

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ  
PRÁCE**

**2022**

**JAN  
PETR**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Petr** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **475072**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Výrobní inženýrství**  
Specializace: **Bez specializace**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Vliv rychlosti deformace na polohu křivek FLC pro materiál DX56**

Název diplomové práce anglicky:

**Influence of deformation rate on the position of FLC curves for steel DX56**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznámení s problematikou okrajových podmínek ovlivňujících proces výroby výlisku
- 2) Návrh podmínek pro realizaci experimentu
- 3) Stanovení křivek pro materiálovou jakost DX56
- 4) Závěrečné zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

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

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

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

Datum zadání diplomové práce: **21.04.2022** Termín odevzdání diplomové práce: **15.08.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2022**

Ing. František Tatiček, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

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

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## **Anotace**

**Vysoká škola:** České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní

**Ústav:** Ústav strojírenské technologie

**Název diplomové práce:** Vliv rychlosti deformace na polohu křivek FLC pro materiál DX56

**Akademický rok:** 2021/2022

**Autor:** Bc. Jan Petr

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

**Konzultant:** Ing. Vít Novák

## **Abstrakt:**

Práce se věnuje výzkumu vlivu rychlosti deformace na zásobu plasticity, která je prezentována křivkami mezních přetvoření, zkráceně označováno FLC. Teoretická část této práce se zabývá technologií plošného tváření se zaměřením na tvářitelnost a její zkoušení. Dále jsou popsány metody vyhodnocování deformací pomocí optických metod, především systém ARAMIS. Praktická část se věnuje měření hlavních a vedlejších deformací pro sestavení FLC pro materiálovou jakost CR4 (dle VDA 239-100).

## **Klíčová slova:**

Plošné tváření; tvářitelnost, zkoušky tvářitelnosti, optické metody, DIC, systém ARAMIS, deformační rychlost, diagram mezních deformací, křivka mezních deformací, zkouška podle Nakajimy

## **Rozsah práce a příloh:**

Počet stran: 52

Počet obrázků: 55

Počet tabulek: 9

Počet příloh: 7

## **Annotation**

**University:** Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering

**Department:** Department of Manufacturing Technology

**Title of work:** Influence of deformation rate on the position of FLC curves for steel DX56

**Academic year:** 2021/2022

**Author:** Bc. Jan Petr

**Supervisor:** Ing. František Tatíček, Ph.D.

**Consultant:** Ing. Vít Novák

## **Abstract:**

This thesis is dedicated to the research of the effect of deformation rate on the plasticity reserve, which is presented by the forming limit curves, abbreviated as FLC. The theoretical part of this thesis deals with the technology of sheet metal forming with focus on formability and its testing. Furthermore, the methods of evaluation of deformation by optical means, especially the ARAMIS system, are described. The practical part is devoted to the measurement of major and minor deformations for the construction of FLD for steel grade CR4 (VDA 239-100).

## **Key words:**

Sheet metal forming; formability, formability tests, optical methods, DIC, ARAMIS system, deformation rate, forming limit diagram, forming limit curve, Nakajima test

## **Volume of work:**

Number of pages: 52

Number of pictures: 55

Number of tables: 9

Number of attachments: 7

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Vliv rychlosti deformace na polohu křivek FLC pro materiál DX56“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Františka Tatíčka, Ph.D. a Ing. Víta Nováka, s využitím literatury, která je uvedena v seznamu použité literatury na konci této diplomové práce.

V Praze dne.....

.....

podpis

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval svým vedoucím Ing. Františku Tatíčkoví, Ph.D. a Ing. Vítu Novákovi za vedení práce, pomoc při experimentu a mnohé podnětné rady. Také bych rád poděkoval všem ostatním, kteří mě během studia a psaní této práce podporovali.

# Obsah

1. Úvod .....	9
2. Teorie tváření .....	10
2.1. Plošné tváření za studena .....	11
2.1.1. Hluboké tažení .....	11
2.1.2. Stříhání .....	11
2.1.3. Ohýbaní .....	12
3. Tvářitelnost .....	13
3.1. Faktory ovlivňující tvářitelnost .....	13
3.1.1. Fyzikálně – metalurgický charakter oceli .....	13
3.1.2. Termomechaničtí činitele .....	13
3.1.3. Stav napjatosti .....	14
3.1.4. Technologičtí činitele .....	14
3.2. Zkouška tahem .....	15
3.3. Technologické zkoušky .....	16
3.3.1. Klínová zkouška .....	16
3.3.2. Zkouška hloubením dle Erichsena .....	16
3.3.3. Zkouška kalíškovací .....	17
3.3.4. Zkouška rozšiřováním otvoru HET .....	17
3.3.5. Zkouška střídavým ohybem .....	18
3.3.6. Zkouška podle Gütha .....	18
3.4. Diagram mezních přetvoření .....	19
3.4.1. Stanovení FLC dle ČSN EN ISO 12004-2 .....	21
3.5. Digitální korelace obrazů (DIC) .....	22
3.5.1. Deformační síť .....	22
3.5.2. Dvourozměrná korelace .....	23
3.5.3. Trojrozměrná korelace .....	24
4. Návrh a příprava experimentu .....	25
4.1. Návrh zkušebních vzorků .....	25
4.1.1. Materiál DC05+ ZE50/50 BPO .....	25
4.1.2. Geometrie zkušebního vzorku .....	26
4.2. Zkušební zařízení a přípravky .....	27
4.3. Optický systém ARAMIS .....	28
4.3.1. Nastavení a kalibrace systému ARAMIS .....	29
4.4. Příprava patternu .....	32
4.4.1. Předúprava povrchu .....	32
4.4.2. Výběr typu barvy .....	33

4.5. Parametry zkoušky .....	34
5. Měření a vyhodnocení .....	36
5.1. Postup měření .....	36
5.2. Zpracování měření .....	38
5.3. Výsledky měření .....	39
6. Závěr .....	44
Bibliografie .....	46
Seznam obrázků .....	49
Seznam tabulek .....	51
Seznam příloh .....	52



# 1. Úvod

Automobilový průmysl je v současné době jeden z nejlépe optimalizovaných oborů strojírenské výroby. Hledá se každá vteřina, které by přinesla lepší využití strojů, a každý gram, který by snížil hmotnost vyrobeného dílu. Motivací k optimalizaci je několik, od tlaků ze strany Evropské unie ohledně emisí až po prosté zvýšení zisků snížením spotřeby materiálů. Z hlediska karoserie automobilu to vede ke zrychlení lisovacího procesu při současném snížení tloušťky plechů.

Moderní automobily už dávno nejsou jen stroje určené k přepravě, ale mnohdy jsou považovány za určitý designový doplněk. Tvary karoserií, tak dostávají různé křivky, zaoblení a prolisy, které i přesto, že mohou být funkční, výrazně ztěžují proces výroby. Živostnost designu karoserie je poměrně omezená, přibližně okolo 4–8 let. Poté automobilka uvede na trh novou generaci vozu, nebo alespoň facelift staré generace.

Aby byly uspokojeny požadavky uvedené výše, probíhá v automobilce neustálý vývoj nových lisovacích nástrojů, které budou schopny vyrobit nově navržené díly. Jelikož jde o velmi složité, a tedy i drahé, nástroje, tak je snaha využít, co nejvíce moderních počítačových simulací. Existuje celá řada simulačních softwarů, které pracují s mnoha různě složitými materiálovými modely.

Tyto modely obsahují materiálové charakteristiky, které byly změřeny pomocí normovaných laboratorních zkoušek. Nedostatkem takových zkoušek je, že probíhají za přesně definovaných podmínek, které se ale mohou výrazně lišit od reálných podmínek lisovacího procesu. Jedna z charakteristik, pro kterou je tento rozdíl značný, je rychlost deformace, která je těsně spojena se zkracováním výrobních časů.

Jednoduše může nastat situace, kdy simulační software, který nebere v potaz deformační rychlost, vyhodnotí nástroj jako vhodný, ale ve skutečnosti dojde k destrukci vyráběného dílu, protože vlivem vyšší rychlosti došlo k předčasnému vyčerpání plasticity. Takový nástroj je pak v lepším případě nutné opravit a v tom horším je nutné vyrobit nový, ale obě varianty stojí nemálo času a peněz.

Teoretická část této práce se věnuje převážně tvářitelnosti, metodám jejího stanovení a metodě korelace obrazů. Praktická část se věnuje přesnému naměření a sestavení diagramů mezních přetvoření pro materiálovou jakost CR4 pro čtyři různé rychlosti tažníku zkušebního stroje. Zkouška dle Nakajimy bude provedena na stroji Zwick Roell BUP 600 a vyhodnocována optickým systémem ARAMIS 4M od firmy GOM.

Z důvodu omezení výroby ve firmě Škoda Auto a.s. nám nebyla dodána materiálová jakost DX56, jak uvádí zadání této práce, ale jakost DC05. Dle normy VDA 239-100, kterou se ve Škoda Auto a.s. řídí, jde o ekvivalentní ocele s různou povrchovou úpravou a způsobem válcování. Jakost DX56 je žárově pozinkovaná a způsob válcování není předepsán. Jakost DC05 je elektrolyticky pozinkovaná a válcovaná za studena. Z hlediska složení a mechanických vlastností jsou oba materiály stejné.

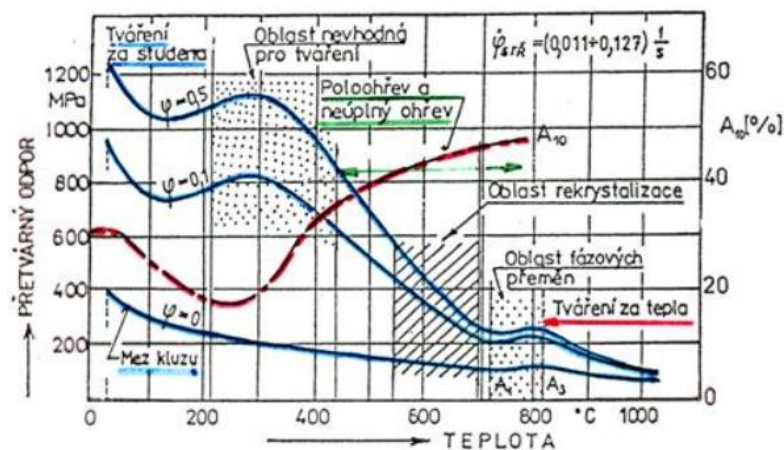
## 2. Teorie tváření

Pojem tváření zahrnuje velké množství technologií, kterými měníme tvar z výchozího polotovaru na konečný produkt bez odběru materiálu. Změna tvaru je vyvozena vnějšími silami, jejichž velikost musí v materiálu vyvolat homogenní plastickou deformaci neboli napětí vnesené do materiálu musí být větší než mez kluzu a zároveň menší než mez pevnosti daného materiálu za daných podmínek.

Plastická deformace je doprovázena růstem koncentrace poruch krystalové mřížky. V důsledku toho dochází ke zvýšení pevnostních charakteristik materiálu a ke snižování jeho plastických vlastností. Zpevňování je přínosem, pokud je cílem výroba mechanicky lepší součásti (např. v porovnání s obráběnou), ale pokles plasticity je překážkou při výrobě součásti s velkým přetvořením.

Tvářením lze úspěšně zpracovávat železné i neželezné kovy a některé plasty. Výhodami jsou vysoká produktivita, minimum odpadu a rozměrová přesnost konečných výrobků. Hlavními nevýhodami jsou vysoká pořizovací cena nástrojů a omezený objem zpracovávaného dílu. Tváření se tedy nejvíce využívá pro výrobu velkého počtu menších součástí stejného tvaru. [1][2][3]

Technologie tváření rozdělujeme převážně podle teploty, při které proces probíhá. Hraničním bodem je teplota rekrytalizace materiálu, přibližně vyjádřená jako 40% z teploty tavení  $T_T$  [K]. Tváření pod touto teplotou (, respektive do 30%  $T_T$ ) označujeme jako tváření za studena (dochází ke zpevňování materiálu, které je možno odstranit rekrytalizačním žiháním; jsou potřeba velké síly), tváření nad teplotou rekrytalizace (, respektive nad 70%  $T_T$ ) označujeme jako tváření za tepla (zpevňování se neprojevuje; jsou potřeba menší síly). Interval 30% ÷ 70%  $T_T$  označujeme jako tváření za poloohřevu (jde o kompromis mezi oběma typy).



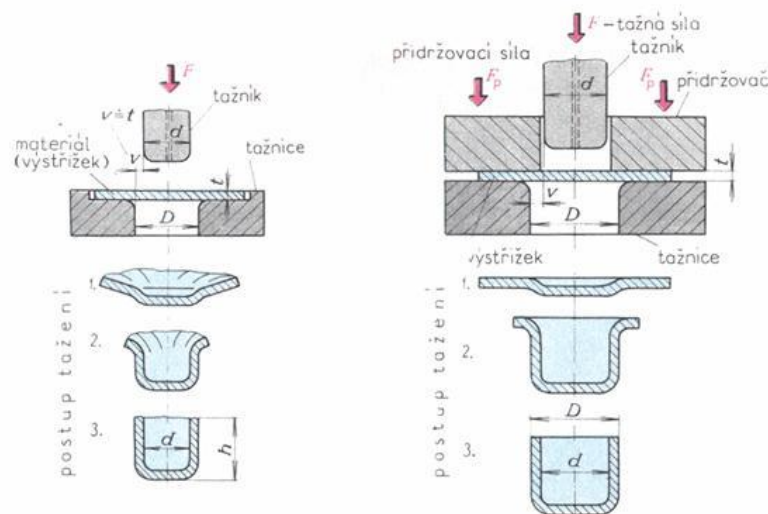
Obrázek 1 – Závislost přetvárného odporu na teplotě [1]

Druhým důležitým dělením je podle působení napětí. Při *plošném tváření* převládá dvouosé napětí, takže se polotovar deformuje ve dvou směrech. Pod plošné tváření spadají technologie tažení, ohýbání, stříhání atd. Při *objemovém tváření* převládá trojosé napětí a všesměrná deformace. Některé technologie objemové tváření jsou válcování, kování, protlačování a tažení drátů. [1][2]

## 2.1. Plošné tváření za studena

### 2.1.1. Hluboké tažení

Hluboké tažení je technologická operace, při které se rovinný plechový přístřih přetvoří na prostorový nerozvinutelný tvar. Mezi operace hlubokého tažení patří především technologie prostého tažení, tažení se ztenčením stěny, zpětné tažení, žlábkování, protahování, rozšiřování nebo zužování. Lze vytahovat tvary jak rotačně symetrické, tak hranaté, pokud budou mít zaoblené rohy. Při tažení s vysokým stupněm deformace má materiál v oblasti příruby tendenci se vlnit. Tomu lze zabránit použitím větší tažné mezery, přidržovače nebo brzdných drážek, které zpomalují tok materiálu a lze je využívat lokálně. Kvůli nebezpečí utržení dna je také nutné většinou tvářet na několik operací. [1][2][3]



Obrázek 2 - Tvorba vln u tažení bez přidržovače (vlevo) a s přidržovačem (vpravo) [1]

### 2.1.2. Stříhání

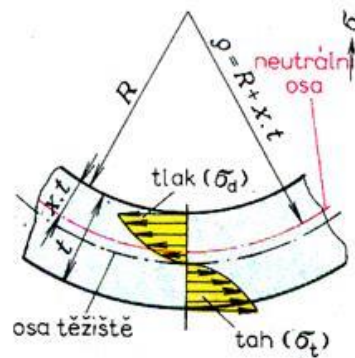
Ke stříhu dochází při překonání meze pevnosti ve smyku materiálu mezi hranami střížníku a střížnice. Jedná se o jedinou tvářecí operaci, jejímž cílem je porušení materiálu. Stříhání se používá především na přípravu polotovarů pro další technologie, nebo jako dokončovací operace jako děrování, vystřihování, ostřihování atd. Charakteristikou střížné hrany je lokální zpevnění a mikrotrhliny, které mohou negativně ovlivňovat další tvářecí procesy. [1][2][3]



Obrázek 3 - Princip stříhání otvoru [1]

### 2.1.3. Ohýbání

Ohýbání je technologie, při které je materiál namáhán kroutícím momentem. Na vnitřní straně ohýbaného prvku vznikají tlaková napětí, zatímco na vnější straně vznikají tahová napětí, tím se mezi nimi utvoří tzv. neutrální osa. Jelikož se v průběhu ohýbání nemění její délka, lze ji použít k určení rozměrů rozvinutého polotovaru. Po odlehčení dochází k vrácení elastické deformace, což nazýváme odpružení a je nutné jej korigovat. [1][2][3]



Obrázek 4 - Rozložení a velikost napětí v ohybku [1]

## 3. Tvářitelnost

Tvářitelnost neboli plasticita je dle definice ve [4] vlastnost materiálu nevratně se tvářet bez vzniku trhlin. Tvářitelnost jako taková je funkcí mnoha proměnných, ale obecně ji lze rozdělit na *metalurgickou tvářitelnost*, do které řadíme vliv chemického složení a struktury materiálu a jejich odezvu na změnu teploty, rychlost a průběh deformace, a na *technologickou tvářitelnost*, do které řadíme vliv napěťového stavu, geometrie, teplotně – rychlostní podmínky a další vnější vlivy. Obecně lze tvářitelnost kvalifikovat ve čtyřech stupních jako zaručenou, velmi dobrou, dobrou a omezenou. [4][6]

### 3.1. Faktory ovlivňující tvářitelnost

#### 3.1.1. Fyzikálně – metalurgický charakter oceli

Jde o charakteristiky těsně svázané s tvářeným materiálem, hlavně jeho chemické složení a struktura, ale také způsob výroby nebo děje způsobené zvětšující se teplotou.

