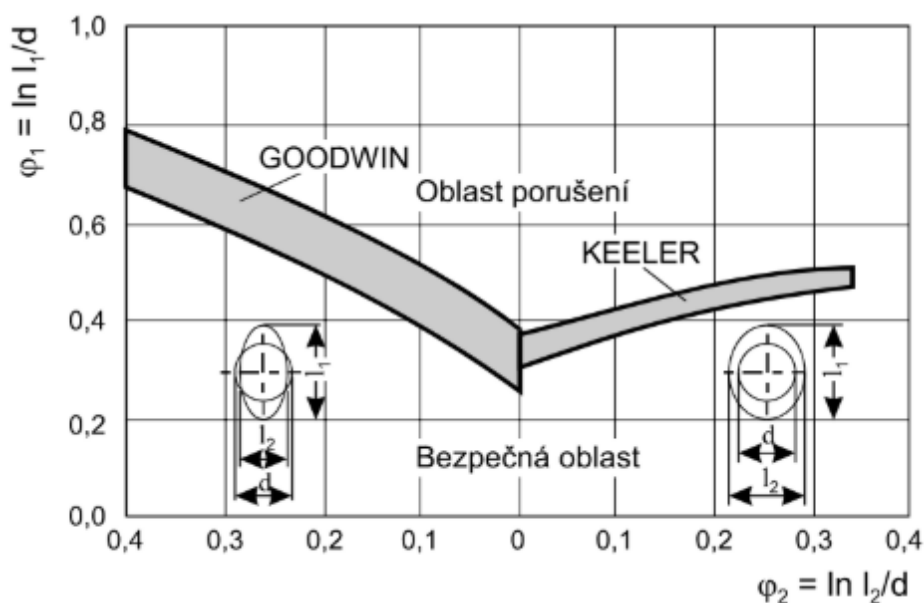
Je třeba, aby se síť deformovala zároveň s deformovaným materiálem a aby vůči materiálu, na kterém je nanесena, měla dostatečně velký kontrast kvůli tomu, aby bylo možné vzorek vyhodnotit. [11],[12],[13]

## 4. Diagram mezního přetvoření (FLD)

V procesu tváření je jednou z nejdůležitějších vlastností materiálů zásoba plasticity, což je vlastnost materiálu, která říká, jak velké deformace je možné dosáhnout, aniž by se iniciovala trhlinka. Čím větší je zásoba plasticity daného materiálu, tím větší deformace je v materiálu možno dosáhnout, tudíž je lépe tvářitelný. Hlavní činitele ovlivňující tvářitelnost jsou metalurgické, mechanické a technologické.

Chování tvarově komplikovaných výtažků se nedá dostatečně dobře popsat pouze na základě znalostí výsledků jednoduchých zkoušek. V těchto případech je vhodné použít zkoušky přímé, ve kterých se zkoumá tok materiálu, ideálně ve skutečné velikosti. Vyhodnocení výsledku může být kvalitativní a kvantitativní. Kvalitativní vyhodnocení spočívá pouze v posouzení zkušební, zda vzorek praskl či nepraskl. Pro kvantitativní vyhodnocení toku materiálu se nejčastěji používá metoda sítí, která předpokládá porušení tenkého plechu v důsledku nahromadění deformace při rovinné napjatosti, která vzniká v místech největší deformace.

Na počátku 60. let 20. století vznikl systém kvantitativního hodnocení pomocí mezních (limitních) diagramů. Diagram mezních deformací se v průběhu let ustálil na FLD v osách hlavních deformací. Dnes se používá výhradně FLD diagram, na němž mají zásluhu Keeler a Goodwin. Na začátku se Keeler zabýval pouze kladnými napětími. Poté byla jeho práce doplněna Goodwinem o záporné hodnoty vedlejšího napětí. Na jejich počest se dnes FLD diagram nazývá KEELER-GOODWINŮV (viz Obr. 9). [13],[15],[26]



Obr. 9, KEELER-GOODWINův diagram ve skutečných deformacích [13]

Tento diagram vyjadřuje, jak velkého množství hlavní a vedlejší deformace je materiál schopen dosáhnout, než dojde ke vzniku trhliny. Takzvané křivky mezní tvářitelnosti (FLC) udávají hranici mezi bezpečnou oblastí, ve které můžeme tvářet, a oblastí porušení. Šedé oblasti označují oblast s náhodným výskytem trhlin. Tvar FLC křivek pro plechy je víceméně stejný. Liší se pouze polohou hlavního a vedlejšího napětí. Čím je větší tloušťka plechu, součinitel plastické ( $r$ ) anizotropie nebo exponent deformačního zpevnění ( $n$ ), tím je křivka FLC výš, a tudíž je i bezpečná oblast větší. Čím je větší mez kluzu materiálu, tím je křivka FLC níž, tudíž je bezpečná oblast menší. FLD diagram je možno sestavit na základě technologických a mechanických zkoušek, a to například tak, jak je uvedeno v experimentální části. [13],[15],[26]

## 5. Zkušební podmínky

Pro zkoušku podle Nakajimy norma ČSN EN 12004-2 udává následující parametry:

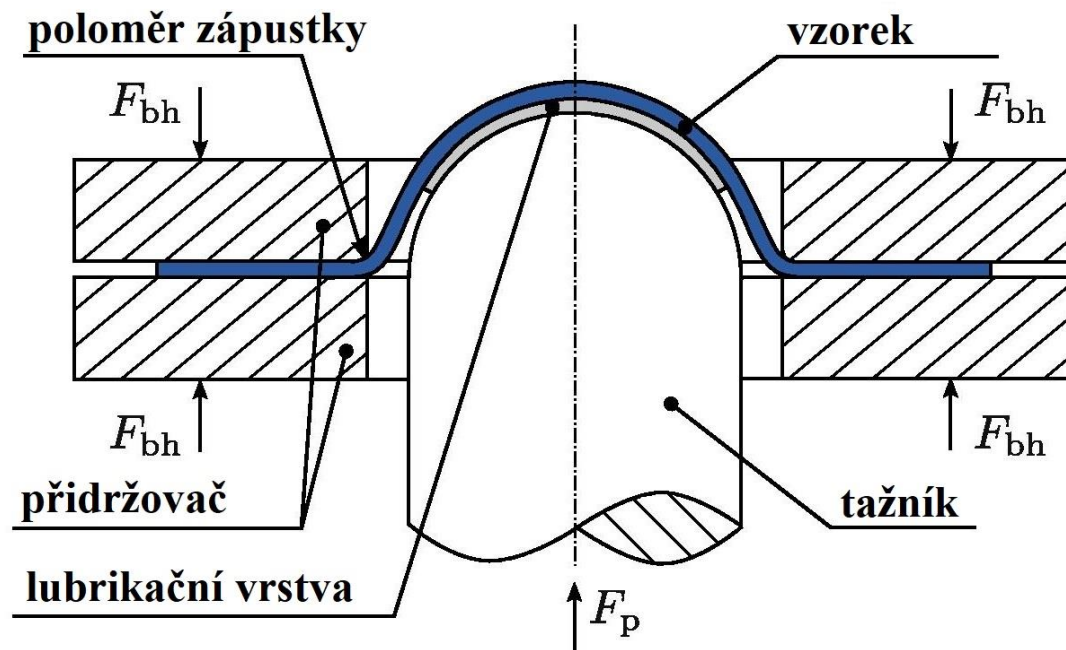
Tab. 2, Parametry zkoušky dle Nakajimy [5]

Rychlost tažníku	(1,5±0,5) mm/s
Zkušební teplota	(23±5) °C
Přidržovací síla v kN	taková, aby bylo zabráněno vtažení materiálu
Směr zkoušky	směr nejmenší deformace je shodný se směrem válcování
Drsnost povrchu tažníku	doporučuje se leštěný povrch stykové plochy
Materiál zápustky	kalená ocel
Tvar přidržovače výstrižku	celistvý kruhový přidržovač
Kritérium pro ukončení zkoušky	výskyt trhliny ve vzdálenosti 15% průměru tažníku od vrcholu vzorku
Detekce trhliny	pokles síly, nebo vizuálně

Metoda tváření podle Nakajimy používá polokulový tažník (viz Obr. 10). Jeho specifikace jsou:

Tab. 3, Parametry polokulového tažníku [5]

Průměr tažníku	(100±2) mm
Průměr zápustky	Přednostně 105 mm; ≥ průměr tažníku + 2,5 násobek tloušťky vzorku
Poloměr zápustky	R 6,5



Obr. 10, Polokulový tažník používaný v metodě podle Nakajimy [6]

## 5.1. Zkušební vzorky

Zkušební vzorky pro měření jsou definovány normou ČSN EN ISO 12004-2. [5]