Každý tvářený materiál obsahuje směsici základních prvků (prvky v závorce jsou charakteristické pro ocel – Fe, C, Mn), nečistot (P, S), plynů (O, N, H), stopových prvků (např. Cu, Sn, As) nebo legujících a jinak speciálních prvků (např. Cr, Ni, Mo, Si, W, Nb, V, Ti, Zr, B). Jednotlivé prvky nemají přímý vliv na tvářitelnost, ale spíše určují výslednou strukturu materiálu a jeho vlastnosti.

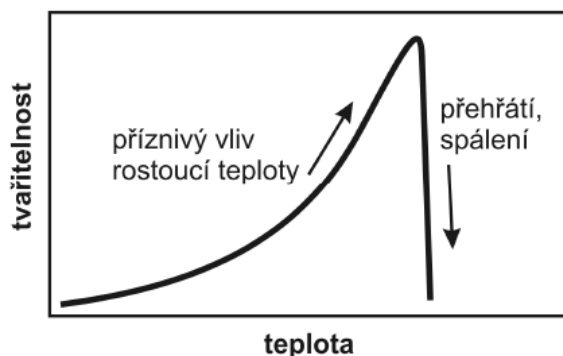
Obecně nejlepší tvářitelnost vykazují *čisté kovy*, protože jejich struktura obsahuje minimum překážek pro pohyb dislokací a hranice zrn jsou homogenní, a tedy dobře prostupné. Nedochází k rychlému hromadění deformací a vyčerpání plasticity. Slitiny s *jednofázovou strukturou* jsou ovlivněny vlastnostmi a množstvím přísadového prvku a v důsledku porušení mřížky základního kovu vykazují větší zpevnění a tím horší tvářitelnost než čisté kovy.

Tvářitelnost se značně snižuje vznikem *dvoufázové struktury*, protože složky mají různé mechanické vlastnosti, což vede ke koncentraci napětí na jejich rozhraní. Na rozhraní složek také vznikají např. precipitáty, jako důsledek rozdílné rozpustnosti prvků v jednotlivých složkách. Ve *slutinách s heterogenními strukturami* se vyskytují i další útvary jako jsou vměstky, eutektika a nerozpuštěné prvky, které blokují pohyb plastických deformací a snižují rychlost uzdravování. Těmito útvary je také zeslabována kohezní pevnost hranic zrn. Všechny tyto vlivy negativně ovlivňují tvářitelnost.

Mezi tepelně aktivované děje řadíme především hrubnutí zrna, fázové transformace či rekrystalizaci, které mění strukturu materiálu. Obdobně působí i způsob výroby, neboť litá struktura je nehomogenní a může obsahovat mnoho vad (dutiny, póry, vměstky), protvářená struktura je více homogenní a jemnější. [4][6][8]

#### 3.1.2. Termomechaničtí činitele

Zvyšující teplota usnadňuje pohyb atomů a dislokací v rámci materiálu, zrychluje se také difuze, která umožňuje rychlejší uzdravování. Všechny tyto vlivy příznivě ovlivňují tvářitelnost. Příliš vysoká teplota může vést k přehřátí materiálu a zhrubnutí zrna. Takový materiál je náchylný na interkrystalický lom. O spálení materiálu mluvíme, dojde-li k natavení hranic zrn, čímž ztratí soudržnost, a i při malé plastické deformaci dojde k rozdrobení materiálu. Tvářitelnost spáleného materiálu je rovna nule a je pouze určen k přetavení.



Obrázek 5 - Schéma vlivu teploty na tvářitelnost [6]

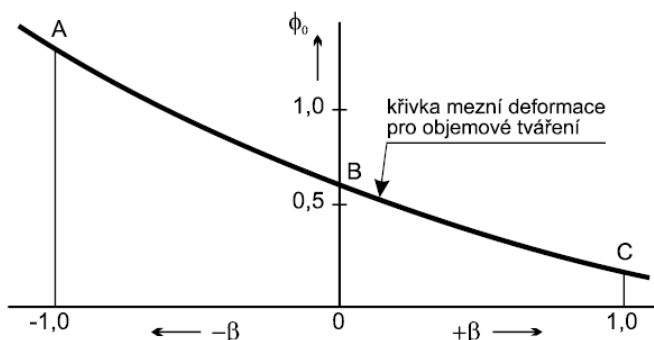
Vliv deformační rychlosti na tvářitelnost je obtížně popsatelný, protože dochází ke vzniku deformačního tepla, jehož vliv je popsán výše. Obecně lze říct, že zvyšující se rychlost deformace negativně ovlivňuje tvářitelnost, protože se zvyšující se rychlostí roste i deformační odpor.

Na rozdíl od laboratorních podmínek, kde se většinou realizuje spojitá deformace do porušení, se v praxi tváří v několika menších krocích. Tyto kroky mohou probíhat po různých dlouhých časových úsecích, mezi kterými dochází k uzdravování materiálu (ideálně k úplné rekrystalizaci), což pozitivně ovlivňuje tvářitelnost

Obecně lze říct, že vhodným nastavením tvářecího procesu z hlediska výše uvedených charakteristik jde významně ovlivnit tvářitelnost a vlastnosti daného materiálu. [4][6][8]

### 3.1.3. Stav napjatosti

Typ namáhání, které je do materiálu vnášeno tvářením, se výrazně projevuje na tvářitelnosti. Tahová napětí namáhají hranice zrn, čímž zvyšují pravděpodobnost vzniku křehkého lomu. Naopak tlaková napětí mají tendenci zavírat mikrotrhliny a tím zvyšovat soudržnost materiálu. Problémy s tvářitelností lze minimalizovat, pokud budou všechny složky vneseného napětí záporné, čehož lze docílit při hydrostatickém tvářením. [4][6][8]



bod A - homogenní tlak; bod B - čistý smyk (krut); bod C - homogenní tah

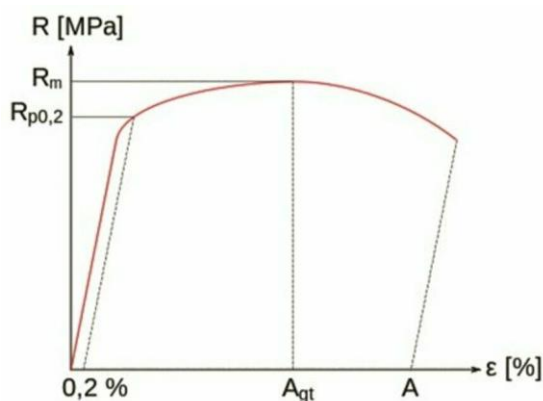
Obrázek 6 - Vliv stavu napjatosti na tvářitelnost pro ocel 11 500 [4]

### 3.1.4. Technologiční činitele

Tvářitelnost je výrazně ovlivněna použitou technologií, protože tvářecí proces není ideální a vznikají při něm různé rušivé vlivy. Je nutné brát v úvahu typ, stav, kvalitu a seřízení tvářecího stroje. Nástroj samotný má svou geometrii, která ovlivňuje tok materiálu a může způsobovat nerovnoměrnost deformace. Tato geometrie se v čase mění, jak dochází k opotřebení, čímž může docházet ke vzniku vad. Mezi nástrojem a tvářeným materiálem dochází ke tření a v místech koncentrace napětí i otlakům. Všechny tyto vlivy je obtížné obecně popsat a kvantifikovat, ale tvářitelnost zásadním způsobem ovlivňují.

### 3.2. Zkouška tahem

Zkouška tahem podle ČSN EN ISO 6892-1 [18] je nejběžnější zkouškou tvářitelnosti, kterou lze jednoduše určit základní materiálové charakteristiky. Mezi tyto charakteristiky patří např. celková tažnost  $A$  [%], mez kluzu  $R_e$  ( $R_{p0,2}$ ) [MPa], mez pevnosti  $R_m$  [MPa]. Ze zkoušky tahem lze dále určit součinitel plastické anizotropie  $r$  [-] dle ČSN EN ISO 10275 [9] a exponent deformačního zpevnění  $n$  [-] dle ČSN EN ISO 10113 [17]. [5]



Obrázek 7 - Smluvní diagram tahové zkoušky [5]

Všechny výše zmíněné charakteristiky lze použít k získání základní představy o tvářitelnosti daného materiálu. Jednotlivé mechanické vlastnosti mají různý vliv na proces plošného tváření. Oblast mezi mezí kluzu a mezí pevnosti určuje celkovou zásobu plasticity, proto jejich poměr můžeme považovat za ukazatel tvářitelnosti, u kterého platí:

$$\frac{R_e}{R_m} \in (0,55 \div 0,65) \quad - \text{ vynikající tvářitelnost,}$$

$$\frac{R_e}{R_m} \in (0,65 \div 0,75) \quad - \text{ horší tvářitelnost.}$$

Pro plošné tváření je součinitel plastické anizotropie jedním z nejdůležitějších ukazatelů, podle váženého průměru anizotropií v různých směrech lze přisoudit materiálu tvářitelnost:

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4}$$

$$\bar{r} > 1,6 \quad - \text{ vynikající,}$$

$$\bar{r} = 1,25 \div 1,6 \quad - \text{ dobrá,}$$

$$\bar{r} = 1,0 \div 1,25 \quad - \text{ uspokojivá,}$$

$$\bar{r} < 1,25 \quad - \text{ nízká,}$$

$$\bar{r} < 0,7 \quad - \text{ velmi špatná.}$$

Podobně lze využít i exponent deformačního zpevnění, který má veliký význam pro vypínání, jelikož brání lokalizaci deformace. Popisuje především vliv krystalické mřížky na tvářitelnost, kterou můžeme podle exponentu deformačního zpevnění hodnotit takto:

$n > 0,25$  – vynikající,

$n = 0,215 \div 0,25$  – dobrá,

$n < 0,215$  – nízká.

Soukromé firmy často používají komplexní ukazatele vytvořené z uvedených vlastností, např.

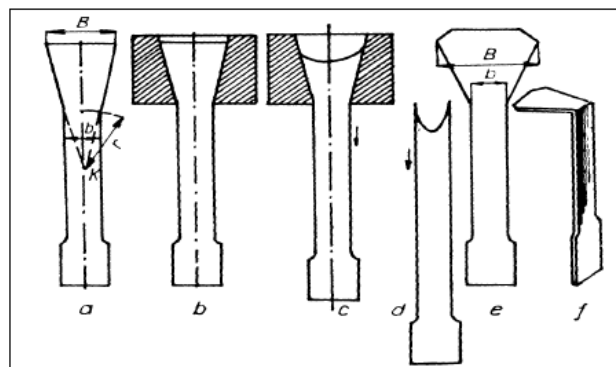
$$KUT = \frac{R_e}{R_m} * A * 1000 \text{ nebo } IT = r_{min} * n. [4]$$

### 3.3. Technologické zkoušky

Hlavním úkolem technologických zkoušek je napodobit chování materiálu při jednotlivých technologiích plošného tváření. Každá zkouška má své ukazatele tvářitelnosti, kterými jsou materiály hodnoceny.

#### 3.3.1. Klínová zkouška

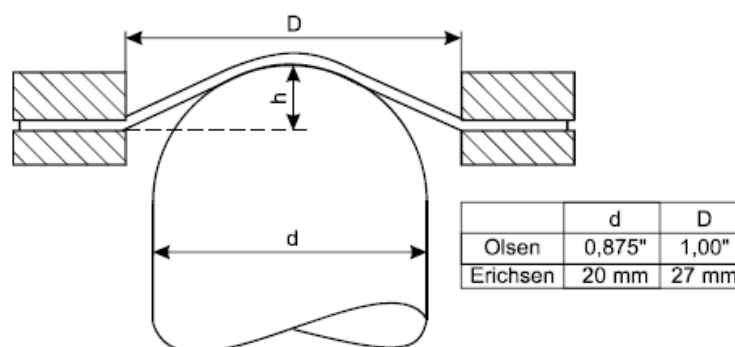
Klínová zkouška simuluje deformaci v přírubě hlubokotaženého kalíšku. Zkušební tělesem je plochá tyč, která je zatahována do klínovitého průvltaku. Ukazatelem hlubokotažnosti je poměr největší a nejmenší šířky klínu.[4]



Obrázek 8 - Zkušební těleso pro klínovou zkoušku [4]

#### 3.3.2. Zkouška hloubením dle Erichsena

Zkouška dle Erichsena ČSN EN ISO 20482 [20] simuluje tažení za dvojosého tahu. Zkušební těleso není definováno, ale musí mít větší průměr než přidržovač. Ukazatelem tvářitelnosti je velikost prohloubení. Tato zkouška je velmi jednoduchá, ale málo citlivá na jednotlivé jakosti plechu. [4]

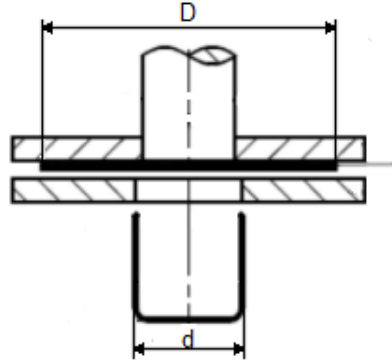


Obrázek 9 - Schéma zkoušky hloubením dle Erichsena [4]



### 3.3.3. Zkouška kalíškovací

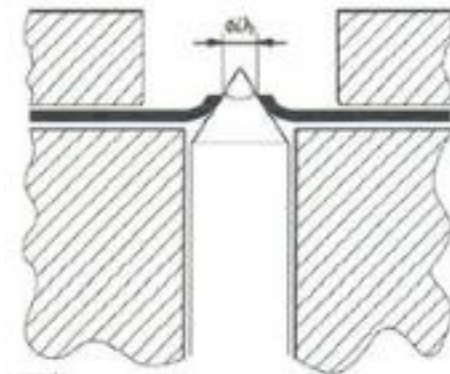
Kalíškovací zkouška věrně modeluje hluboké tažení a lze jí zjišťovat i anizotropii ve formě cípatosti. Zkušební těleso je kruhový přístřih bez definovaného rozměru. Ukazatelem tvářitelnosti je poměr průměru výtažku k průměru přístřihu, který nazýváme součinitel tažení. [4]



Obrázek 10 - Schéma kalíškovací zkoušky [4]

### 3.3.4. Zkouška rozšiřováním otvoru HET

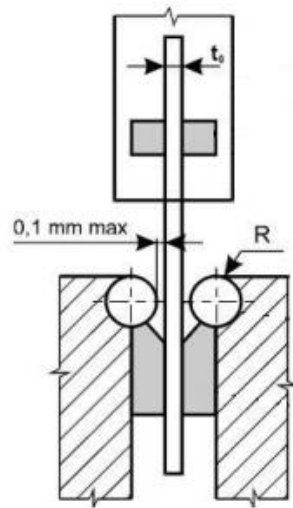
Cílem zkoušky rozšiřováním otvoru ČSN EN ISO 16630 je určit vliv střížné hrany na tvářitelnost především vysokopevnostních materiálů. Zkušebním tělesem je plech s vystřiženým otvorem o daném průměru. Otvor se následně kuželovým tažníkem rozšiřuje, dokud se neobjeví trhlinka skrz celou tloušťku materiálu. Ukazatelem tvářitelnosti je poměr mezi zvětšením průměru otvoru a původním průměrem. [10]



Obrázek 11 - Schéma zkoušky rozšiřování otvoru HET [10]

### 3.3.5. Zkouška střídavým ohybem

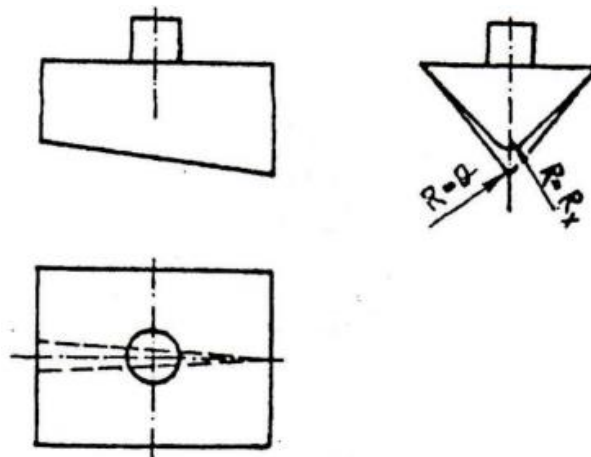
Cílem zkoušky střídavým ohybem je určení odolnosti zkoušeného plechu proti porušení střídavým ohýbáním o  $90^\circ$  kolem válcových ploch o předepsaném poloměru  $R$ . Zkušební vzorkem je pásek o rozměrech  $20 \times 100$  mm. Při zkoušce se určuje počet ohybů do úplného zlomení vzorku zkoušeného vzorku, bez započítání ohybu, při kterém došlo k poškození vzorku. [4]



Obrázek 12 - Schéma zkoušky střídavým ohybem [4]

### 3.3.6. Zkouška podle Gütha

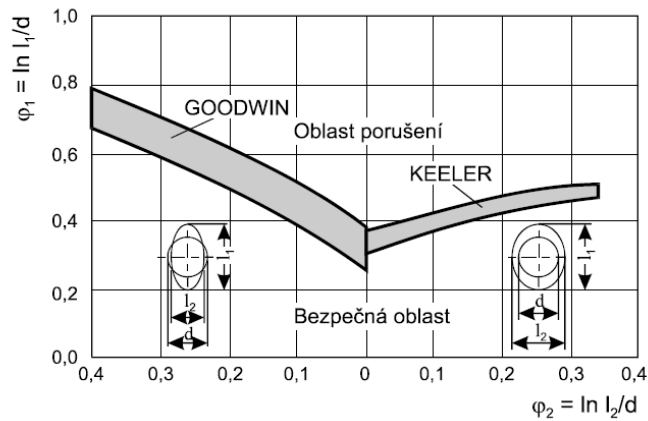
Zkouška podle Gütha slouží k určení minimálního poloměru ohybu. Zkušební vzorek je ohýbán nástrojem s postupně se zvětšujícím poloměrem. Minimální poloměr ohybu je takový, při kterém nevznikne trhlina. [4]



Obrázek 13 - Tvar ohybníku pro zkoušku dle Günthera [4]

### 3.4. Diagram mezních přetvoření

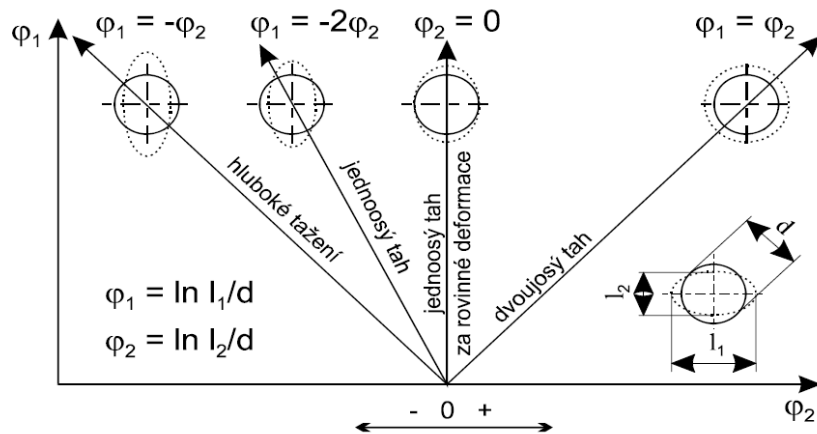
Diagram mezních přetvoření (FLD – z anglického Forming Limit Diagram) zobrazuje při jaké kombinaci hlavní a vedlejší deformace je vyčerpána zásoba plasticity v materiálu. Křivka ohraničující bezpečnou oblast se nazývá křivkou mezních deformací (FLC – z anglického Forming Limit Curve). V současné době je nejpoužívanějším typem tzv. Keeler-Goodwinův diagram, jehož osy jsou ve skutečných deformacích (Obr.14). [4]



Obrázek 14 - Keeler-Goodwinův diagram [4]

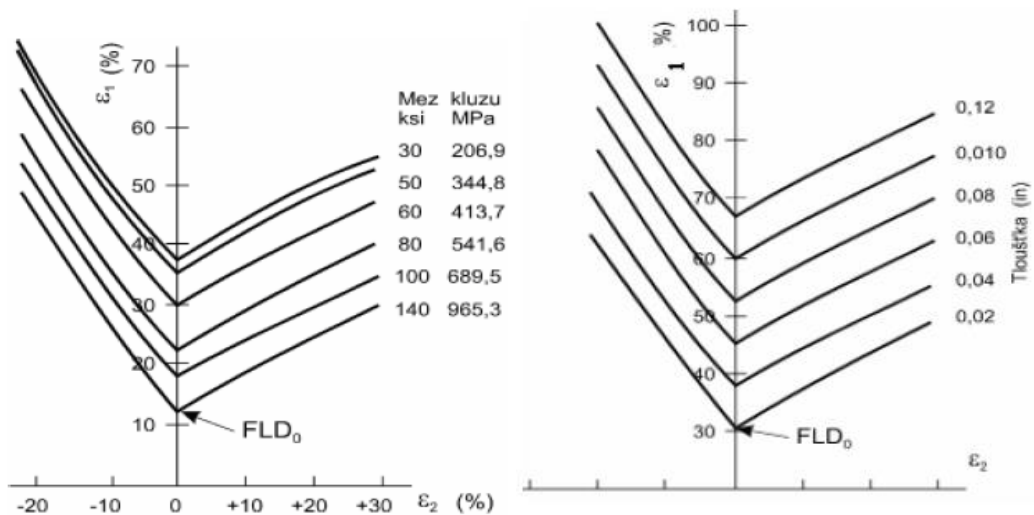
Známe-li hodnoty hlavní a vedlejší deformace, tak lze jednoduše zkontrolovat, zda dojde k porušení materiálu či nikoliv – viz. bezpečná oblast a oblast porušení na obrázku výše. Protože nemůžeme zaručit, že se materiál bude chovat vždy stejně, existuje v diagramu mezioblast, kde nelze jednoznačně rozhodnout, že k porušení dojde. Z tohoto důvodu by všechny tvářecí operace měly probíhat pod FLC s patřičnou rezervou.

Největší výhodou FLD je skutečnost, že ho lze použít k popsaní jakékoliv technologie plošného tváření. Následující obrázek ukazuje vztah mezi hlavní a vedlejší deformací při jednotlivých stavech napjatosti.



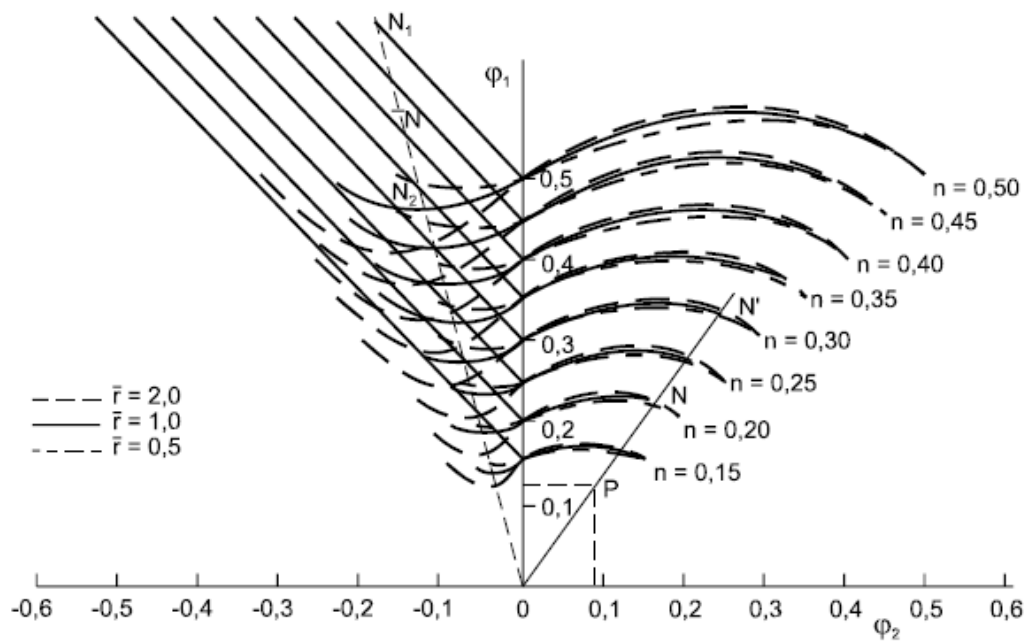
Obrázek 15 - Typické deformační stopy operací plošného tváření [4]

Jelikož FLD popisují zásobu plasticity v materiálu, tak výsledná poloha hraniční křivky je výrazně ovlivněna charakteristikami, kterými popisujeme tvařitelnost. Závislost polohy hraniční křivky na mezi kluzu ukazuje obrázek 16, na součiniteli plastické anizotropie, respektive exponentu deformačního zpevnění obrázek 18. Pro doplnění je na obrázku 17 uvedena závislost na tloušťce zkoušeného materiálu. [4] [21]



Obrázek 16 - Posunutí FLC v závislosti na mezi kluzu [4] (vlevo)

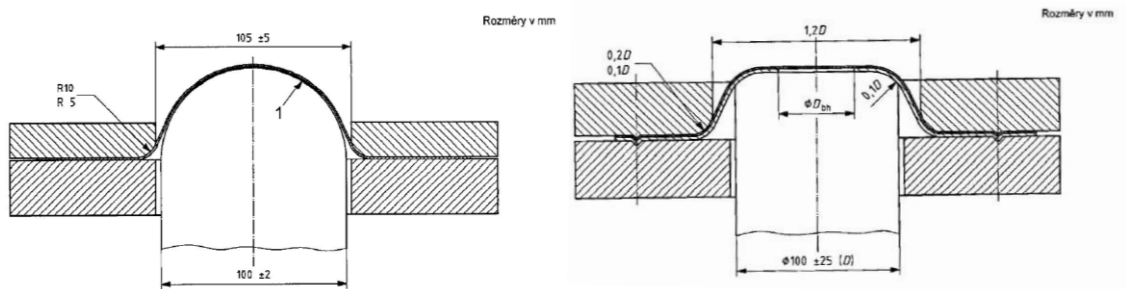
Obrázek 17 - Posunutí FLC v závislosti na tloušťce materiálu [4] (vpravo)



Obrázek 18 - Posunutí FLC v závislosti na součiniteli plošné anizotropie, respektive exponentu deformačního zpevnění [4]

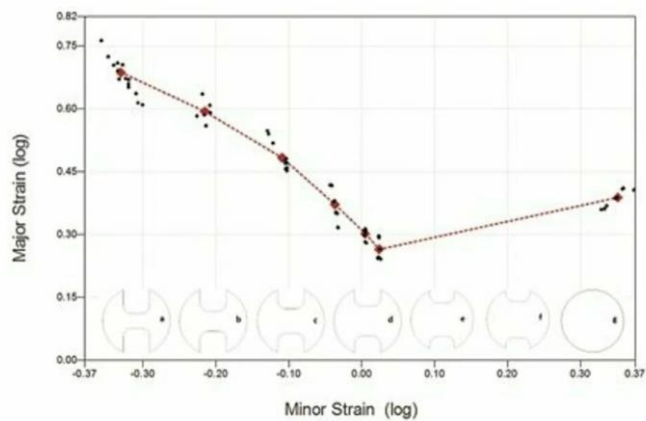
### 3.4.1. Stanovení FLC dle ČSN EN ISO 12004-2

Pro sestavení FLD se používá zkouška dle Nakajimy nebo dle Marciniaka podle normy ČSN EN ISO 12004-2, které vtlačováním půlkulového (Nakajima), respektive plochého (Marciniak) tažníku simulují lisovací proces. Zkušebními vzorky jsou různě široké pásy plechu, které odpovídají různým napětovým stavům. Schéma obou zkoušek jsou na obrázku 19. Na obrázku 20 je poté tvar vzorku společně s jeho polohou na FLC křivce. Detailní rozbor zkoušky dle Nakajimy je proveden v kapitole 4 a 5. [11]



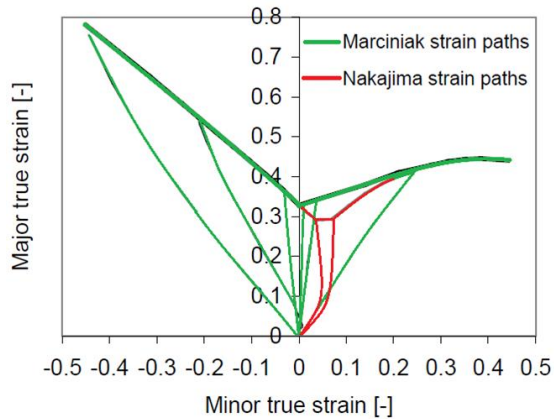
Obrázek 19 – Schéma zkoušky dle Nakajimy [11] (vlevo)

Obrázek 20 – Schéma zkoušky dle Marciniaka [11] (vpravo)

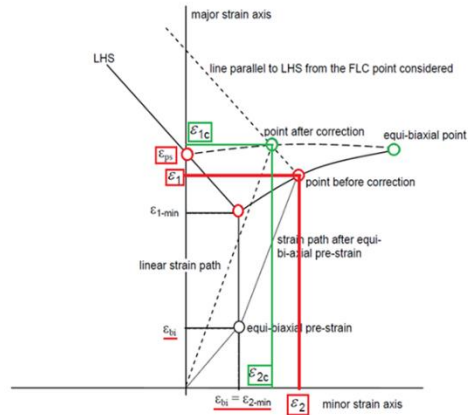


Obrázek 21 - Rozložení geometrií vzorku podél křivky FLC [24]

Kvůli různým tvarům tažníků je u jednotlivých zkoušek rozdílná i deformační cesta. Deformační cesta u zkoušky dle Nakajimy je v pravé části více zakřivená než u zkoušky dle Marciniaka. Díky tomu má FLC změřená dle Nakajimy svoje minimum níže a více vpravo než FLC dle Marciniaka. Obrázek 21 zobrazuje popsáný rozdíl v celkovém měřítku, zatímco obrázek 22 v detailu i s body pro korekci.