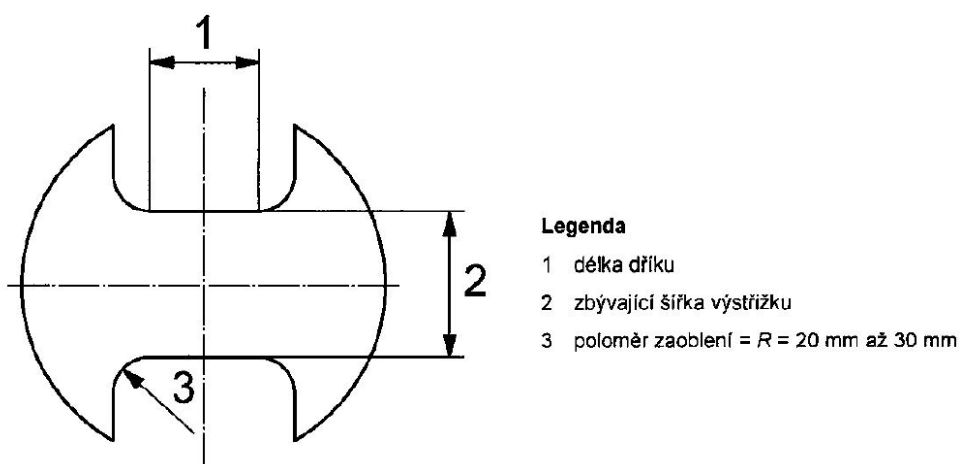
### 5.1.1. Tloušťka vzorků

Norma uvádí, že materiál vzorků má být plochý, kovový o tloušťce mezi 0,3 mm a 4 mm. Nicméně pro ocel se doporučuje tloušťka maximálně 2,5 mm. [5]

### 5.1.2. Geometrie vzorků

Norma doporučuje užívat výstřižky se středovým rovnoběžným dříkem delším než 25% průměru tažníku (pro 100 mm tažník se upřednostňuje délka 25 mm až 50 mm). Poloměr zaoblení má být mezi 20 mm až 30 mm (viz Obr. 11). [5]





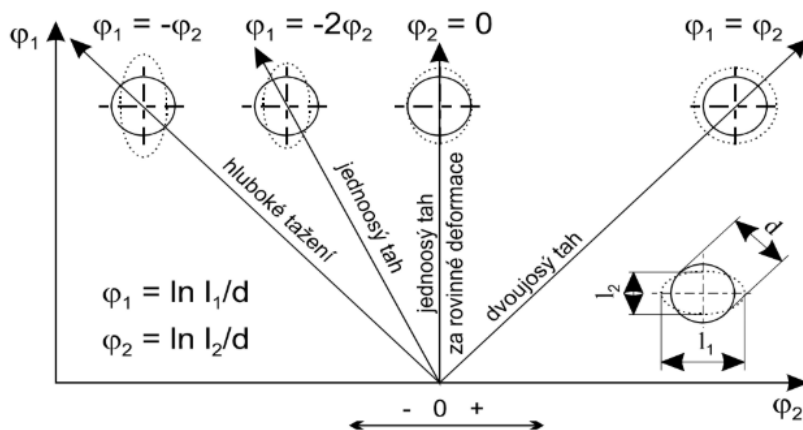
Obr. 11, Geometrie zkušebního vzorku (tvar kosti pro psa) [5]

Vnější kruhový průřez se používá kvůli tomu, že s ním jde dosáhnout rovnoměrnějšího rozdělení experimentálních bodů meze tvárnosti, než u obdélníkových pásů.

Norma také popisuje, jak by mělo vypadat správné rozložení deformací na FLD diagramu 2 vzorky měly popsat levou, 2 pravou a jeden by měl být v oblasti, kde je deformace ve vedlejším směru rovna nule.

### 5.1.3. Počet různých geometrií vzorku

Dle normy musí být pro popis kompletní křivky tvárnosti minimálně pět různých geometrií vzorku. Tyto různé geometrie jsou potřeba kvůli tomu, aby byla proměřena celá FLC křivka. Geometrií měřených vzorků jsme schopni zjistit, jak se materiál chová při hlubokém tažení, při jednoosém tahu (tahová zkouška), při jednoosém tahu za rovinné deformace a za dvouosého tahu (viz obr. 12). Doporučuje se rovnoměrné rozmístění křivky mezní tvárnosti od jednoosého do dvojosého stavu shodné tahové deformace. [5],[13]



Obr. 12, Deformační stopy při plošném tváření [13]

#### 5.1.4. Počet zkoušek pro každou geometrii

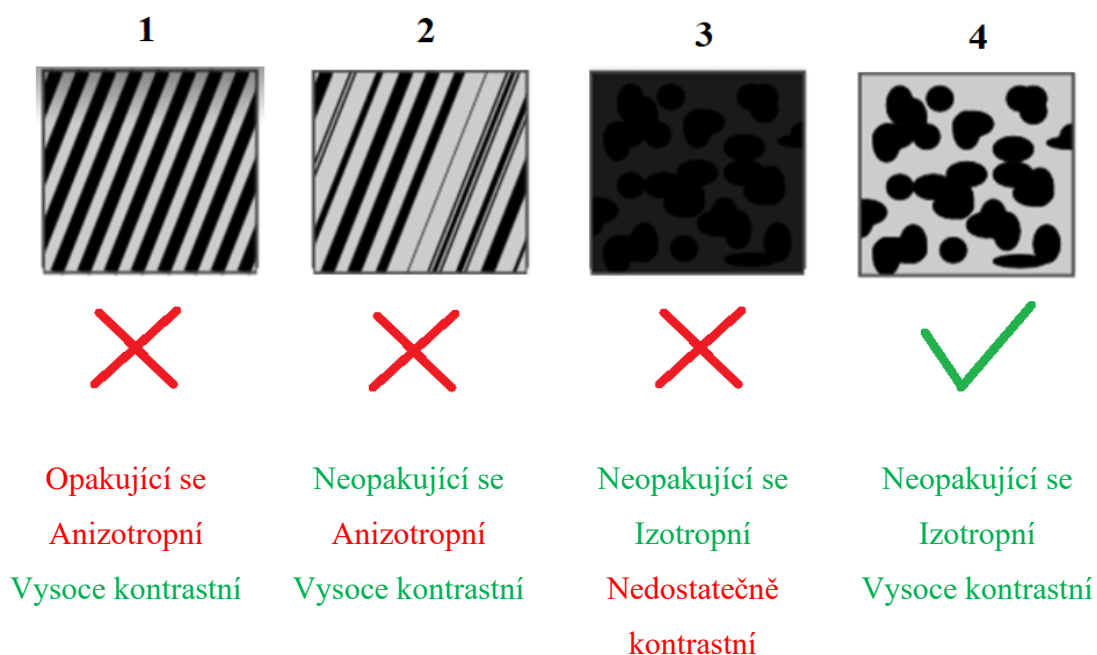
Je třeba udělat tolik zkoušek, abychom dosáhli minimálně tří platných vzorků pro každou geometrii. Vzorek je platný tehdy, když trhlina vznikne do 15% průměru tažníku od vrcholu vzorku, tzn. pro tažník o průměru 100 mm musí trhlina vzniknout do 15 mm od vrcholu vzorku. [5]

## 5.2. Nanášení patternu

Při nanášení patternu je doporučeno:

- nanášený pattern musí mít dostatečný kontrast
- nesmí docházet k žádným vrubovým účinkům
- z důvodu nanášení patternu nesmí docházet ke změnám mikrostruktury
- aby se neopakoval (aby byl na co možná nejvíce místech jedinečný)
- pattern musí být izotropní

Stochastické (tečkované) patterny mohou být nanášeny nástřikem. Kvůli dostatečnému kontrastu barev se může nejprve na měřený vzorek nastříkat matná bílá barva. Tím je možné zamezit odleskům světla. Poté se nastříká černý pattern s náhodným a nepravidelným rozmístěním skvrn. [1],[5]



Obr. 13. Správný nástřik [1]

### 5.3. Příprava nástroje

S ohledem na splnění vzdálenosti trhliny od vrcholu zkušební vzorku je potřeba zvolit pro tažník vhodné mazání. V nejlepším případě (tedy pokud zvolíme optimální lubrikaci) vznikne trhlina na vrcholu kulového tažníku. Při volbě špatného mazání se může stát, že budou vznikat dvě lokální zóny, které se budou postupně zužovat do té doby, než v některé z nich dojde ke vzniku trhliny.

Možnosti eliminace tření jsou:

- olej nebo mazivo
- kruhové výstřižky z polyethylenové nebo polytetrafluorethylenové fólie (o tloušťce 0,05 mm až 0,1 mm)
- list měkkého PVC (tloušťky 3 mm)

Po prvotních zkouškách jsme k eliminaci tření použili minerální olej, teflonovou pásku a polyetylenovou fólii.

S uvedeným způsobem mazání dochází ve většině případů ke vzniku trhliny ve vzdálenosti do 15 % průměru tažníku. Problematické může být měření tlustších plechů s vyšší tažností. [5]

## 5.4. Vyhodnocení deformace

Kamery přímo upevněné na rámu stroje zaznamenávají průběh celé zkoušky. Po vzniku trhliny je zkouška ukončena a následuje vyhodnocení v softwaru ARAMIS Professional.