Obrázek 22 – Rozdílné deformační cesty obou zkoušek (vlevo)



Obrázek 23 – Detail s vyznačením bodů pro korekci (vpravo)

Korekce spočívá v přesunutí nejnižše položeného bodu dle Nakajimy na osu hlavní deformace a přepočtení bodu vpravo od posunutého, tak aby deformační cesta byla stejně dlouhá. Pro přepočet lze použít následující vzorce.

$$\beta = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_{2-min}}{\varepsilon_1 - \varepsilon_{2-min}} ; \theta = \frac{\varepsilon_{2-min}}{\varepsilon_{1-min} - \varepsilon_{ps}} ;$$

$$\varepsilon_{1c} = \frac{\varepsilon_2 - \theta \varepsilon_1}{\beta - \theta} ; \varepsilon_{2c} = \beta \varepsilon_{1c} ,$$

kde jsou  $\varepsilon_{1,2}$  – souřadnice přepočítávaného bodu před korekcí,  $\varepsilon_{1-min,2-min}$  – souřadnice nejnižšího bodu před posunutím,  $\varepsilon_{ps}$  – hodnota průsečíku lineární regrese levé strany mířící do minima s osou hlavního deformace,  $\varepsilon_{1c;2c}$  – souřadnice přepočítávaného bodu po korekci.

### 3.5. Digitální korelace obrazů (DIC)

Digitální korelace obrazů (DIC – z anglického Digital Image Correlation) je metoda umožňující přesně zachytit souřadnice bodů na základě porovnání po sobě jdoucích snímků. Záznam může být proveden jednou, dvěma nebo více kamerami, podle toho, zda se body pohybují v rovině (2D) nebo v prostoru (3D). Jeli záznam dostatečně detailní je možné určit dráhu, rychlost a zrychlení jednotlivých bodů. Interpretací těchto veličin, lze určit hodnoty deformace a deformační rychlosti. Největší výhodou DIC metody je schopnost velice přesně měřit po celou dobu zkoumaného procesu, a to bez jeho ovlivnění, ovšem za předpokladu, že je proces pro kamery viditelný.

#### 3.5.1. Deformační síť

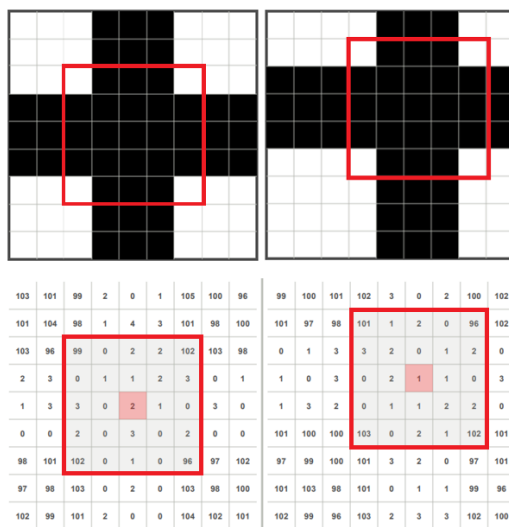
Pro potřeby metody DIC je nutné na objekt nanést tzv. deformační síť neboli pattern na základě, které budou vyhodnoceny jednotlivé posuny. Jelikož se jedná o optickou metodu, tak je nutné, aby software byl schopný jednoznačně identifikovat každou část zaznamenávaného objektu. Z toho plyne, že pattern musí být neopakující se, vysoce kontrastní a pokud možno izotropní, viz obrázek 24. [12]



Obrázek 24 - Ukázka správného patternu [12]

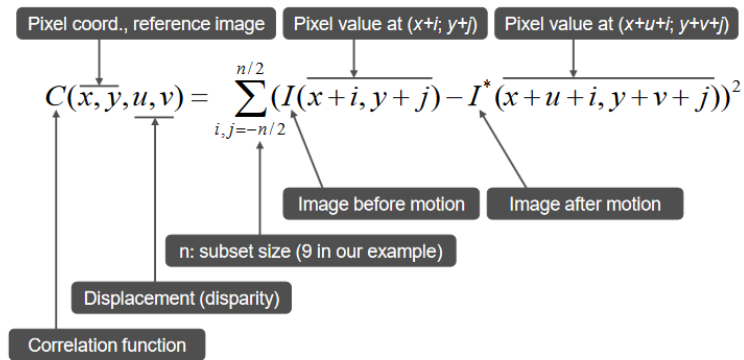
### 3.5.2. Dvourozměrná korelace

S použitím jedné kamery nelze určit hloubku, respektive velikost tělesa, a proto je nutné, aby měřený objekt byl plochý, umístěný kolmo na osu kamery a jeho vzdálenost od kamery se nesmí během záznamu měnit. Při vyhodnocování záznamu software přiřadí každému pixelu na prvním, referenčním, snímku tzv. stupeň šedi neboli hodnotu na intervalu bílá – černá, která odpovídá barevné intenzitě patternu. Protože samotný pixel nestačí k jednoznačné identifikaci, vytvoří si software skupiny pixelů, o přesně známém rozměru (např. 20x20 pixelů), kterým se říká fazety, a které se již dají jednoznačně identifikovat. S překrytím fazet o alespoň 30 % je možné spojitě sledovat celou plochu objektu. Na dalších snímcích hledá software stejně vypadající fazetu, na základě, které určí posun materiálu. Princip v teoretickém pojetí ukazuje obrázek 25 a na skutečném patternu potom obrázek 27.

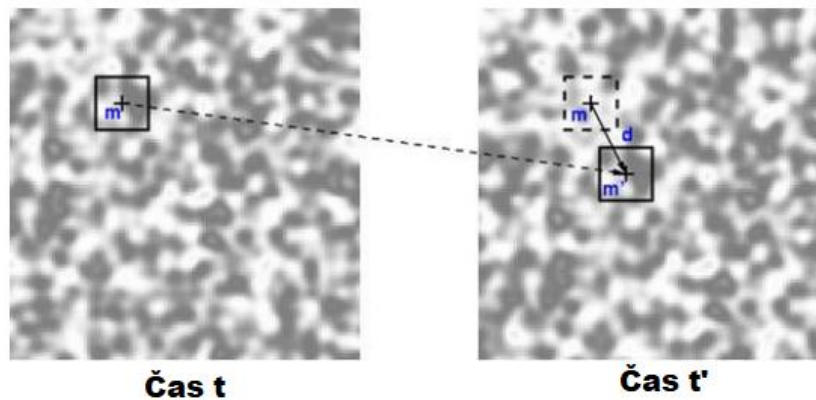


Obrázek 25 - Teoretický princip korelace (nahore „snímek kamery“, dole stupeň šedi, vlevo před pohybem, vpravo po pohybu) [12]

Hodnoty stupně šedi, které jsou přiřazeny jednotlivým pixelům se během záznamu mohou nepatrně měnit z důvodu proměnlivého světla nebo změny barvy patternu během deformace. Kvůli těmto změnám není korelace stoprocentní, ale je nacházena nejlepší shoda. Matematicky lze popsat korelaci funkcí Sum of Squared Differences pro hodnoty pixelů, kde menší výsledek udává větší shodu. [12]



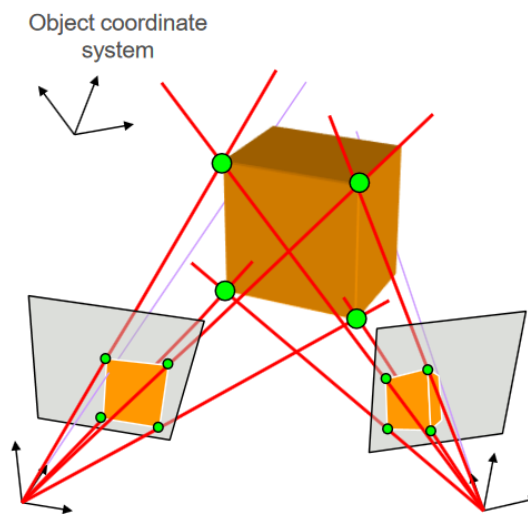
Obrázek 26 - Korelační funkce [12]



Obrázek 27 - Princip 2D korelace na skutečném patternu [12]

### 3.5.3. Trojrozměrná korelace

S použitím dvou kamer lze díky perspektivě určovat i hloubku. Pro správnou funkci je nutné, aby kamery mířily na stejné místo a byly zkalibrovány do stejného souřadného systému. To se provádí nasnímáním kalibračního objektu s přesně danými referenčními body, který nesmí být během snímání deformován. Po seřízení a kalibraci probíhá samotné vyhodnocení stejně jako u 2D, ovšem s jednou souřadnicí navíc. [12]



Obrázek 28 - Princip 3D korelace [12]



## 4. Návrh a příprava experimentu

Experimentální část této práce se zabývá vlivem rychlosti deformace na polohu křivky FLC. Postup stanovení této křivky je popsán normou ČSN EN ISO 12 004-2 [11], kterou se, až na jednu výjimku, budeme řídit i během našeho experimentu. Zmíněnou výjimkou je rychlost tažení, kterou budeme měnit, abychom dosáhli různých rychlostí deformace.

### 4.1. Návrh zkušebních vzorků

#### 4.1.1. Materiál DC05+ ZE50/50 BPO

V původním návrhu pro realizaci práce byla uvažována materiálová jakost DX56, která je dle VDA 239-100 [39] označována jako CR4. Avšak dle této normy má stejné označení i materiálová jakost DC05, která byla pro experiment použita. Situace byla výrazně ovlivněna odstávkami a dobou dodání materiálu, to byl sekundární důvod použití materiálové jakosti DC05

Materiál pro experimentální část byl dodán firmou Škoda Auto a.s. ve formě obdélníků o rozměrech 1275x375 mm a tloušťce 0,7 mm. Jakost dodaného materiálu byla DC05+ ZE50/50 BPO dle DIN EN 10152 (VW 50065), kde

DC	-	materiál pro tažení válcovaný za studena
05	-	třída jakosti, zde 5 – kvalita superhlubokého tažení
ZE	-	elektrolyticky zinkováno
50/50	-	tloušťka povlaku, zde $50 \text{ g/m}^2$ na každé straně
BPO	-	povrch fosfátovaný a olejovaný

Jde tedy o materiál určený k hlubokému tažení pro výrobu tvarově složitých pohledových dílů karoserie.

Složení této oceli udává tabulka 1.

Tabulka 1 - Chemické složení oceli DC05 [39]

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Al [%]	Ti [%]
≤ 0,06	≤ 0,50	≤ 0,40	≤ 0,025	≤ 0,025	≥ 0,010	≤ 0,30

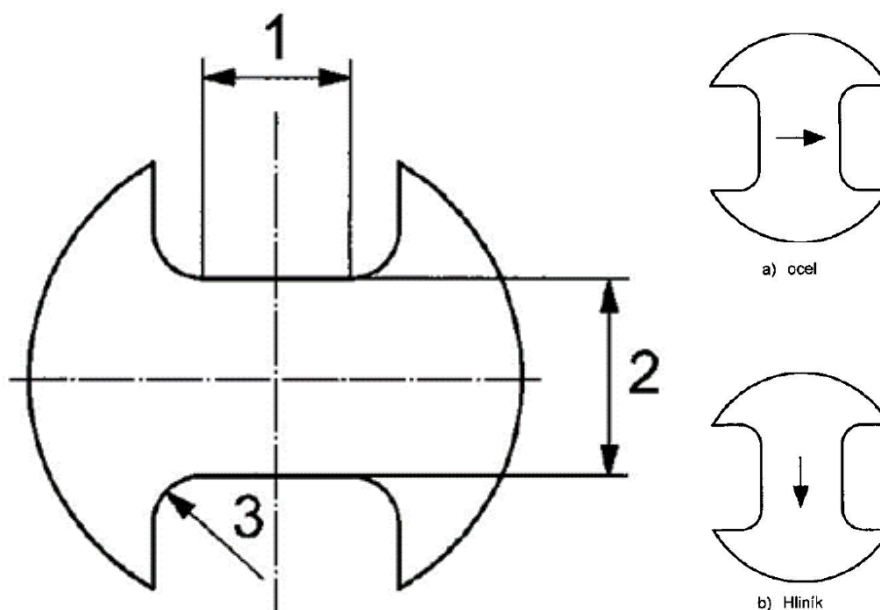
Mechanické vlastnosti dle dodaného protokolu udává tabulka 2.

Tabulka 2 - Tabulka mechanických vlastností oceli DC05

$R_e$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	A [%]	$n$ [-]	$r$ [-]
140 ÷ 200	270 ÷ 330	46,14	0,216	2,37

#### 4.1.2. Geometrie zkušební vzorku

Norma ČSN EN ISO 12 004-2 [11] předepisuje tvar zkušební tělesa a jeho orientaci vzhledem ke směru válcování. Pro ocelové materiály vyžaduje norma orientaci dříku kolmo ke směru válcování. Obecný náčrt je uveden na obrázku 29.



Obrázek 29 - Geometrie zkušební vzorku z nevyužitého plechu s rovnoběžnou délkou dříku s vyznačenou orientací válcování [11]

Délka dříku (1) je závislá na průměru použitého tažníku, pro námi používaný tažník o průměru 100 mm by se měla pohybovat v rozmezí 25 ÷ 50 mm. Šířka dříku (2) je určena polohou geometrie v rámci FLC. Poloměr zaoblení (3) by se měl pohybovat v rozmezí 20 ÷ 30 mm. Vnější průměr není specifikován, a proto jsme ho určili podle průměru přidržovače.

Pro kompletní popis křivky FLC doporučuje norma minimálně pět vzorků, které jsou rovnoměrně rozmístěné po celé šířce. My jsme se rozhodli pro detailnější popis a měření jsme prováděli s osmi geometriemi, přičemž geometrie G8 byla plná bez dříku.

Námi použité hodnoty jednotlivých rozměrů uvádí tabulka 3.

Tabulka 3 - Rozměry geometrií pro popsání FLC a jejich značení

Geometrie	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
Délka dříku	35 mm							-
Šířka dříku	35 mm	60 mm	90 mm	105 mm	115 mm	130 mm	140 mm	200 mm
Poloměr zaoblení	20 mm							-
Vnější průměr	200 mm							

Dle normy [11] mají být vzorky vyrobeny tak, aby lom nebyl nikdy iniciován hranou zkušební vzorku. Proto byly výřezy připraveny metodou EDM, která vzorek nijak neovlivňuje. Pro snížení nákladů na výrobu jsme se od doporučení normy odchýlili tvarem vnějšího okraje vzorku, který jsme nechali čtvercový a nikoliv kruhový, jelikož to na zkoušku nemá vliv. Na obrázku 30 jsou již vyrobené vzorky, vyskládané tak, jak vytvářejí body na FLC křivce. Na obrázku chybí vzorky G8.



Obrázek 30 - Vyříznuté vzorky vyskládané do tvaru FLC

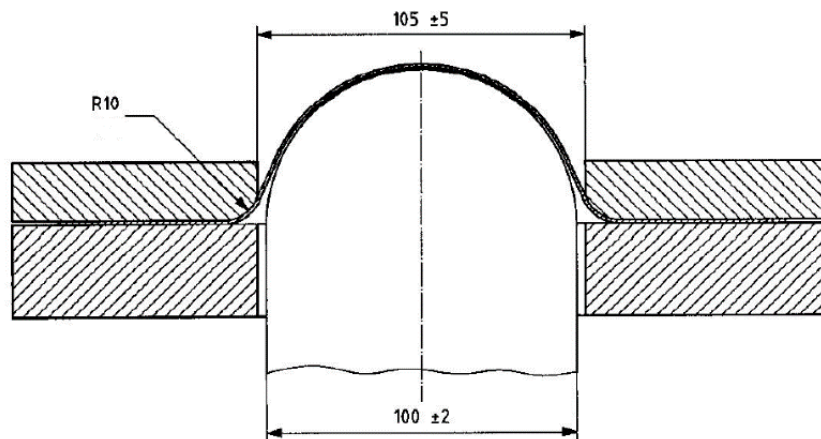
#### 4.2. Zkušební zařízení a přípravky

Měření probíhalo na zkušebním stroji BUP 600 od firmy Zwick Roell. Jedná se o zařízení pro zkoušení tvářítnosti plechů, popřípadě vlivu maziv, povlaků a dalších parametrů na průběh tažení. Maximální síla, kterou dokáže stroj vyvinout je 600 kN, a rychlost tažníku může být až 17 mm/s. Stroj je osazen přidržovačem, který dokáže vyvinout sílu 600 kN. [13]



Obrázek 31 - Zkušební zařízení Zwick Roell BUP 600

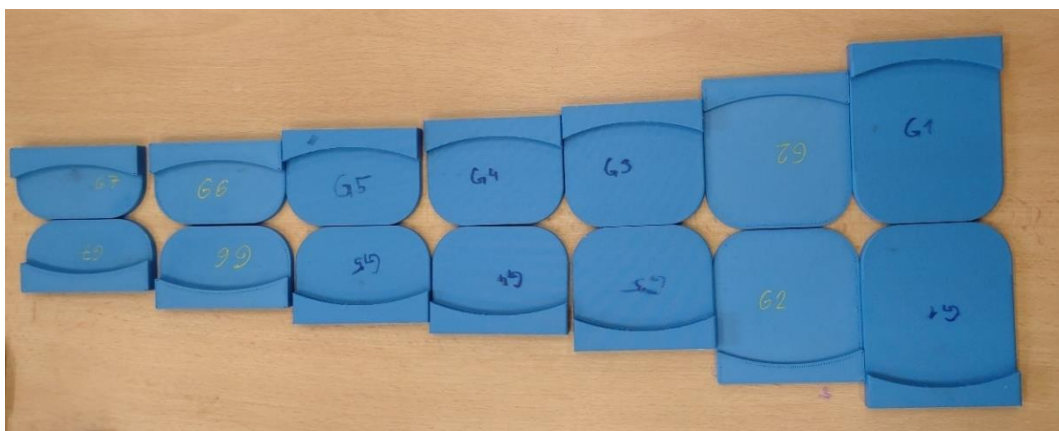
Stoj byl osazen nástrojem pro zkoušku podle Nakajimy, jehož schéma je na obrázku 31.



Obrázek 32 - Schéma nástroje pro zkoušku dle Nakajimy [11]

Norma ČSN EN ISO 12 004-2 [11] vyžaduje úpravu tribologického systému za účelem snížení tření mezi tažníkem a plechem tak, aby porušení vzniklo na vrcholu tažníku. Za tímto účelem byly na tažník nanášeny olej, plastické mazivo, teflonová páska a polyethylenová folie. Vhodnou kombinací bylo dosaženo vyhodnotitelných výsledků.

Jelikož jsme se rozhodli použít čtvercový tvar vzorků, bylo nutné nalézt způsob, jak je správně vystředit na přidržovači, protože na rozdíl od kruhových nešlo využít obvodové hrany. Za tímto účelem jsme navrhli sérii přípravků, které jsme vytiskli na 3D tiskárně. Jejich podobu ukazuje obrázek 33.



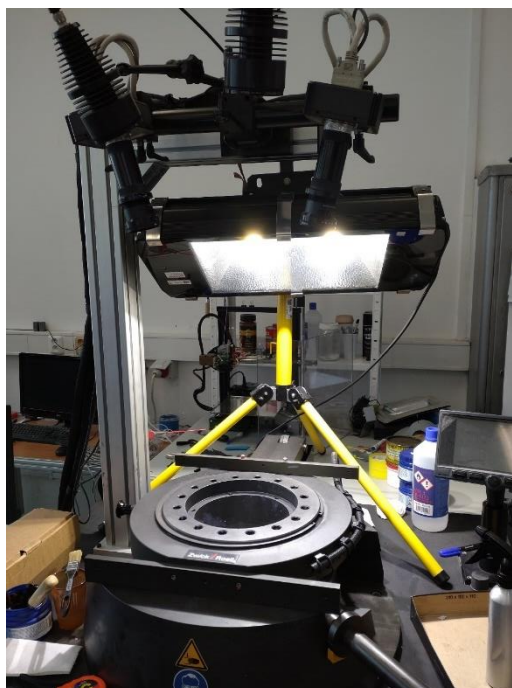
Obrázek 33 - Přípravky pro zarovnání geometrií

### 4.3. Optický systém ARAMIS

Pro vyhodnocování deformací jsme použili systém ARAMIS 4M rev03, který využívá principu DIC metody ke sledování bodů sítě. V doprovodném softwaru lze poté vyhodnotit různé typy zkoušek. V našem případě jsme systém ARAMIS využívali pro zachycení pohybu materiálu, ze kterého jsme poté v softwaru vyhodnotili hodnoty deformací. Systém se skládá z dvojice vysokorychlostních kamer a přídatného osvětlení. Upnuté zařízení je vidět na obrázku 34, kde je přítomno i velké světlo pro zkoušky vyšších rychlostí. Technické parametry systému jsou v tabulce 4.

Tabulka 4 - Technické parametry systému ARAMIS 4M rev03 [14]

Standardní měřený objem [mm x mm]	10 x 7 ÷ 3450 x 2500
Rozlišení kamery [px]	2400 x 1728
Obrazový snímač	CMOS
Maximální snímkovací frekvence [Hz]	168 (2400 x 1728 px) 336 (2400 x 864 px) 672 (2400 x 400 px) 1334 (2400 x 168 px)
Doba expozice [ms]	0,1 ÷ 2000
Rozsah měřených napětí [%]	0,02 ÷ 100
Přesnost měřeného napětí [%]	0,01



Obrázek 34 - Systém ARAMIS nad BUP 600 s přidaným osvětlením

Jelikož jsme měření prováděli v rámci několika týdnů, tak jsme před každým měřením nechali systém prohřát (dle návodu 25 min od zapnutí) a poté jsme provedli kalibraci kamer a světel.

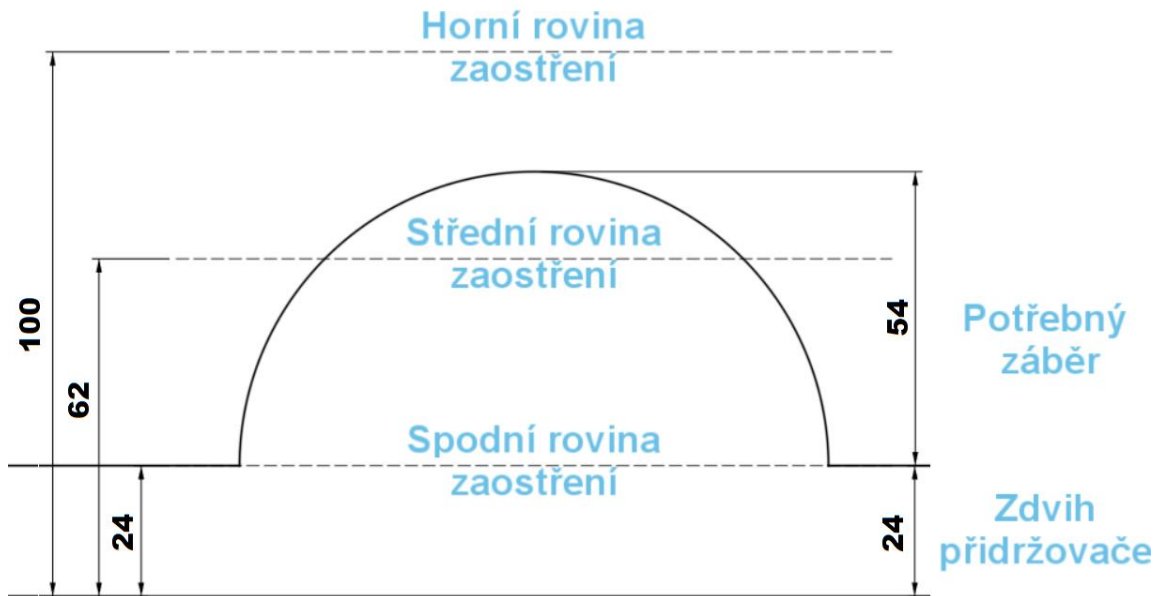
#### 4.3.1. Nastavení a kalibrace systému ARAMIS

Pro správné nastavení je třeba znát potřebný rozsah měření, aby byly kamery zaostřeny, jak na začátku, tak na konci zkoušky. Změřením výšky testovacího výtahu jsme zhruba získali potřebný rozsah. Protože neexistuje možnost, kdy by se vzorek vtáhl směrem dolů, tak jsme spodní rovinu zaostření položili do roviny přidržovače. V tabulce 5, která je součástí návodu, jsme podle měřeného objemu vyhledali hloubku ostroty tak, aby její dvojnásobek byl větší, než naměřený rozsah. Podle této hodnoty se určují další proměnné, které jsou pro nastavení a kalibraci potřeba. V tabulce 5 je vyznačena v průsečíku obdélníků.

Tabulka 5 - Parametry pro zaostřování kamer

2.6 100 mm Lens (ARAMIS 4M)																				
Sensor	Lens	Measuring volume [mmxmm]	Comment	Min. length camera support [mm]	Distance ring [mm]	Measuring distance [mm]	Slider distance [mm]	Camera angle [°]	Calibration Object	Aperture dependent depth of field [mm]										
										1,4	2	2,8	4	5,6	8	11	16	22	32	
ARAMIS 4M rev03	Titanar 100mm	10 x 7	1	500	137,5	410	152	25	CQ 10x8	—	—	—	—	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,5	1,2	
		15 x 11	—	500	87,5	405	150	25	CQ 15x12	—	—	—	—	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,4	2,2	5,2
		20 x 15	—	500	62,5	415	154	25	CQ 15x12	—	—	—	—	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0,9	3,1	6,7
		25 x 18	—	500	50	435	164	25	CQ 23x18	—	—	—	—	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	1,9	4,8	9,6
		35 x 26	—	500	37,5	475	182	25	CQ/CP20 30x24	—	—	—	—	n.a.	n.a.	0,5	4,2	8,6	16	
		50 x 37	—	500	25	590	232	25	CQ/CP20 30x24	—	—	—	—	n.a.	1	5,7	14	23	39	
		65 x 48	—	500	12,5	685	274	25	CQ/CP20 55x44	—	—	—	—	n.a.	4,7	12	24	38	63	
		80 x 60	—	500	12,5	785	318	25	CQ/CP20 55x44	—	—	—	—	1,7	10	21	38	60	>80	
		100 x 75	—	500	12,5	920	378	25	CP20 90x72	—	—	—	—	1,2	20	30	62	94	>100	
		125 x 90	—	800	—	1090	454	25	CP20 90x72	—	—	—	—	17	36	60	100	>125	>125	
		150 x 110	—	800	—	1265	532	25	CP20 90x72	—	—	—	—	30	57	91	150	>150	>150	
		175 x 130	—	800	—	1440	610	25	CP20 175x140	—	—	—	—	46	83	130	>175	>175	>175	
		200 x 150	—	800	—	1620	688	25	CP20 175x140	—	—	—	—	66	110	170	>200	>200	>200	
		250 x 180	—	800	—	1990	688	20	CP20 250x200	—	—	—	—	130	200	>250	>250	>250	>250	
		300 x 220	2)	1200 fixed	—	2290	—	29	CP20 250x200	—	—	—	—	160	270	>300	>300	>300	>300	
350 x 260	2)	1200 fixed	—	2670	—	25	CP20 350x280	—	—	—	—	250	>350	>350	>350	>350	>350			
400 x 290	2)	1200 fixed	—	3050	—	22	CP20 350x280	—	—	—	—	350	>400	>400	>400	>400	>400			
500 x 370	2)	1600 fixed	—	3740	—	24	CP20 350x280	—	—	—	—	>500	>500	>500	>500	>500	>500			

Střední rovina zaostření byla zvolena ve výšce 38 mm nad rovinou přidržovače a horní rovina poté ve výšce 76 mm. Jelikož kalibrace probíhá v otevřené pozici, bylo k jednotlivým výškám zapotřebí připočítat zdvih přidržovače. Schéma hodnot je vidět na obrázku 35.



Obrázek 35 - Hodnoty pro zaostření kamer

Dalším krokem nastavení bylo seřízení správné pozice kamer a osvětlení. Kalibrační destičku GOM CP20 MV55x44 jsme umístili na střed nástroje tak, aby její funkční plocha byla ve výšce střední roviny zaostření. K tomu jsme využili válečky správné délky, které jsme si opět vytiskli na 3D tiskárně.

Podle údajů v červeném obdélníku v tabulce 5 jsme nejprve zvednutím držáku nastavili výšku kamer nad kalibrační destičkou na  $785\text{ mm}$  (nutno měřit např. pásovým měřítkem, nebo měrkou správné délky). Poté jsme kamery posunuli po příčnicku do vzdálenosti  $318\text{ mm}$  podle měrek na samotném příčnicku.

Poslední část ustavení kamer spočívá v jejich natočení okolo dvou os. Kamery jsme natočili tak, aby mířily přibližně na střed kalibrační destičky, ale hlavně do stejného bodu. Nejprve jsme kamery natočili okolo osy příčnicku, protože zde je nutné zachovat vzdálenost z předešlého kroku. Natočením v druhém směru jsme poté namířili kamery na stejné místo. Následně jsme nastavili světla, aby osvětlovali plochu v okolí bodu, do kterého míří kamery.

Dalším krokem bylo nastavení zaostření, ideálně při maximálně otevřené cloně. Po položení kontrastního vzoru, např. bílého papíru s textem, na kalibrační destičku jsme otáčeli objektivy kamer, dokud se oba obrazy nejevily dostatečně zaostřené. Pro kontrolu lze přepnout zobrazení v počítači na přeexponované, kde se snažíme, o co největší přeexponování.

Následující krok je volitelný, ale výrobce ho doporučuje provést. Pomocí polarizačních filtrů na světlech a kamerách jsme odstranili odlesky a další světelné znečištění. Proceduru je nutné provést přesně dle návodu, a proto ji zde uvedu přímo formou postupu.

**Krok 1:** Polarizační filtr na LEVÉ kameře se nemění.

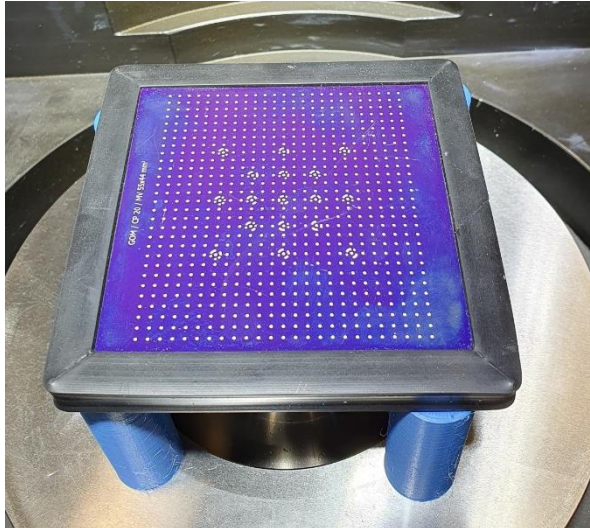
**Krok 2:** Zakrýt PRAVÉ světlo a nastavit polarizační filtr LEVÉHO světla tak, aby na záznamu z LEVÉ kamery poklesla intenzita blýskavých bodů na minimum.

**Krok 3:** Odkrýt PRAVÉ světlo a nastavit jeho polarizační filtr tak, aby na záznamu z LEVÉ kamery poklesla intenzita blýskavých bodů na minimum.

**Krok 4:** Nastavit polarizační filtr PRAVÉ kamery tak, aby na záznamu z PRAVÉ kamery poklesla intenzita blýskavých bodů na minimum.

Posledním krokem nastavení bylo seřízení clony na hodnotu  $16\text{ mm}$ , kterou jsme opět vyčetli z tabulky 5, tentokrát z modrého obdélníku. Správné nastavení lze zkontrolovat přepnutím do režimu falešných barev, kde bychom měli vidět dva stejné obrazy s dostatečně velkým podílem bílé barvy v oblasti kam míří kamery. [14]

Samotnou kalibraci jsme poté prováděli podle pokynů softwaru natáčením kalibrační destičky GOM CP20 MV55x44. Destičku je nutné fotit ve všech třech rovinách zaostření, kolmo ke každé z kamer a pod úhlem  $40^\circ$  v několika natočeních, vše dle instrukcí kalibračního softwaru. Za tímto účelem jsme si předem spočítali výšky podkladních válečků, které jsme si opět vytiskli na 3D tiskárně.