Nejprve jsou definována místa, která obsahují zúžení. Pak je určen interval, kde se tato místa vyskytují. Tím jsou definovány vnitřní meze pro regresní křivku. Poté jsou definovány vnější meze ve snaze získat co nejoptimálnější šířku regrese, ve které bude křivka aproximovat nejlépe.

### 5.4.1. Poloha měřených bodů

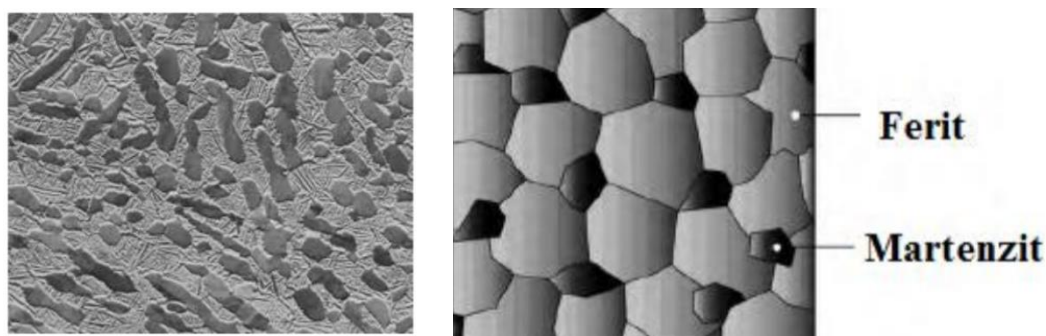
Průsečnice (vodorovná přímka) má mít délku nejméně 20 mm nalevo i napravo od trhliny a zároveň obsahovat alespoň 10 bodů. Virtuální přímka (svislá) má délku kolem 10 mm a určuje orientaci trhliny. Norma doporučuje aby:

- pro kladné vedlejší deformace byly průsečnice kolmo k trhlíně (její virtuální přímce)
- pro záporné vedlejší deformace (malé šířky vzorku) byly průsečnice rovnoběžné se směrem dříku

První průsečnice prochází středem trhliny (její virtuální přímky). Další 1 nebo 2 průsečnice jsou s ní rovnoběžné a jsou ekvidistantní ve vzdálenosti přibližně 2 mm. V případě více lomových čar musí být měřený vzorek vyřazen a nesmí být vyhodnocován do výsledků měření. Celý délkový profil se zachovává v tabulkovém formátu kvůli tomu, aby následně mohl být vyhodnocen softwarem. [5]

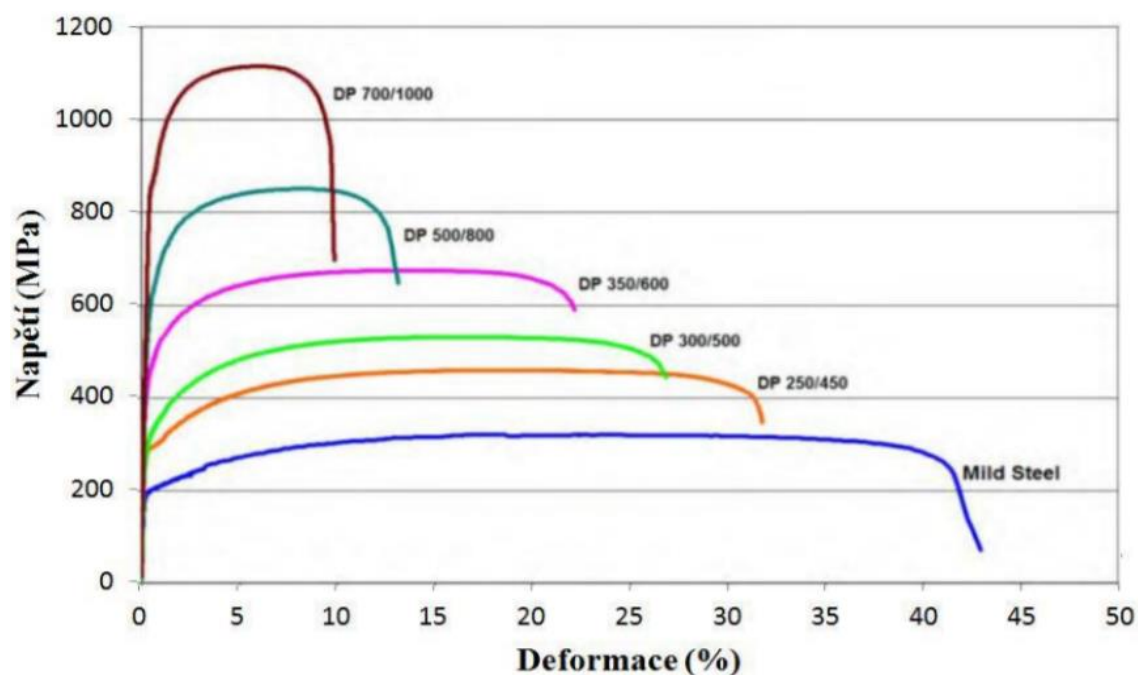
## 6. Výšepevné oceli (DP oceli)

Dvoufázové oceli (Dual phase steels) nabízí dobrou kombinaci vlastností, jako je vysoká tvrdost, houževnatost, mez kluzu a mez pevnosti při zachování dostatečné svařitelnosti a tváritelnosti. Obsah uhlíku těchto ocelí nepřekračuje 0,2 %. Nevýhodou DP ocelí jsou poměrně nízké hodnoty normálové anizotropie. Tato kombinace vlastností je získávána v důsledku mikrostruktury těchto ocelí, která se skládá z tvrdé martenzické fáze, která je rozptýlena v tvárné feritické matici. Poměr těchto fází se pohybuje kolem  $70 \div 90$  % feritu a  $10 \div 30$  % martenzitu. Tento poměr je vidět i na Obr. 14. [7],[8],[9],[10]

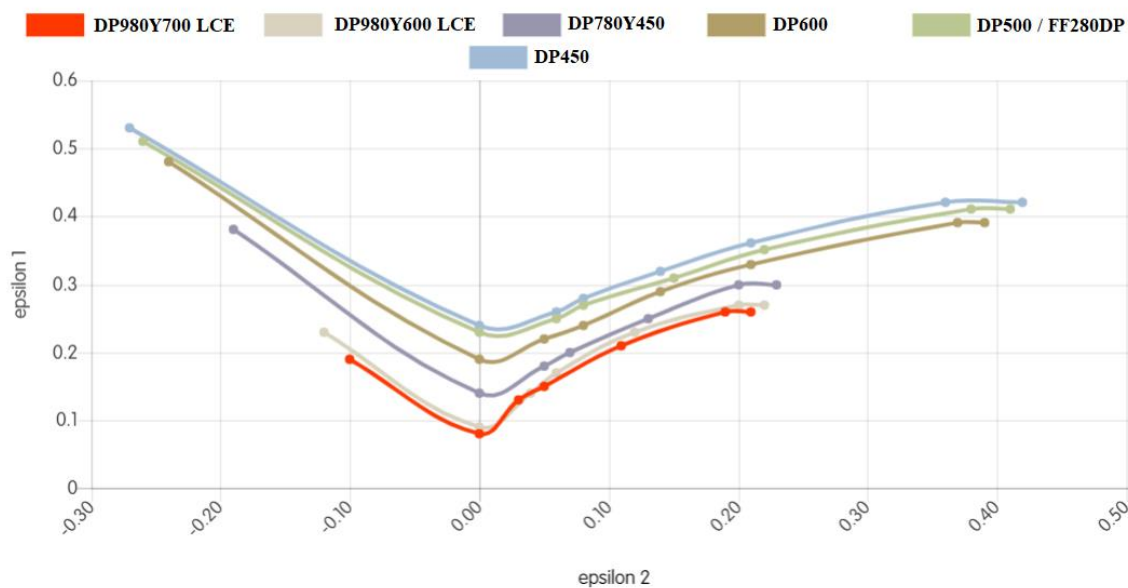


Obr. 14, Mikrostruktura DP ocelí [7]

Výroba těchto ocelí probíhá řízeným ochlazováním z austenitické nebo austeniticko-feritické fáze na feritickou fázi, při kterém se část austenitu přemění na ferit a zbytek austenitu se prudkým ochlazením přemění na martenzit. Díky dobrému poměru odolnosti vůči únavě a absorpčním vlastnostem vůči jejich hmotnosti nacházejí uplatnění v automobilovém průmyslu. Díly je možné odlehčovat právě kvůli jejich mechanickým vlastnostem, které zajistí stejnou pevnost při nižší hmotnosti. Na obr. 15 je graf, který porovnává závislosti napětí a deformace jednotlivých šarží DP ocelí. Z grafu lze vyčíst, že měkké oceli oproti ostatním ocelím mají dobrou tažnost, ale jejich pevnostní charakteristiky jsou menší než např. u DP oceli. Na obr. 16 je FLD diagram, který zobrazuje FLC křivky pro různé druhy DP ocelí. [7],[8],[9],[10]



Obr. 15, Porovnání měkkých ocelí a DP ocelí [7]



Obr. 16, Porovnání FLC křivek pro DP oceli [10]