Obrázek 36 - Kalibrační destička GOM CP20 MV55x44 na distančních válečkách

#### 4.4. Příprava patternu

Další oblastí, kterou jsme museli vyřešit je příprava patternu podle požadavků z kapitoly 3.5.1. Pattern nesmí udělat ve vzorku vruby nebo změnit jeho mikrostrukturu, protože by mohlo dojít k ovlivnění zkoušky. Po uvážení všech dostupných možností a požadavků jsme se rozhodli použít dvoubarevný nástřík barvou.

##### 4.4.1. Předúprava povrchu

Před nanášením barvy bylo nutné vzorky očistit od usazenin z EDM a odmastit od ochranného oleje. Nejprve jsme pomocí jarové vody odstranili hrubé nečistoty. Po oplachu jsme vzorek nechali odmáčet v, dle návodu ředěném, roztoku průmyslové čističe/odmašťovače CL Cleaner. Po dalším oplachu jsme provedli finální odmaštění pomocí technického lihu. Odmaštění lihem se později ukázalo jako nedostatečné, protože se při větších rychlostech zkoušky nástřík loupal. Po poradě s odborníky jsme líh změnili na čistý izopropylalkohol. Po této změně, již nástřík držel bez problémů.



Obrázek 37 - Mycí stanoviště s použitými přípravky



#### 4.4.2. Výběr typu barvy

Souběžně s testováním předúpravy jsme vybírali vhodnou kombinaci bílé podkladové barvy a kontrastní černé barvy. Barvy, které jsme testovali, uvádí tabulka 6.

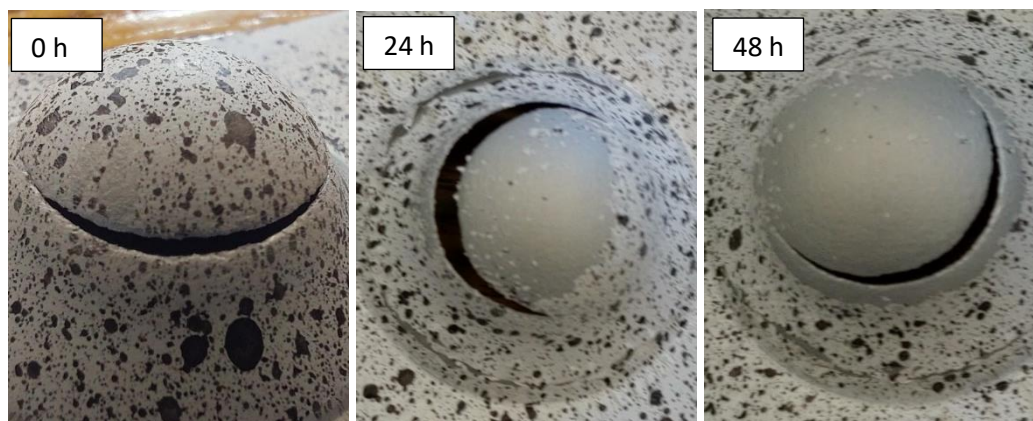
Tabulka 6 - Testované barvy

	Název	Popis
Podkladová bílá barva	Belton PU Wasserlack RAL 9010	PU barva na vodní bázi
	Motip Matt White RAL 9010	Akrylová barva
	Belton Universal Primer White	Univerzální základová barva
Patternová černá barva	Motip Matt Black RAL 9005	Akrylová barva
	Montana GRANIT	Barva na vodní bázi se speciálními efektem s jemnými plastovými částicemi
	Belton Special – GRANITE EFFECT	Barva tvořící „žulový“ efekt

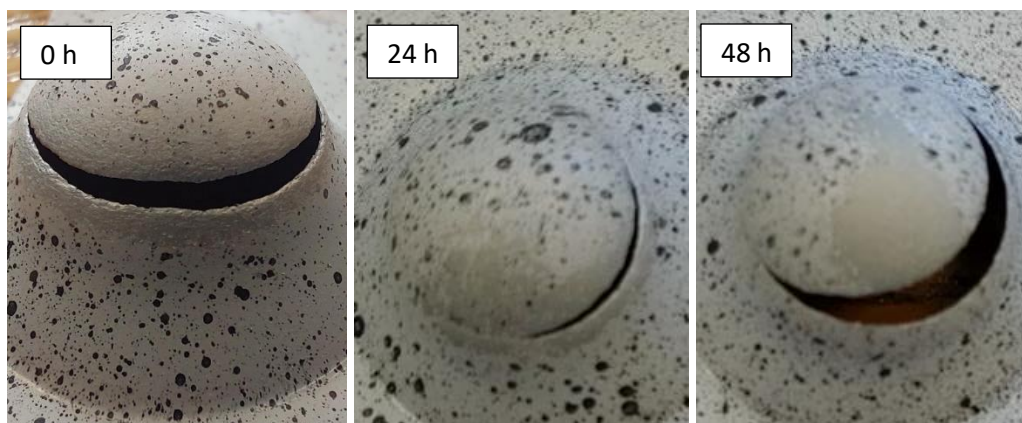
Pro testování jsme si připravili čtyři pásy plechu, ze kterých jsme tři odmastili způsobem uvedeným v části 4.4.1, zatímco čtvrtý jsme nechali neodmaštěný, kvůli kontrole, že je odmašťování skutečně třeba. Na každý z odmaštěných vzorků jsme poté nanесли jednu podkladovou barvu a na neodmaštěný vzorek jsme nanесли Motip Matt White RAL 9010.

Po zaschnutí jsme provedli nástřik patternu, abychom v systému ARAMIS mohli vyhodnotit jeho kvalitu. Barvou Belton Special – GRANITE EFFECT se nám nepodařilo dosáhnout potřebné kvality, a proto jsme ji vyřadili z testu. Barvou Motip Matt Black RAL 9005 se nám podařilo vytvořit dostatečný pattern, ale nástřik musel být prováděn škracením trysky, což se ukázalo být náročné dělat opakovaně a bylo zde riziko velkých kapek. Barva Montana GRANIT šla nanášet krátkými stříky ze vzdálenosti asi 200–300 mm a produkovala ostře kontrastní pattern.

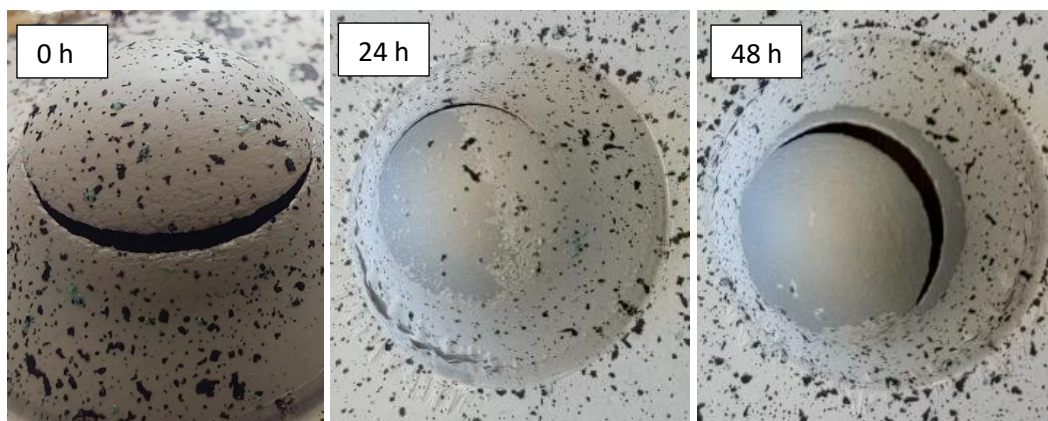
Po ověření, že jsme schopni udělat kvalitní kontrastní pattern, jsme přistoupili ke zkoušce přilnavosti nástřiku. Test probíhal na zařízení pro zkoušku hloubením dle Erichsena, protože výsledný tvar velice připomíná tvar po zkoušce dle Nakajimy, ovšem s menší spotřebou materiálu. Zajímalo nás, jak se bude nástřik chovat v okolí trhliny a zda se nebude odlupovat. Pro každý typ nástřiku jsme provedli zkoušku hned po uschnutí nástřiku, po 24 hodinách a po 48 hodin, jelikož nás zajímalo, zda bude možné připravit vzorky najednou, nebo se vytvrzením stane barva křehkou. Výsledky jsou vidět na obrázcích 38-40.



Obrázek 38 – Belton PU Wasserlack RAL 9010 + Motip Matt Black RAL 9005 (zleva: po uschnutí nástřiku; po 24 h; po 48 h)



Obrázek 39 - Motip Matt White RAL 9010 + Motip Matt Black RAL 9005 (zleva: po uschnutí nástřihu; po 24 h; po 48 h)



Obrázek 40 - Belton Universal Primer +Montana GRANIT (zleva: po uschnutí nástřihu; po 24 h; po 48 h)

Na základě této zkoušky jsme vyhodnotili, že nejlepší bude použít barvu Belton Universal Primer, která jako jediná nejevila známky odlupování v čase hned po nástřihu. Jelikož jsme nenašli žádnou podkladovou barvu, která by se s odstupem 24 h, respektive 48 neloupala, tak jsme nástřik prováděli bezprostředně před zkouškou.

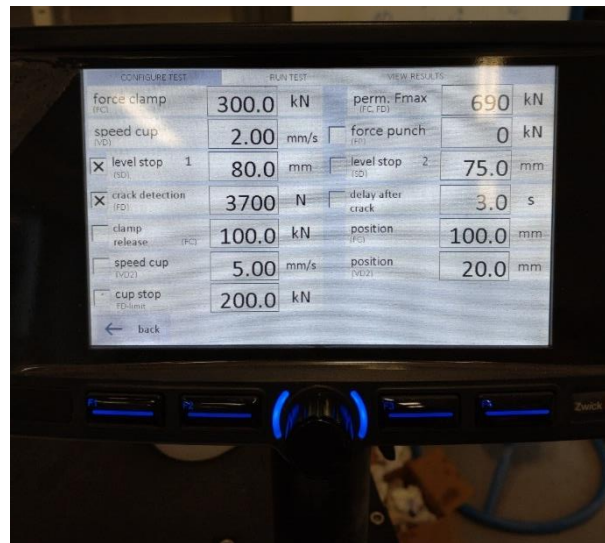
#### 4.5. Parametry zkoušky

Jak již bylo řečeno v úvodu kapitoly 4, tento experiment se bude řídit parametry normy ČSN EN ISO 12 004-2 [11] s výjimkou rychlosti tažníku. Ta bude postupně zvyšována z rychlosti 2 mm/s, kterou udává norma a kterou použijeme jako referenční, až po rychlost 17 mm/s, což je nejvyšší rychlost zkušebního stroje BUP 600. Zbývající dvě rychlosti byly zvoleny v horní části intervalu, protože to lépe odpovídá motivaci této práce. Tabulka 7 udává tyto parametry.

Tabulka 7 - Vstupní parametry zkoušky

Rychlost tažníku [mm/s]	2; 10; 14; 17
Zkušební teplota [°C]	23±5
Vtahování materiálu	Nesmí nastat
Síla přidržovače [kN]	300
Kritérium ukončení zkoušky	Pokles síly vlivem porušení, nebo zdvih 80 mm
Detekce trhliny	Pokles síly
Snímkovací frekvence systému ARAMIS [Hz]	7; 20; 25; 30

Aby zkouška byla platná vyžaduje norma ČSN EN ISO 12 004-2 [11] minimálně tři platně změřené vzorky. My jsme se rozhodli měřit pět vzorků, primárně z důvodu přesnějšího popisu FLC, ale také jako ochranu proti neplatným měřením. Pro každou ze čtyř rychlostí jsme tedy naměřili osm geometrií po pěti vzorkách, celkově tedy 160 vzorků.

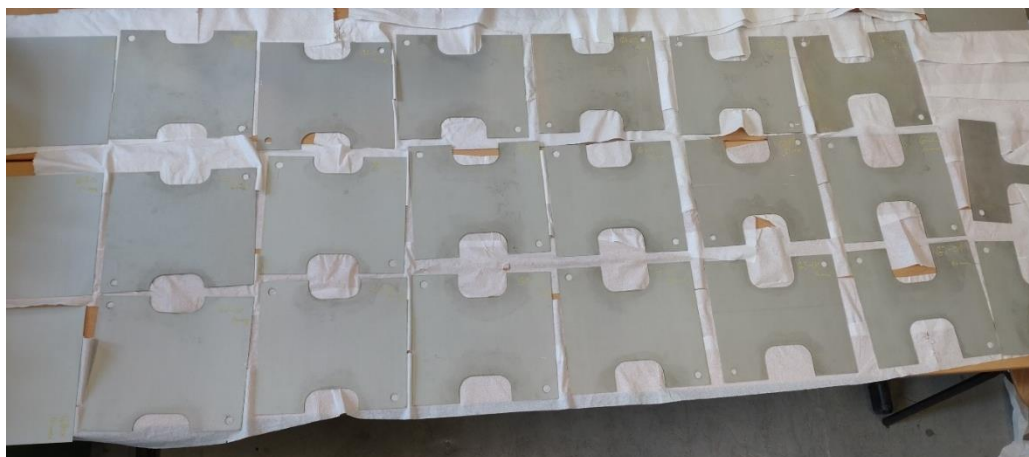


Obrázek 41 - Ovládací panel stroje s nastavenými podmínkami zkoušky

## 5. Měření a vyhodnocení

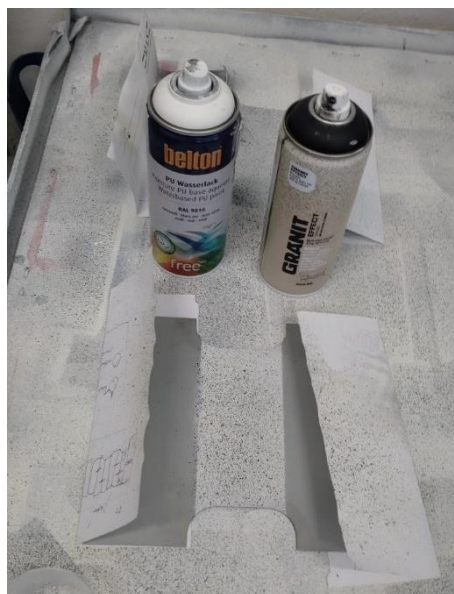
### 5.1. Postup měření

Na začátku každého měřicího dne jsme nejprve zkalibrovali systém ARAMIS, abychom měli zajištěnou dostatečnou přesnost měření. Kalibrační protokol je v Příloze 1. Následně jsme si umyli a nahrubo odmastili dostatečný počet vzorků, aby bylo možné naměřit celou křivku pro danou rychlost.



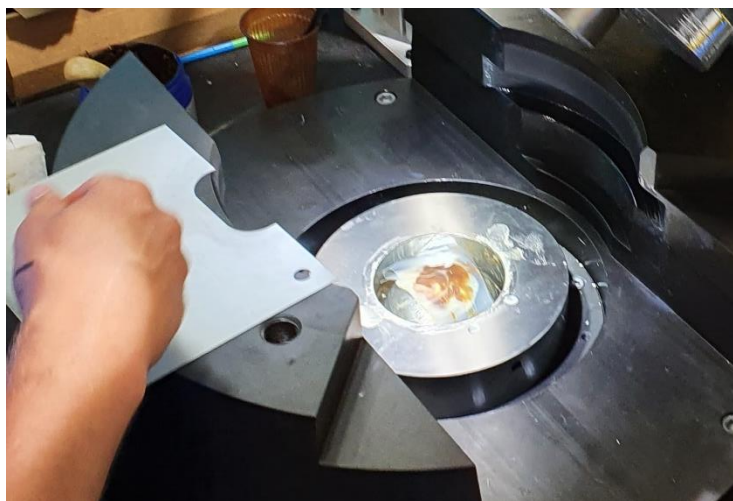
Obrázek 42 - Umyté a nahrubo odmaštěné vzorky

Z takto připravených vzorků jsme poté odebírali najednou pouze jeden až dva kusy, které jsme finálně odmastili izopropylalkoholem. Na takto upravené vzorky jsme postupem uvedeným v části 4.4.2 nanесли zvolené barvy Belton Universal Primer White a Montana GRANIT.



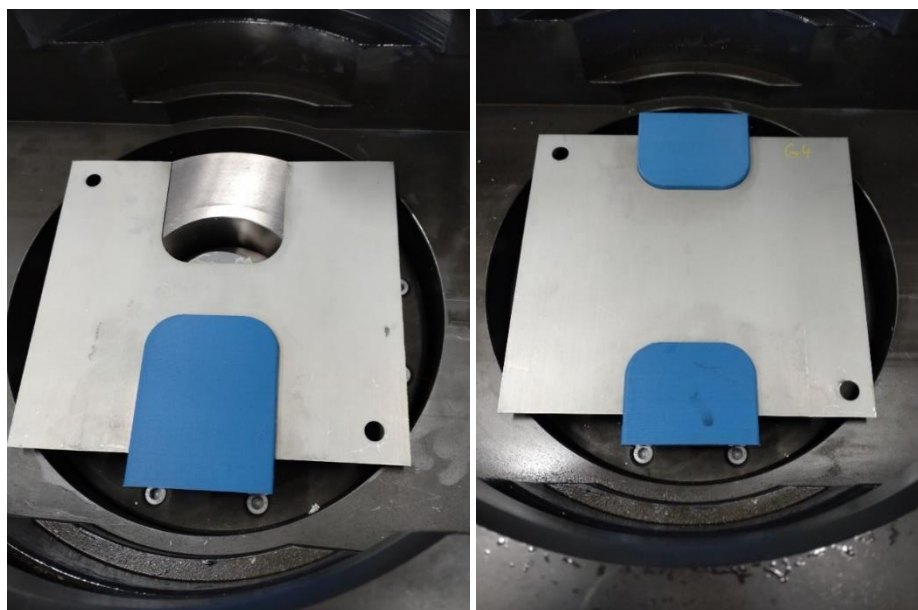
Obrázek 43 - Nástřikové stanoviště s připraveným vzorkem

Během zasychání barvy jsme na tažník ve stroji nanесли tribologický systém. Osvědčil se nám následující postup. Nejprve jsme tažník potřeli olejem, poté pokladli teflonovou páskou a tu znovu nasáklí olejem. Na tyto pásky jsme vložili polyethylenovou folii, která byla ze spodní strany pokryta olejem. Na ní jsme umístili dalších několik folií, které byly na spodní straně pokryty plastickým mazivem, s výjimkou té poslední, která byla pokryta z obou stran.



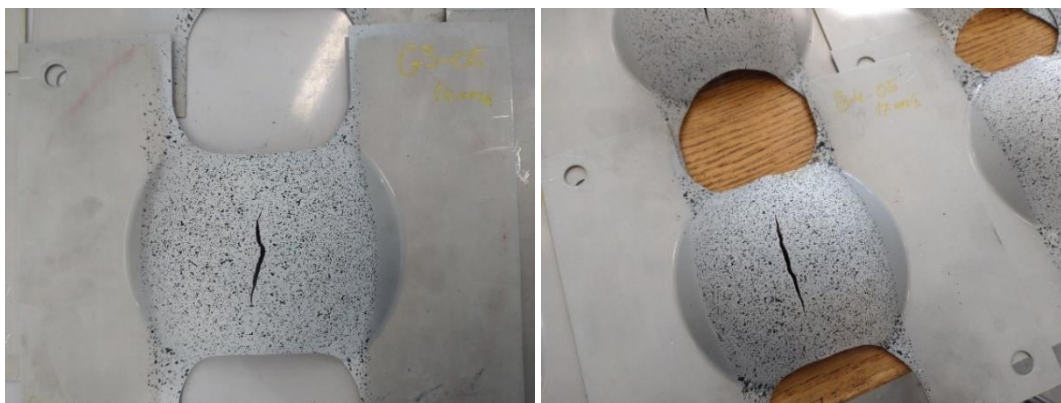
Obrázek 44 - Nanášení tribologického systému

Jakmile zaschla barva na vzorku (ve chvíli, kdy nebyla vidět žádná vlhkost a pattern se po doteku nerozmazával) jsme vložili vzorek do pracovního prostoru stroje. K jeho zarovnání na střed tažníku jsme použili zarovnávací přípravky z části 4.2. Nejprve byl jeden přípravek dotlačen osazením na kruhový přídržovač, poté byl vložen vzorek (barvou nahoru) a následně byl druhý přípravek dotlačen na přídržovač. Tím došlo k vystředění dříku nad tažníkem. Natočení není nutné korigovat, protože je vše kruhové a symetrické, ale pro konzistenci jsme zvolili směr dříku zleva doprava.



Obrázek 45 - Zarovnání vzorku pomocí přípravků (vzorky bez patternu)

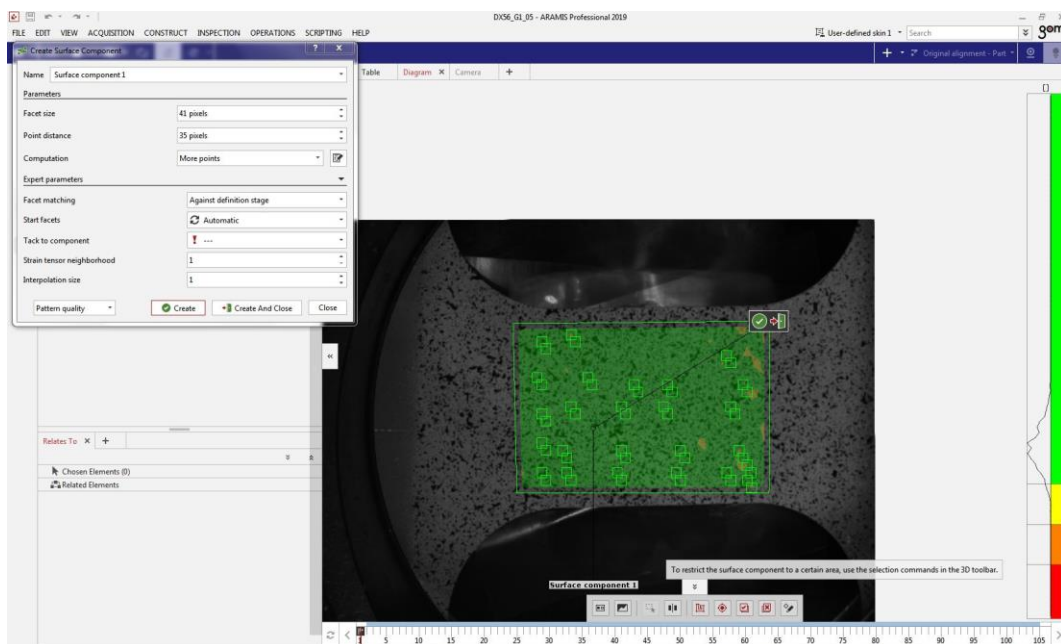
Poslední částí měřicího cyklu bylo zavření stroje a aktivace přídržovače, což jsme na zkušební stroji BUP 600 provedli stiskem několika tlačítek, vše (až na uzavření pojistky) probíhá automaticky. Po dostatečném natlakování přídržovače jsme spustili záznam kamer a o okamžik později i samotnou zkoušku. Zkouška probíhala do poklesu síly vlivem vzniku trhliny, kdy stroj automaticky zasunul tažník a uvolnil přídržovač. Kamerový záznam se ukončuje manuálně na obslužném počítači, co nejdříve po konci zkoušky. Následovalo uložení záznamu, otevření stroje, odebrání a popis vzorku, a nakonec i vyčištění pracovního prostoru od zbytků maziva.



Obrázek 46 - Změřené a označené vzorky s trhlinou dle normy

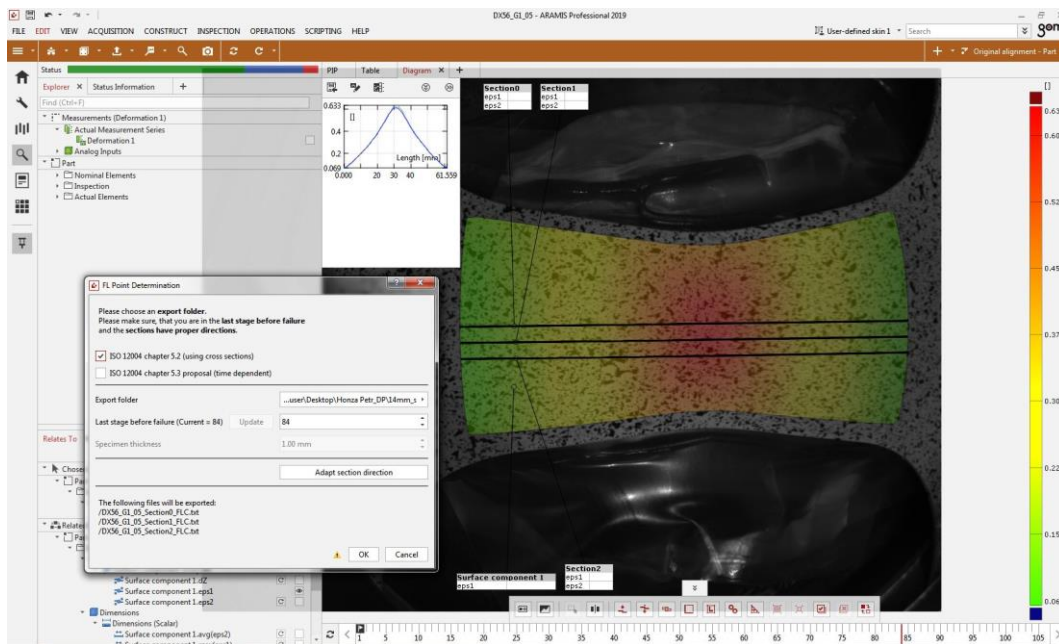
## 5.2. Zpracování měření

Zpracování záznamu probíhalo v doprovodném softwaru systému ARAMIS. Po načtení záznamu bylo nejdříve nutné zkontrolovat kvalitu patternu a omezit plochu, která má být vyhodnocována. Zároveň se v tomto kroku nastavuje velikost fazet, stupeň interpolace a další parametry DIC metody.



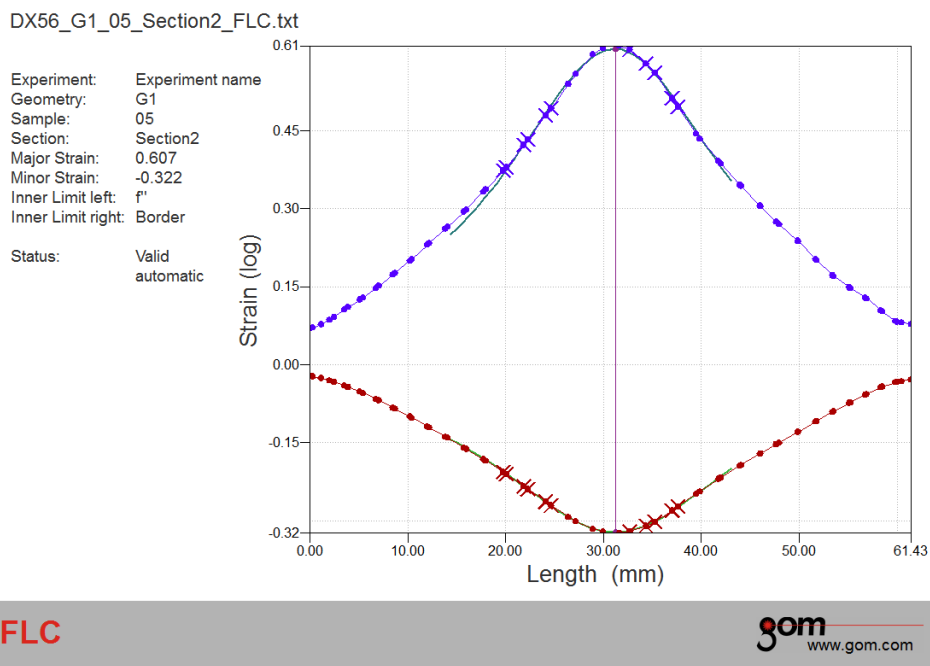
Obrázek 47 - Hodnocení kvality patternu a nastavení DIC metody

Po tomto nastavení stačilo spustit přednastavený skript pro výpočet deformací pomocí metody řezu. Samotné vyhodnocení má probíhat těsně před vznikem lokálního ztenčení. V softwaru jsme tedy našli snímek, na kterém viditelně vzniká trhlina a podle doporučení firmy GOM jsme vyhodnocovali o 3 až 5 snímků dříve.



Obrázek 48 - Vyhodnocení metodou řezu

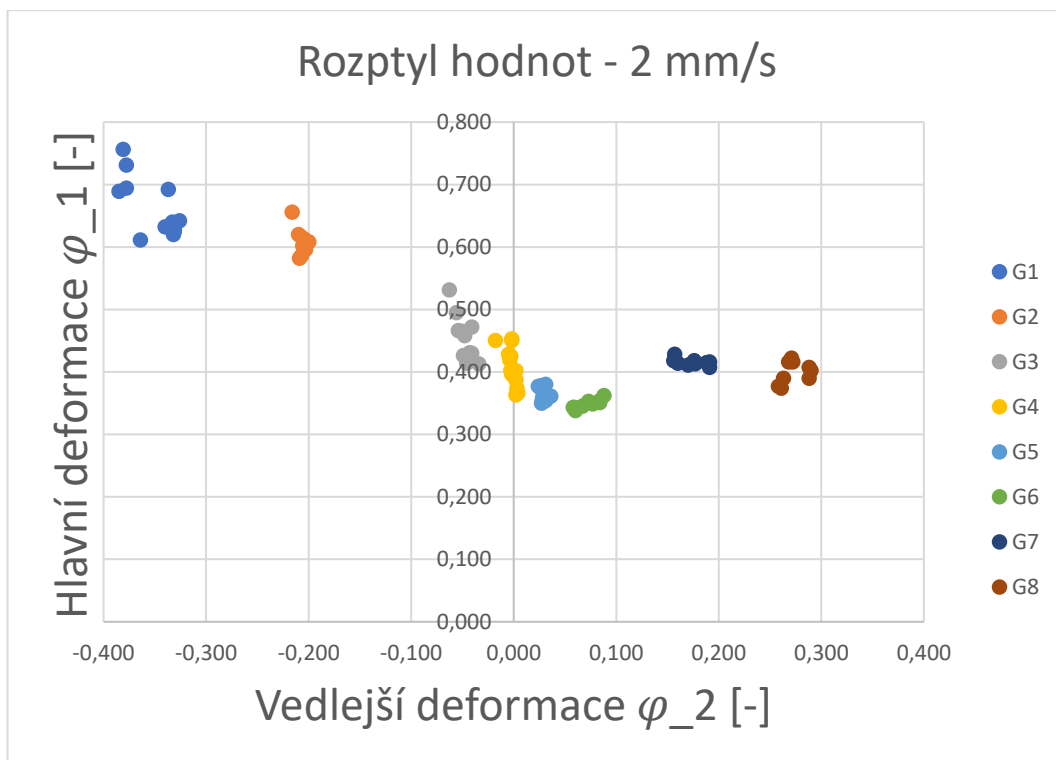
Každý vzorek se vyhodnocuje ve třech řezech, kterým odpovídají tři čáry na obrázku 47, a ze kterých jsou vytvořeny tři samostatné protokoly. V přidruženém softwaru lze tyto protokoly propojit a nechat si ze všech naměřených bodů vykreslit celou FLC křivku.