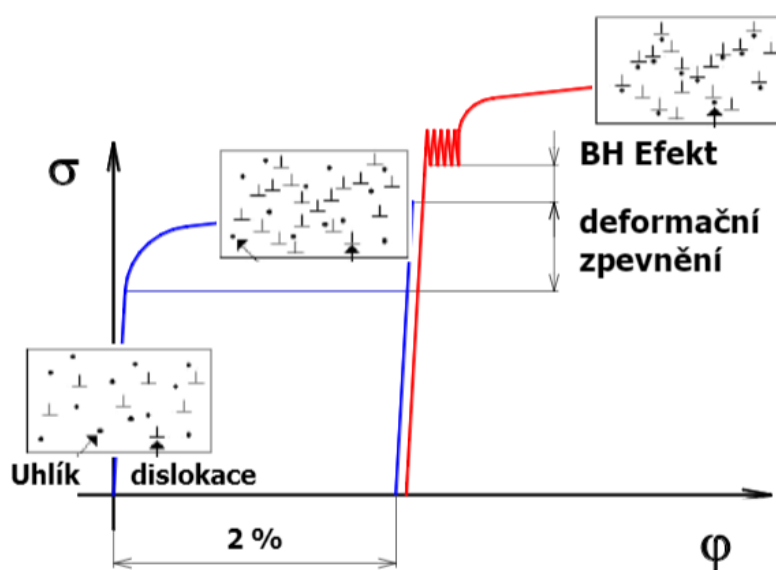
Kvůli zvýšení prokalitelnosti se do DP ocelí přidávají legury manganu, chromu, vanadu a niklu. DP oceli jsou schopny dosáhnout meze kluzu až o 70 MPa více pomocí takzvaného BH (Bake Hardening) efektu. Proces spočívá ve vytvrzování při teplotě 170 °C po dobu 20 minut.

Na Obr. 17 uvádím příklady využití DP ocelí v automobilovém průmyslu. Dveře, které jsou na obrázku vpravo dole, jsou vyráběny využitím avizovaného BH efektu. Na Obr. 18 je možno vidět zpevnění způsobené BH efektem.

Dle normy ČSN EN ISO 10 346 je konkrétní materiál, který byl použit v experimentální části, označován jako HCT500X+Z100-B-O. [7],[8],[9],[10],[16],[25]



Obr. 17, Příklady použití DP ocelí v automobilovém průmyslu [10]



Obr. 18, Zpevnění způsobené BH efektem [16]

## 7. Experimentální část

V této části byla provedena série zkoušek, pomocí kterých se snažím dokázat, že rychlost deformace má vliv na polohu FLC křivky. Analýza deformací měřených vzorků byla provedena za pomoci bezkontaktního měřicího systému ARAMIS. Dále byly vyhodnoceny výsledky z měření a zakresleny do FLD diagramu jako FLC křivky.

### 7.1. Průběh zkoušky

Tento experiment se snaží zhodnotit chování výšepevného materiálu HCT500X+Z100-B-O s ohledem na rychlost deformace. Experiment byl prováděn pro dvě různé rychlosti tažníku, a to pro rychlost 2 mm/s a 12 mm/s. Z tohoto důvodu bude zajímavé srovnání zásoby plasticity materiálu HCT500X+Z100-B-O při různých rychlostech pohybu nástroje. Přičemž rychlost pohybu tažníku úzce souvisí s rychlostí deformace.

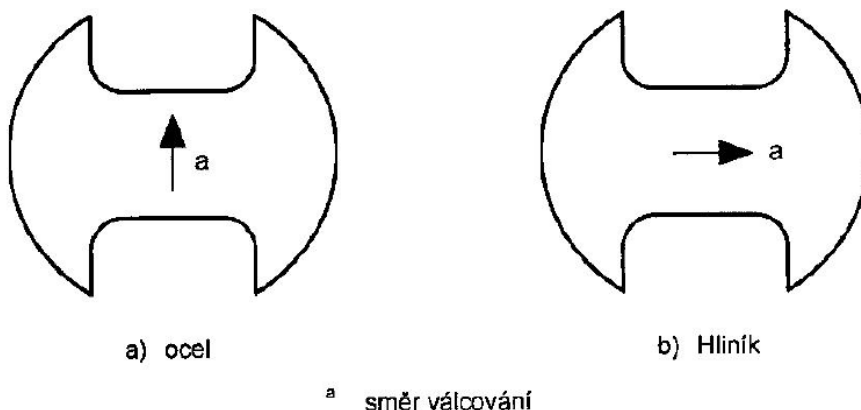
#### 7.1.1. Kalibrace měřicího zařízení

Před začátkem zkoušky musí dojít ke kalibraci měřicího zařízení. Kalibrace probíhá pozicováním kalibrační desky (viz Obr. 7) do 13 různých poloh vůči kamerám. Kalibraci si řídí software, který ukazuje jednotlivé pozice pro kalibrační desku.

#### 7.1.2. Příprava zkušebních vzorků

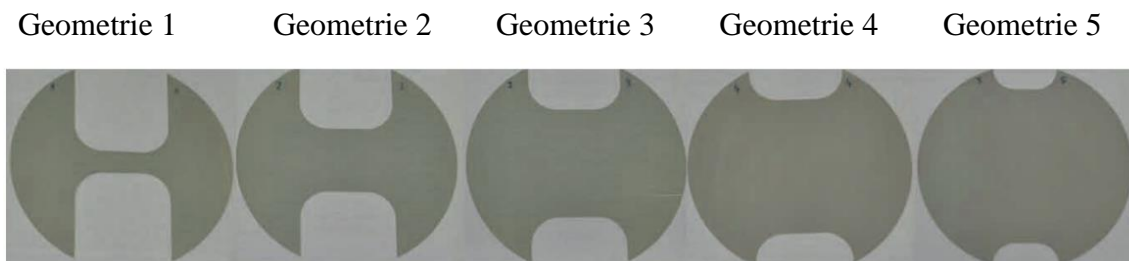
Nejprve bylo potřeba vyříznout z plechu všechny vzorky. Je třeba, abychom při vyřezávání vzorků z plechu co nejméně tepelně ovlivnili obvodovou oblast. To je důležité kvůli tomu, že bychom mohli ovlivnit měření. Pro tento experiment bylo pro přípravu vzorků zvoleno vyříznutí na vláknovém laseru (takto ovlivnitelná je především levá část FLD diagramu). Při přípravě vzorků je třeba vzít v potaz i směr válcování. U ocelových plechů je směr válcování kolmý na dřík (viz Obr. 19).





Obr. 19, Orientace dříku ke směru válcování [5]

Pro tento experiment byly navrženy geometrie tak, aby 2 body byly v levé části FLD, 1 uprostřed a 2 body v pravé části FLD jak nařizuje norma. Pro splnění těchto požadavků byly navrženy následující šířky dříků (viz Obr. 20). [5],[24]



Obr. 20, Geometrie vzorků, šířka dříku popisováno zleva: 20 mm, 60 mm, 100 mm, 125 mm, 150 mm

### 7.1.3. Odmaštění a očištění

Poté, co jsou vzorky vyříznuty, jsou potřeba očistit a odmastit (viz Obr. 21). Z hlediska soudržnosti měrné sítě byly zkoušeny různé přípravky, jako například technický benzín, toluen a podobně. Tyto přípravky nejsou schopny nečistoty dostatečně odstranit. Ukázalo se, že tento způsob není dostačující, neboť v závěrečných fázích zkoušky dochází k porušení soudržnosti sítě a tím nemožnosti její čitelnosti. Nejlepším způsobem odmaštění se ukázalo použití umývacího přípravku Jar, který snižuje povrchové napětí vody a odstraňuje mastnoty.



Obr. 21, Odmaštění a očištění vzorku

Na mastném vzorku špatně drží nástřík a při deformaci se nedeformuje společně s materiálem, tudíž je nemožné ho vyhodnotit. Správným a důkladným odmaštěním se dá předcházet neplatným vzorkům. Na Obr. 22 uvádím příklad špatně odmaštěného vzorku, jehož nástřík kvůli mastnotě „nevydržel“, a tudíž zkušební vzorek nemohl být vyhodnocen, v porovnání se správně odmaštěným vzorkem.



Obr. 22, Porovnání špatně a správně odmaštěného vzorku

#### 7.1.4. Nanesení patternu

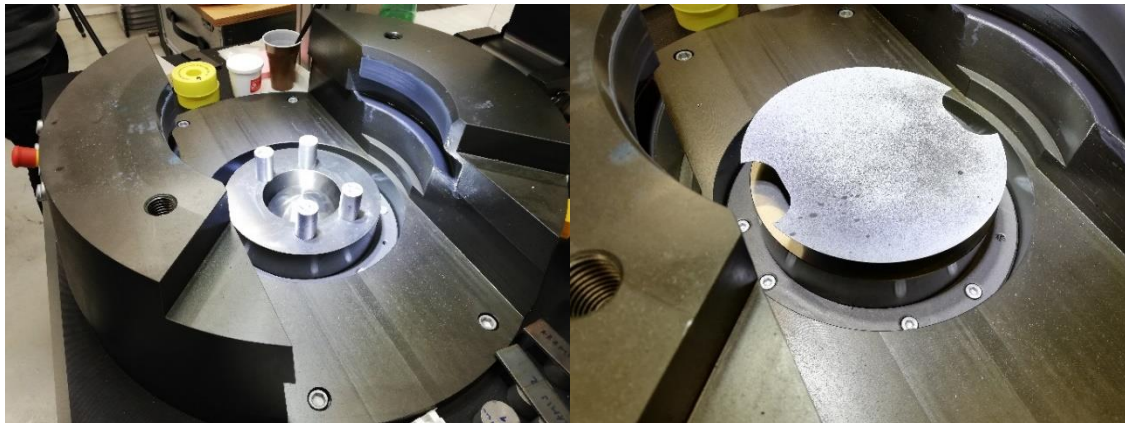
Po odmaštění je třeba na vzorky nanést nástřík, pomocí kterého software dokáže následně vyhodnocovat deformace. Kvalitní nástřík je třeba primárně z důvodu správného vyhodnocení zkoušky (je třeba dostatečný počet izotropních, vysoce kontrastních, neopakujících se fazet), ale také kvůli tomu, aby se nástřík deformoval společně s materiálem a zároveň nijak neovlivňoval jeho vlastnosti. Pro zajištění vysokého kontrastu byl použit sprej matné bílé (eliminace odlesků) a matné černé barvy (měřící body). Nejprve nanášíme bílou a poté černou barvu. (Viz obr. 23)



Obr. 23, Nanášení nástřiku

### 7.1.5. Kontrola nástřiku

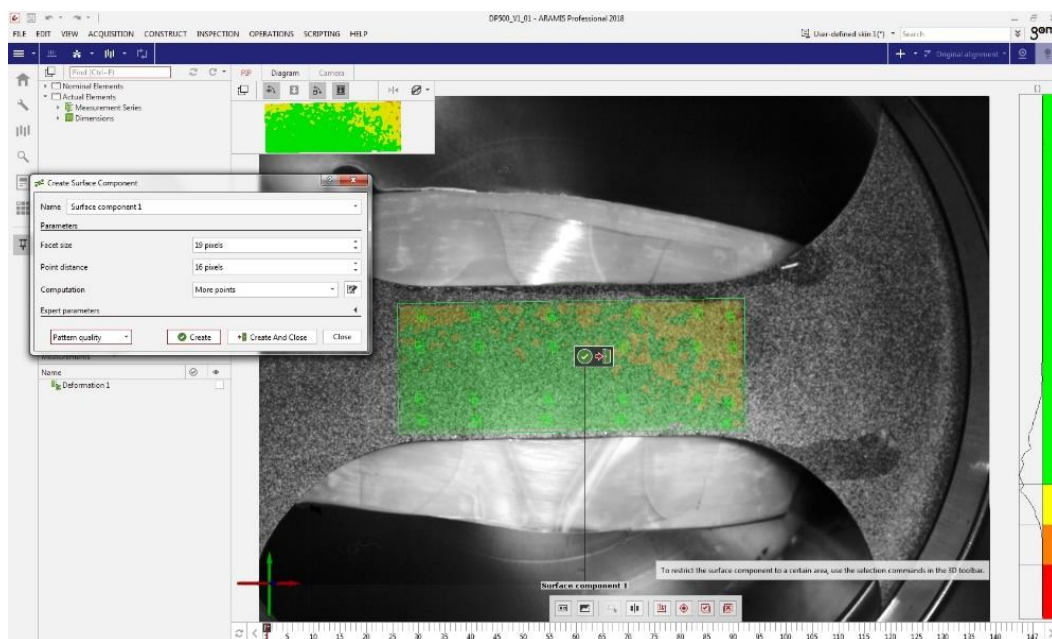
Po kalibraci měřicího zařízení můžeme začít pracovat. V následujícím kroku je potřeba zkontrolovat kvalitu patternu vzorků, kterou je důležité sledovat v té vzdálenosti, ve které bude probíhat měření. V tomto experimentu byly použity distanční válečky, na které se položil vzorek ke kontrole. (Viz Obr. 24)



Obr. 24, Poloha vzorku pro kontrolu nástřiku

Po vložení vzorku do správné polohy kvalitu nástřiku vyhodnotí software. Vyhodnocovací barvy jsou intuitivní. Čím více do zelena, tím kvalitnější nástřik a naopak čím více do červena, tím více nekvalitní. (Viz Obr. 25) Velikost kontrolovaných fazet, na které jsou kladeny avizované požadavky, je 19x19 pixelů. Jednotlivé fazety jsou přesazeny o 16 pixelů.





Obr. 25, Příklad softwarem vyhodnocené kvality nástřiku

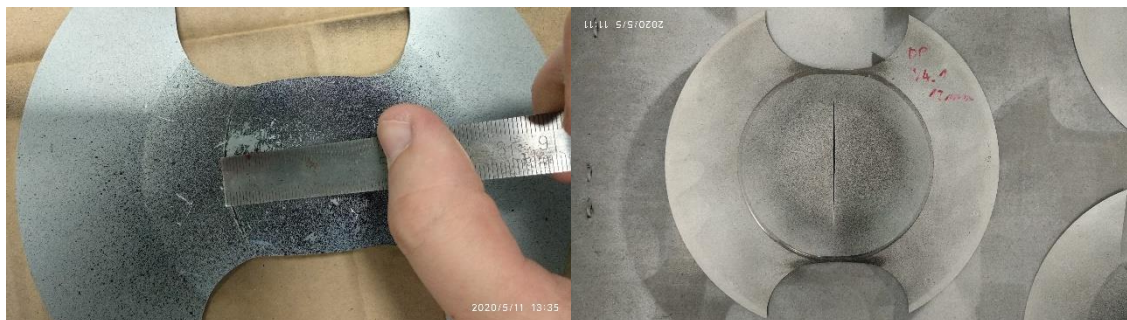
### 7.1.6. Mazání nástroje

Kvůli splnění podmínky vzniku praskliny do 15 % průměru tažníku je velmi důležité mazání. V tomto experimentu jsem nejprve nanesl jemný olej. Dále jsem přiložil tři pruhy PTFE pásky, která má výborné kluzné vlastnosti. Poté jsem zase nanesl jemný olej, na který jsem položil polyethylenovou fólii. Nakonec jsem znovu nanesl jemný olej. Na následujícím Obr. 26 je postup přípravy mazání. Tento systém je potřeba připravit pro každý měřený vzorek.



Obr. 26, Lubrikace tažníku k eliminaci tření mezi tažníkem a zkušebním vzorkem

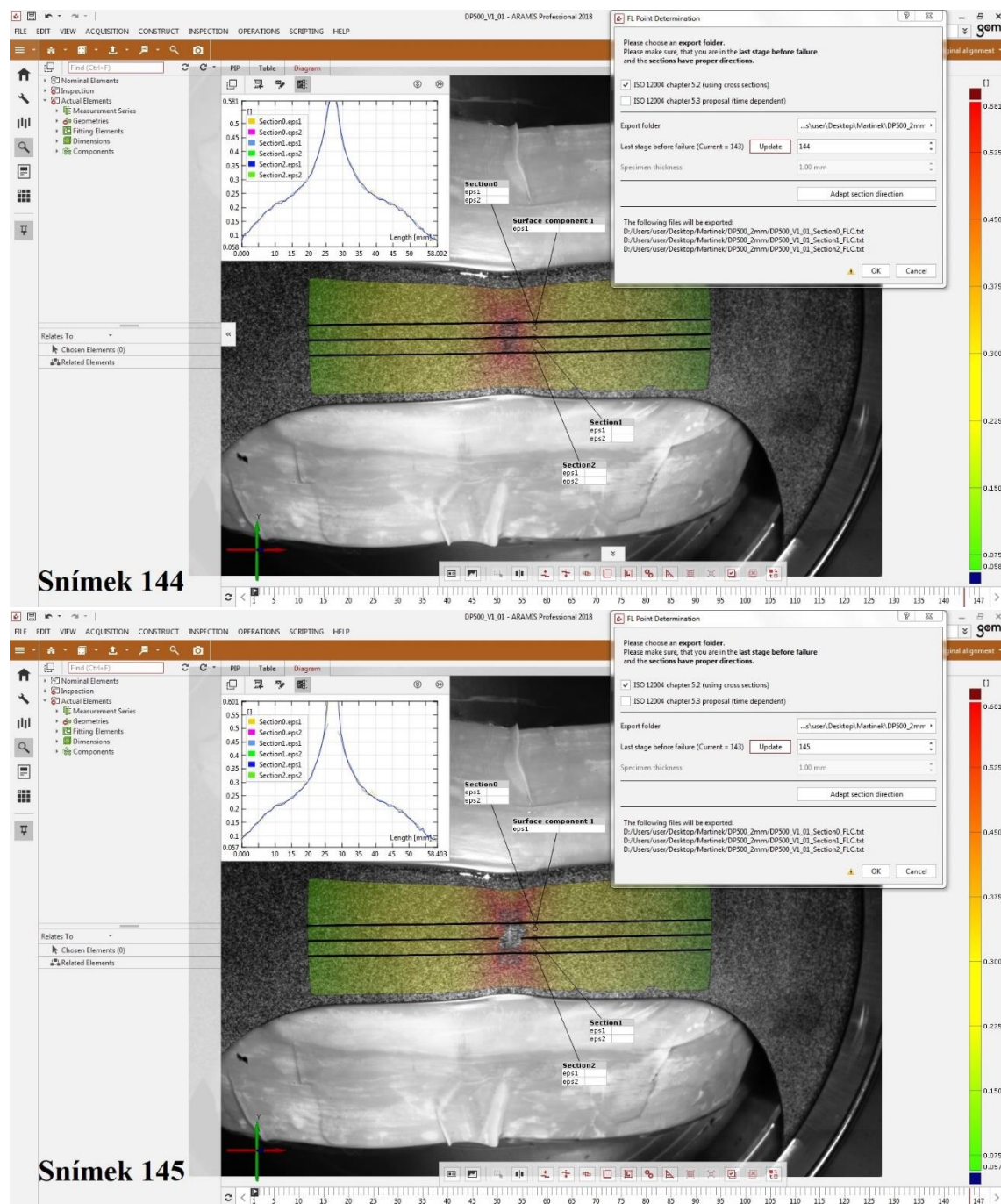
Při zvolení špatného či nedostatečného mazání se s velkou pravděpodobností vyskytne trhlina mimo toleranční pásmo, a tudíž měřený vzorek není možné vyhodnocovat. (Viz Obr. 27)



Obr. 27, Porovnání trhliny mimo toleranční pásmo a v tolerančním pásmu

### 7.1.7. Vyhodnocení vzorku

Po promazání můžeme zkoušku spustit. Splníme-li úspěšně nejproblematictější požadavky (kvalitní nástřik a trhlina ve vzdálenosti  $\leq 15\%$  průměru tažníku), je možné změřený vzorek vyhodnotit. Z jednoho měřeného vzorku tedy zjistíme polohu tří bodů do našeho FLD diagramu pro tvorbu FLC křivky. Pro každou rychlost tažníku a geometrii je třeba změřit dle normy 3 platné vzorky. Abychom mohli měření vyhodnotit, pak pro dvě různé rychlosti tažníku a 5 různých geometrií vzorku je třeba naměřit 30 platných vzorků. Vyhodnocení deformací probíhá 1 až 5 snímků před vznikem trhliny, jak je ukázáno na Obr. 28. V horním obrázku 28 vyhodnocujeme zkoušku pomocí metody sekci (řezů) na snímku číslo 144, kde vedeme tři řezy celou měřenou oblastí. (tedy jeden snímek před vznikem trhliny, jak je ukázáno na snímku 145 v dolním obrázku). [5]



Obr. 28, Vyhodnocení vzorku pomocí softwaru ARAMIS

## 7.2. Materiál HCT500X+Z100-B-O

Experiment byl prováděn na materiálu HCT500X+Z100-B-O, dle normy ČSN EN ISO 10346. Mechanické vlastnosti a chemické složení této oceli jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Tab. 4, Mechanické vlastnosti HCT500X+Z100-B-O dle ČSN EN ISO 10346

Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$	Pevnost v tahu $R_m$	Tažnost $A_{80mm}$	Součinitel plastické anizotropie $r_{m/20}$	Exponent deformačního zpevnění $n_{10-20/Ag}$	Index BH <sub>2</sub>
[MPa]	[MPa]	[%]	[-]	[-]	[MPa]
290 ÷ 380	490 ÷ 600	≥ 24	≈ 1,0	≥ 0,15	≥ 30

Tab. 5, Chemické složení HCT500X+Z100-B-O dle ČSN EN ISO 10346

C	Si	Mn	P	S	Al <sub>celk.</sub>	Nb + Ti	Cr + Mo	V	B
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
≤ 0.14	≤ 0.75	≤ 2.00	≤ 0.080	≤ 0.015	0.015 – 1.0	≤ 0.15	≤ 1.00	≤ 0.20	≤ 0.005

Ocel HCT500X+Z100-B-O je žárově zinkovaná nízkolegovaná dvoufázová ocel. Nominální tloušťka analyzovaného materiálu je 0,6 mm. Plech je opatřen žárovým povlakem zinku o nominální tloušťce 5 μm ÷ 8,5 μm. Struktura plechu je tvořena tažnou feritickou maticí a martenzitickou fází. Tyto dvě fáze společně tvoří pevný, tažný a dobře svařitelný materiál s vysokou únavovou pevností a absorpční kapacitou, díky čemuž se v automobilovém průmyslu používá například při výrobě vnitřních částí karoserií a nárazníků. V současné době se uvažuje i o použití materiálu HCT500X+Z100-B-O na pohledové díly karoserie např. spodní díl pátých dveří. Mezi další výhody se řadí BH efekt. Další možností, jak zvýšit pevnost oceli bez zvýšení nákladů na legování, je zjemňování struktury. [7],[8],[9],[10],[25]



### 7.3. Zkušební zařízení BUP600 a ARAMIS 4M Adjustable

Pro zkoušení a vyhodnocení materiálu HCT500X+Z100-B-O jsem zvolil přístroj BUP600 a optický systém ARAMIS 4M Adjustable, oboje dostupné v laboratoři FS ČVUT v Praze.

Tab. 6, Technické specifikace BUP600

Maximální zkušební zatížení (síla tažníku) a přidržovací síla		600 kN
Rozměry stroje	Celková výška	1739 mm
	Výška stolu	983 mm
	Výška k hlavě nástroje	1185 mm
	Šířka	1048 mm
	Hloubka	1775 mm
Maximální rychlost tažníku		17 mm/s



Obr. 29, Měřicí zařízení BUP 600 se systémem ARAMIS 4M Adjustable [24]

Systém ARAMIS je vyvíjen společností GOM a v České republice je distribuován společností MCAE Systems, s.r.o. Specifikace konkrétního druhu (ARAMIS 4M Adjustable) jsou uvedené v následující tabulce.



Tab. 7, Technické specifikace ARAMIS 4M Adjustable pro objektivy 100 mm

Měřená plocha	10 mm x 7 mm až 500 mm x 370 mm
Maximální rychlost snímání (frekvence)	168 Hz při 2400 x 1728 pixelů 336 Hz při 2400 x 864 pixelů 672 Hz při 2400 x 400 pixelů 1334 Hz při 2400 x 168 pixelů
Doba expozice (uzávěrka)	0,1 ms až 2 s
Rozsah měření deformací	0,02 % až do > 100 %
Přesnost	Až 0,01%
Typ objektivů	100 mm
Měřená plocha při vzdálenosti kamer od vzorku 500 mm	10 mm x 7 mm až 100 mm x 70 mm
Měřená plocha při vzdálenosti kamer od vzorku 800 mm	10 mm x 7 mm až 200 mm x 140 mm
Velikost kalibrační destičky	53 mm x 38 mm až 88 mm x 63 mm
Úhel paprsků světla pro ohniskovou vzdálenost $\geq 65$ mm	10°
Minimální čas mezi zapnutím přístroje a jeho používáním (kvůli zahřátí)	25 min
Typ kalibračních destiček	<b>CQ/CP20 55 x 44</b> CQ 23 x 18 CQ/CP20 30 x 24

## 7.4. Naměřená data

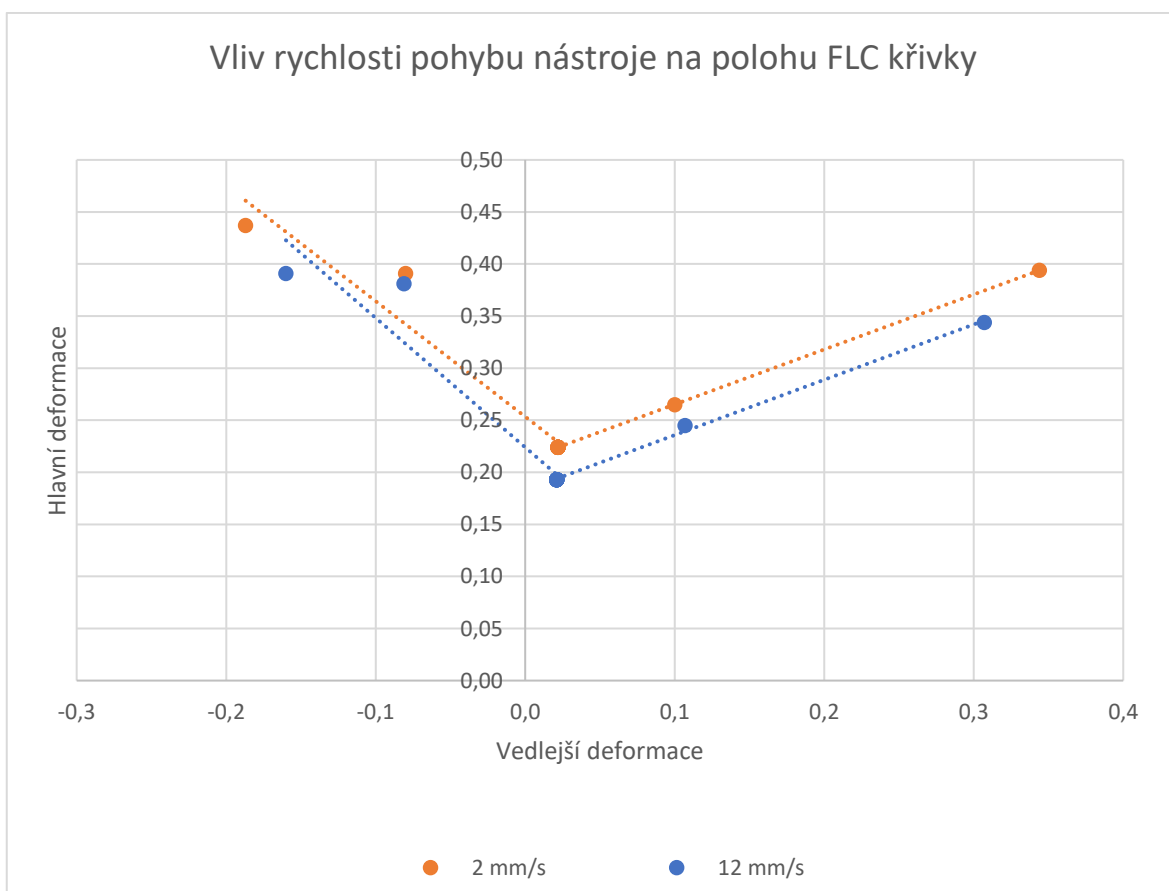
Experiment byl měřen pro dvě rychlosti posuvu tažníku. Jako první byla měřena normalizovaná rychlost 2 mm/s. Poté byla měřena nenormalizovaná rychlost 12 mm/s. Naměřené hodnoty pro všechny měřené vzorky jsou v příloze.

Tab. 8, Průměrné hodnoty deformací pro rychlost 2 mm/s

	Vedlejší deformace	Hlavní deformace
V1	-0,187	0,437
V2	-0,080	0,391
V3	0,022	0,224
V4	0,100	0,265
V5	0,344	0,394

Tab. 9, Průměrné hodnoty deformací pro rychlost 12 mm/s

	Vedlejší deformace	Hlavní deformace
V1	-0,160	0,391
V2	-0,081	0,381
V3	0,021	0,193
V4	0,107	0,245
V5	0,307	0,344



Obr. 30, Vliv rychlosti pohybu nástroje na polohu FLC křivky

## 7.5. Komentář k naměřeným datům

Některé naměřené hodnoty byly záměrně vyřazeny, jelikož je nebylo možné vyhodnotit z důvodu porušení sítě (patternu). Vyhodnoceny byly pouze sekce (řezy) s kvalitním patternem.

Vzorky v pravé části FLD diagramu, kde dochází ke dvouosému tahovému zatížení bylo obtížné změřit. Tyto vzorky vyžadovaly obzvláště důslednou přípravu odmaštění, vhodně aplikovanou lubrikaci a správné nanesení patternu. Při nedodržení těchto podmínek se pattern deformoval dříve než došlo ke vzniku trhliny, a tudíž daný vzorek nebylo možné vyhodnotit. Dále bylo třeba zajistit dostatečné světelné podmínky. Při vyšších rychlostech zkoušky (12 mm/s) bylo potřeba zaznamenat zkoušku při vyšších snímkovacích frekvencích. Z tohoto důvodu bylo nutné zvýšit intenzitu nasvícení vzorku.

Z grafu na obrázku 30 je patrné, že FLC křivka pro rychlost tažníku 12 mm/s je vzhledem k FLC křivce pro rychlost tažníku 2 mm/s posunuta směrem dolů ve směru hlavních deformací. Z naměřeného grafu vyplývá, že zvyšování rychlosti deformace při tváření má negativní vliv na polohu FLC křivky, a tudíž na zásobu plasticity.

## 8. Závěr

Tato bakalářská práce se zabývá chováním výšepevných materiálů s ohledem na rychlost posuvu tažníku potažmo rychlostí deformace.

Úvodní kapitola popisuje tváření jako takové, dále popisuje základní pojem v teorii tváření, a to deformaci a její rychlost.

Další kapitola pojednává o moderních bezkontaktních optických systémech, které se používají k vyhodnocování deformací. Zde je detailně popsán systém ARAMIS, za pomoci kterého byla měřena experimentální část, dále 2D a 3D korelace. Poté je stručně popsán princip fungování systému ARGUS.

Následující kapitola popisuje aparát, pomocí kterého je možné naměřené výsledky vložit do grafu a porovnat – Diagram mezního přetvoření.

Další kapitola pojednává o normalizovaných zkušebních podmínkách NAKAJIMA zkoušky, která byla použita v experimentální části. Podmínky zkoušky vycházejí z normy ČSN EN ISO 12004-2. Zde jsou popsány podmínky ohledně průběhu zkoušky, tloušťky měřeného materiálu, geometrie a počtu měřených vzorků, nanášení patternu, mazání a správného vyhodnocení zkoušky.

V následující kapitole zmiňuji charakteristiku dvoufázových ocelí (DP), z nichž jeden konkrétní typ (HCT500X+Z100-B-O) byl v experimentální části měřen.

U zkoušky tahem platí vztah mezi posuvem příčnicku a rychlostí deformace, a protože u všech měřených vzorků dochází k tahovému zatížení (viz Obr. 12), proto pro všechny zkoušky platí vztah mezi rychlostí deformace a rychlostí posuvu tažníku (12) uvedený v kapitole 2.1.

V experimentální části je popsán průběh měřené zkoušky, která začíná kalibrací měřicího zařízení, následuje vyříznutí vzorků na vláknovém laseru, poté je popsáno odmaštění a očištění vzorku následované nástřikem patternu a kontrolou jeho kvality. Pak je popsáno použité mazání a podmínky pro správné vyhodnocení. Dále je popsán konkrétní typ měřeného plechu (HCT500X+Z100-B-O), měřicí zařízení BUP600 a ARAMIS 4M Adjustable.

Prakticky bylo celkem proměřeno 35 platných a vyhodnotitelných vzorků z plechu HCT500X+Z100-B-O o nominální tloušťce 0,6 mm. Pro rychlost pohybu nástroje 2 mm/s bylo změřeno 20 vzorků a pro rychlost pohybu nástroje 12 mm/s 15 vzorků. Z každého vzorku byly vyhodnoceny 3 body do diagramu FLD. Tyto hodnoty byly dále zprůměrovány do FLD diagramu (hodnota hlavní a vedlejší deformace).

Nejobtížnější bylo změřit pravou část FLD diagramu, jelikož bylo třeba správným odmaštěním a lubrikací zajistit, aby se pattern deformoval společně s materiálem a aby trhlinka vznikla v tolerančním pásmu, které přikazuje norma. Z důvodu přesnosti měření jsme měřili stále se stejným tribologickým systémem.

Poloha křivky mezní tvářitelnosti se pro vyšší rychlost deformace posunula dolů ve směru hlavních deformací. Na základě naměřených dat je patrné, že s rostoucí rychlostí posuvu tažníku dochází k posunutí křivky FLD směrem dolů – materiál vykazuje nižší zásobu plasticity.

Vzorky měřené pro rychlost pohybu tažníku 12 mm/s byly znatelně teplejší než ty, s rychlostí 2 mm/s. Z tohoto důvodu by mohlo být zajímavé vzorky v průběhu zkoušky sledovat termokamerou a vyhodnotit průběh teploty na povrchu vzorků. Dalším možným tématem by mohlo být ověřování výsledků velikosti deformace pomocí numerických simulací.

## 9. Seznamy

### 9.1. Seznam použité literatury

- [1] *Digital Image Correlation: Overview of Principles and Software*. In: *Correlated Solutions* [online]. s. 56 [cit. 2019-11-21]. Dostupné z:  
<http://www.correlatedsolutions.com/supportcontent/condensed-shortcourse.pdf>
- [2] *Metrology systems: ARAMIS* [online]. GOM [cit. 2019-11-21]. Dostupné z:  
<https://www.gom.com/metrology-systems/aramis.html>
- [3] *Metrology systems: ARAMIS for Education* [online]. GOM [cit. 2019-11-21]. Dostupné z: <https://www.gom.com/metrology-systems/education/aramis-for-education.html>
- [4] *Optický systém pro analýzu 3D pohybu a 3D deformací: ARAMIS* [online]. MCAE [cit. 2019-11-21]. Dostupné z: <https://www.mcae.cz/cs/produkty/aramis-opticky-system-pro-analyzu-3d-pohybu-a-3d-deformaci/>
- [5] ČSN EN ISO 12004-2. *Kovové materiály - Plechy a pásy - Stanovení křivek mezní tváritelnosti - Část 2: Stanovení křivek mezní tváritelnosti v laboratoři*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [6] WESENJAK, R., C. KREMPASZKY a E. WERNER. *Prediction of forming-limit curves of dual-phase steels based on a multiple length scale modelling approach considering material instabilities*. Elsevier. 2015, , s. 277 - 289.
- [7] WORLDAUTOSTEEL, *Advanced High-Strength Steels Application Guidelines Version 6.0* [online]. 2017 [cit. 2020-02-21]. Dostupné z:  
[http://www.worldautosteel.org/download\\_files/AHSS%20Guidelines%20V6/00\\_AHSSGuidelines\\_V6\\_20170430.pdf](http://www.worldautosteel.org/download_files/AHSS%20Guidelines%20V6/00_AHSSGuidelines_V6_20170430.pdf)
- [8] MACEK, K., *Kovové materiály*. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006. [cit. 2020-02-21] ISBN 80-010-3513-1
- [9] BILLUR, Eren a Taylan ALTAN. *Three generations of advanced high-strength steels for automotive applications, Part I* [online]. 2013, , 2 [cit. 2020-02-21]. Dostupné z:  
[https://ercnsm.osu.edu/sites/ercnsm.osu.edu/files/uploads/S\\_FormingAHSS/664-1.pdf](https://ercnsm.osu.edu/sites/ercnsm.osu.edu/files/uploads/S_FormingAHSS/664-1.pdf)

- [10] *Extract from the product catalogue [online]. ArcelorMittal, [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: [https://automotive.arcelormittal.com/products/flat/first\\_gen\\_AHSS/DP](https://automotive.arcelormittal.com/products/flat/first_gen_AHSS/DP)*
- [11] *ARGUS [online]. MCAE [cit. 2020-03-05]. Dostupné z: <https://www.mcae.cz/cs/produkty/argus-opticky-system-pro-analyzu-procesu-tvareni/>*
- [12] *Metrology systems: ARGUS [online]. GOM [cit. 2020-03-05]. Dostupné z: <https://www.gom.com/metrology-systems/argus.html>*
- [13] *PETRUŽELKA, Jiří a Pavel SONNEK. Tvářitelnost kovových materiálů [online]. 3. verze, Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2006, poslední aktualizace 9.1.2007*
- [14] *KŘÍŽ, Tomáš. Vliv způsobu přípravy zkušebního vzorku na deformace zjišťované systémem ARAMIS. Praha, 2019. Bakalářská práce. ČVUT, fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. František Tatiček Ph.D.*
- [15] *KEELER, Stuart. The Science of Forming. 2. vydání. Precision Metalforming Association, 2006. ISBN 978-0982380048. [cit. 2020-03-05].*
- [16] *TU Liberec, Pevnostní materiály v karosérii (prezentace) [cit. 2020-03-05]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/14385059-Pevnostni-materialy-v-karoserii.html>*
- [17] *PETRUŽELKA, Jiří a Richard BŘEZINA. Úvod do tváření I. 1. vydání. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2001. 157 s. ISBN 80-7078-877-1.*
- [18] *BŘEZINA, Richard a Jiří PETRUŽELKA. Úvod do tváření II. 1. vydání. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2002. 114 s. ISBN 80-248-0068-3.*
- [19] *LENFELD, Petr. Technologie tváření kovů. Technologie II- Tváření Kovů [online]. Technická univerzita Liberec [cit. 2020-04-01]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/01.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm)*

- [20] SCHINDLER, Ivo a Petr KAWULOK. *DEFORMAČNÍ CHOVÁNÍ MATERIÁLŮ* [online]. Ostrava, 2013, s. 94 [cit. 2020-04-01]. Dostupné z: [https://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/deformacni-chovani-materialu/Schindler\\_Kawulok\\_Deformacni\\_chovani\\_materialu.pdf](https://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/deformacni-chovani-materialu/Schindler_Kawulok_Deformacni_chovani_materialu.pdf)
- [21] MACHÁLEK, J., et al. *Simulace procesů plošného tváření v softwaru PAM - STAMP 2g*. Ostrava: VŠB - TU, 2012, 120 s.
- [22] PILVOUSEK, T. *Vliv vybraných šarží materiálu DC06 na tvařitelnost při plošném tváření [Diplomová práce]*. Praha, 2009, 96 s
- [23] KUBELKA, M., *Vliv citlivosti materiálu na rychlost deformace při reálném lisovacím procesu [disertační práce]*. Praha: ČVUT v Praze, 2018, 94s.
- [24] NOVÁK, V., VALEŠ M., TATÍČEK F., ŠANOVEC J. a CHRÁŠŤANSKÝ L.. *The effect of strain rate on position of forming limit curve*. *Metal*. 2019, 2019(Listopad), 450-454. DOI: <https://doi.org/10.37904/metal.2019.825>. ISSN 2694-9296.
- [25] ČSN EN ISO 10346. *Kontinuálně žárově ponorem povlakované ocelové ploché výrobky pro tváření za studena – Technické dodací podmínky. Únor*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [26] JIE, M., C. H. CHENG, L. C. CHAN a C. L. CHOW. *Forming limit diagrams of strain-rate-dependent sheet metals*. *Elsevier*. 2009, 2009, 269-275. DOI: 10.1016/j.ijmecs.2009.01.007.
- [27] VERLEISEN, Patricia, Jan PEIRS, Joost Van SLYCKEN, Koen FAES a Laurent DUCHENE. *Effect of strain rate on the forming behaviour of sheet metals*. *Elsevier*. 2011, 2011, 1457–1464. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.03.018.
- [28] ČSN EN ISO 6892-1 *Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část I: Zkušební metoda za pokojové teploty* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.



## 9.2. Seznam obrázků

Obr. 1, Snímací hlava (kombinace vysokorychlostních kamer a světel) .....	14
Obr. 2, Princip dvourozměrné korelace a stereo triangulace .....	15
Obr. 3, Pohyb zvoleného bodu v čase .....	16
Obr. 4, Pohyb fazety v čase .....	16
Obr. 5, Obrázek v paměti počítače a na obrazovce monitoru před a po posunutí .....	17
Obr. 6, Optimalizační algoritmy vyžadují spojitost ve vyhodnocované oblasti .....	18
Obr. 7, Kalibrační deska CQ/CP20 55 x 44.....	19
Obr. 8, ARGUS - druhy měrných sítí .....	20
Obr. 9, KEELER-GOODWINův diagram ve skutečných deformacích .....	22
Obr. 10, Polokulový tažník používaný v metodě podle Nakajimy .....	24
Obr. 11, Geometrie zkušební vzorku (tvar kosti pro psa) .....	25
Obr. 12, Deformační stopy při plošném tváření .....	26
Obr. 13, Správný nástřik .....	27
Obr. 14, Mikrostruktura DP ocelí .....	29
Obr. 15, Porovnání měkkých ocelí a DP ocelí .....	30
Obr. 16, Porovnání FLC křivek pro DP oceli .....	30
Obr. 17, Příklady použití DP ocelí v automobilovém průmyslu .....	31
Obr. 18, Zpevnění způsobené BH efektem .....	31
Obr. 19, Orientace dřívku ke směru válcování .....	33
Obr. 20, Geometrie vzorků, šířka dřívku popisováno zleva: 20 mm, 60 mm, 100 mm, .....125 mm, 150 mm .....	33
Obr. 21, Odmaštění a očištění vzorku.....	34
Obr. 22, Porovnání špatně a správně odmaštěného vzorku .....	34
Obr. 23, Nanášení nástřiku .....	35
Obr. 24, Poloha vzorku pro kontrolu nástřiku .....	35
Obr. 25, Příklad softwarem vyhodnocené kvality nástřiku .....	36
Obr. 26, Lubrikace tažníku k eliminaci tření mezi tažníkem a zkušebním vzorkem .....	36
Obr. 27, Porovnání trhliny mimo toleranční pásmo a v tolerančním pásmu .....	37
Obr. 28, Vyhodnocení vzorku pomocí softwaru ARAMIS .....	38
Obr. 29, Měřicí zařízení BUP 600 se systémem ARAMIS 4M Adjustable .....	40
Obr. 30, Vliv rychlosti pohybu nástroje na polohu FLC křivky.....	42

### 9.3. Seznam tabulek

Tab. 1, Specifikace kalibrační desky .....	19
Tab. 2, Parametry zkoušky dle Nakajimy .....	23
Tab. 3, Parametry polokulového tažníku .....	23
Tab. 4, Mechanické vlastnosti HCT500X+Z100-B-O dle ČSN EN ISO 10346 .....	39
Tab. 5, Chemické složení HCT500X+Z100-B-O dle ČSN EN ISO 10346 .....	39
Tab. 6, Technické specifikace BUP600.....	40
Tab. 7, Technické specifikace ARAMIS 4M Adjustable pro objektivy 100 mm .....	41
Tab. 8, Průměrné hodnoty deformací pro rychlost 2 mm/s .....	42
Tab. 9, Průměrné hodnoty deformací pro rychlost 12 mm/s .....	42

## 10. Přílohy

Přílohy jsou na přiloženém CD

Příloha 1 – geometrie vzorků

Příloha 2 - naměřená data