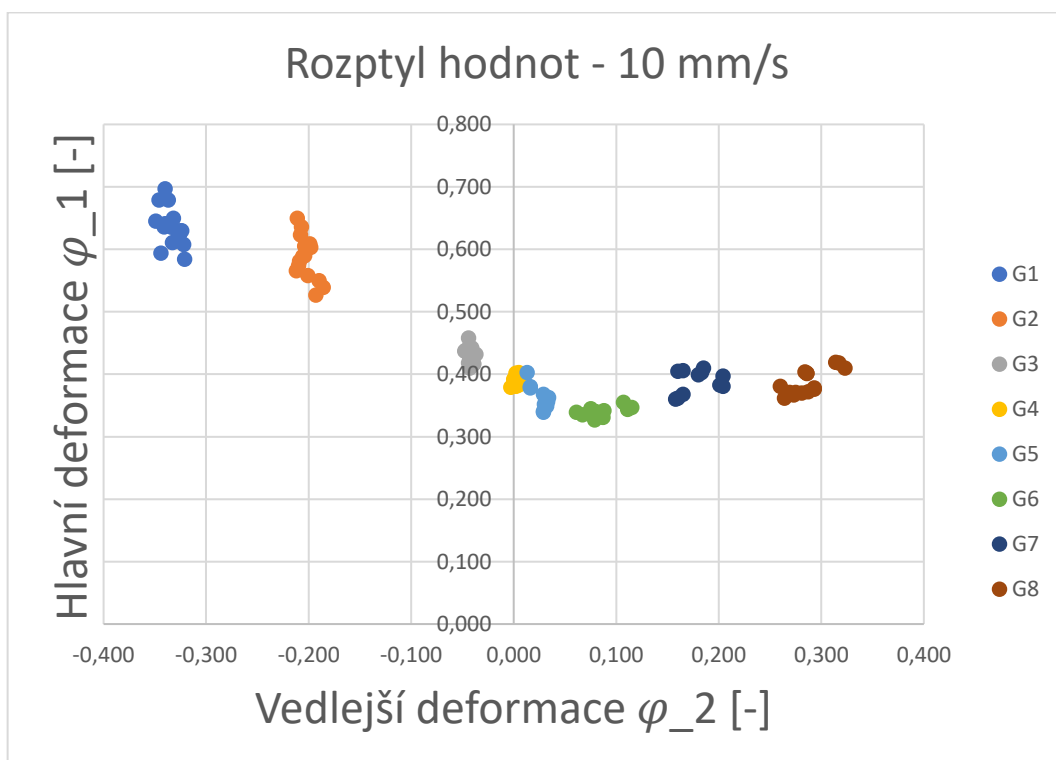
Obrázek 49 - Ukázkový protokol z měření

### 5.3. Výsledky měření

Naměřená data byla poté extrahována z protokolů a statisticky zpracována v programu MS Excel. Data jsme poté zanesli do grafu, abychom viděli rozptyl jednotlivých hodnot. Grafy pro jednotlivé rychlosti jsou na obrázcích 50 až 53.

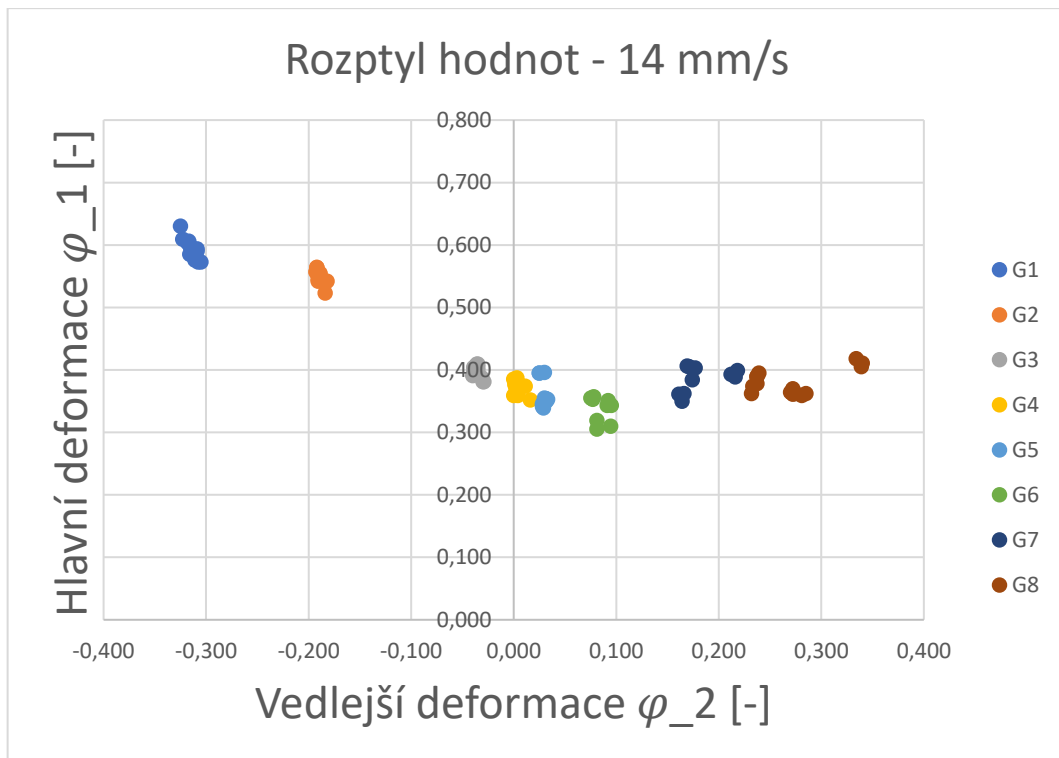


Obrázek 50 - Graf rozptylu naměřených hodnot pro rychlost 2 mm/s

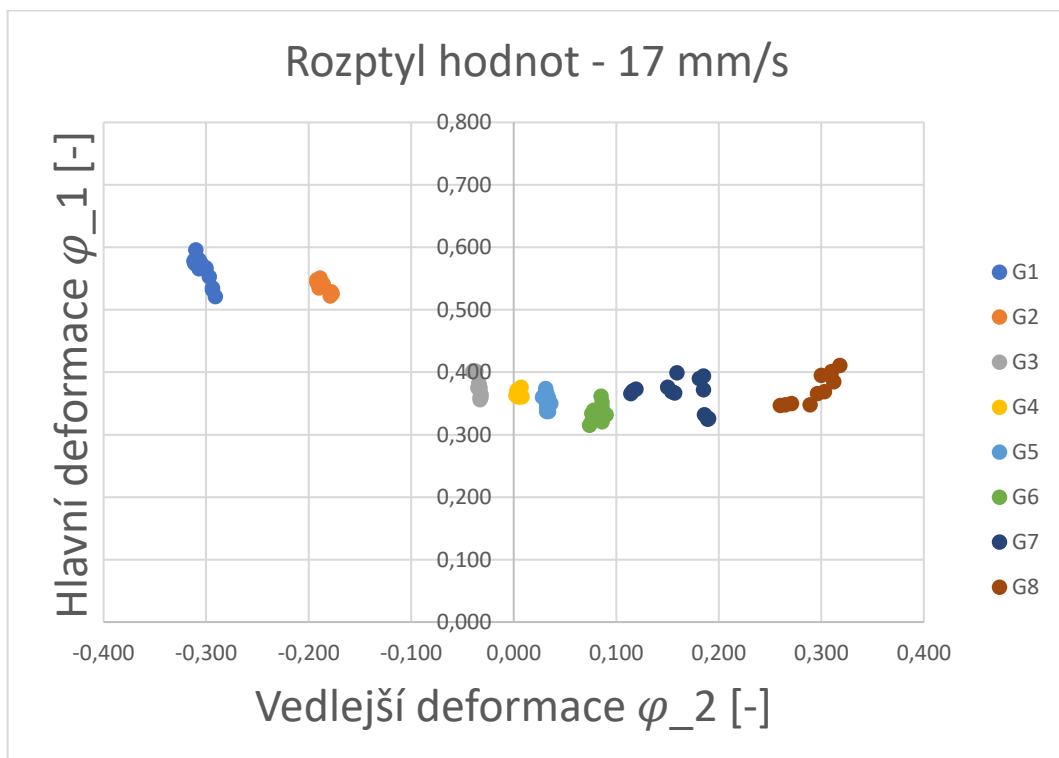


Obrázek 51 - Graf rozptylu naměřených hodnot pro rychlost 10 mm/s





Obrázek 52 - Graf rozptylu naměřených hodnot pro rychlost 14 mm/s

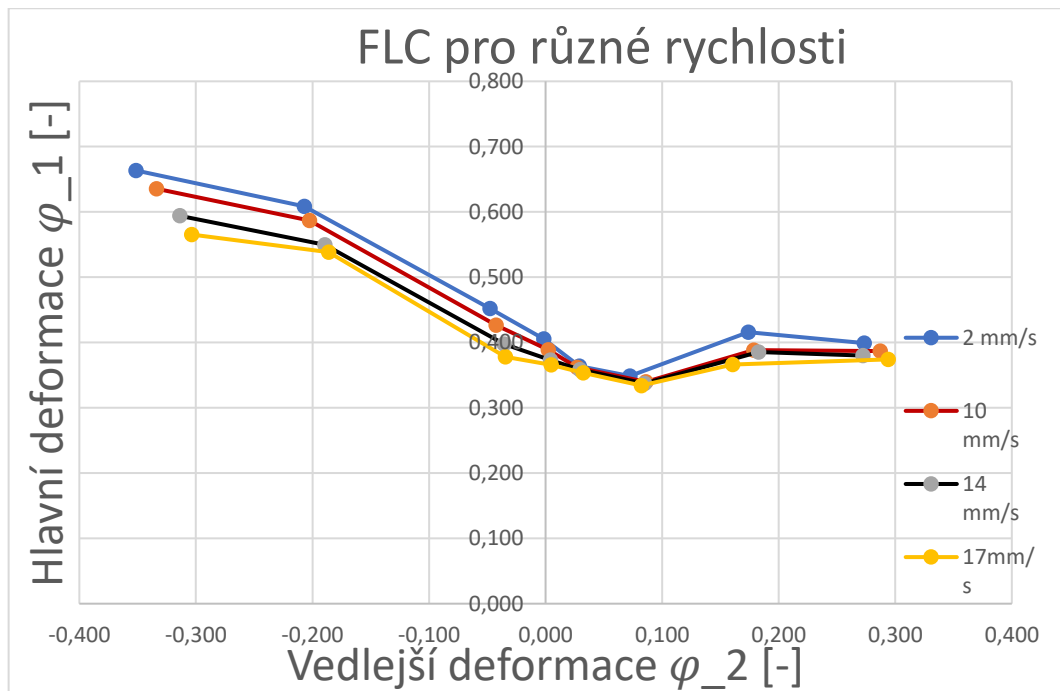


Obrázek 53 - Graf rozptylu naměřených hodnot pro rychlost 17 mm/s

Následně jsme naměřená data zprůměrovali, abychom dostali jediný bod pro každou geometrii vzorku a pro příslušnou rychlost pohybu nástroje. Určené průměry jsou uvedeny v tabulce 8. Z těchto bodů jsme sestavili FLC křivky, které jsou v grafu na obrázku 54 a v Příloze 2 ve větším měřítku.

Tabulka 8 - Průměrné hodnoty pro jednotlivé geometrie a rychlosti

PRŮMĚRY	Hlavní deformace $\varphi_1$ [-]				Vedlejší deformace $\varphi_2$ [-]			
rychlost [mm/s]	2	10	14	17	2	10	14	17
G1	0,663	0,635	0,594	0,565	-0,351	-0,334	-0,314	-0,304
G2	0,609	0,587	0,549	0,538	-0,207	-0,203	-0,189	-0,186
G3	0,452	0,427	0,398	0,378	-0,048	-0,042	-0,036	-0,035
G4	0,405	0,389	0,373	0,366	-0,002	0,002	0,004	0,005
G5	0,364	0,362	0,358	0,354	0,029	0,027	0,029	0,032
G6	0,349	0,340	0,337	0,334	0,072	0,086	0,085	0,082
G7	0,416	0,389	0,385	0,366	0,174	0,179	0,183	0,160
G8	0,399	0,387	0,380	0,374	0,273	0,287	0,272	0,294

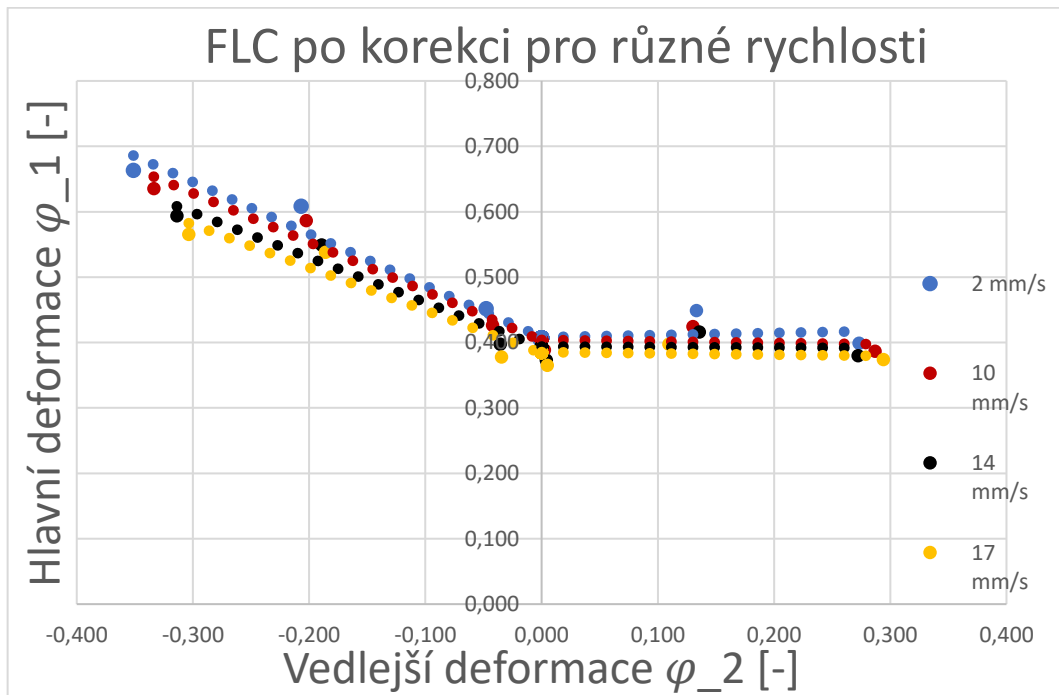


Obrázek 54 - FLC křivky pro různé rychlosti

Jelikož zkouška probíhala podle Nakajimy, tak jsme body získané zprůměrováním museli přepočítat, tak aby nejnižší bod křivky ležel na ose hlavní deformace, tedy  $\varphi_2 = 0$ . K přepočtu jsme použili vztahy z části 3.4.1. Tabulka 9 ukazuje nově přepočítané body, které jsou poté vloženy do grafu na obrázku 55 a v Příloze 3 ve větším měřítku. Během korekce bylo nutné odstranit geometrii G5, protože nebyla nejnižším bodem křivky, jak vyžaduje přepočtový vztah.

Tabulka 9 - Průměrné hodnoty po korekci pro jednotlivé geometrie a rychlosti

KOREKCE	Hlavní deformace $\varphi_1$ [-]				Vedlejší deformace $\varphi_2$ [-]			
	2	10	14	17	2	10	14	17
G1	0,663	0,635	0,594	0,565	-0,351	-0,334	-0,314	-0,304
G2	0,609	0,587	0,549	0,538	-0,207	-0,203	-0,189	-0,186
G3	0,452	0,427	0,398	0,378	-0,048	-0,042	-0,036	-0,035
G4	0,405	0,389	0,373	0,366	-0,002	0,002	0,004	0,005
G6	0,407	0,403	0,393	0,385	0,000	0,000	0,000	0,000
G7	0,449	0,425	0,416	0,398	0,133	0,130	0,136	0,110
G8	0,399	0,387	0,380	0,374	0,273	0,287	0,272	0,294



Obrázek 55 - FLC křivky pro různé rychlosti po korekci

## 6. Závěr

Cílem práce bylo zmapovat vliv rychlosti deformace na polohu křivky FLC pro hlubokotažnou ocel používanou v automobilovém průmyslu pro stavbu dílů karoserie. Původně bylo počítáno s jakostí DX56, která je dle VDA 239-100 označována značkou CR4. S ohledem na omezování výroby a dlouhou dobu dodání bylo v průběhu práce rozhodnuto o dodání materiálové jakosti DC05, která z hlediska značení VDA 239-100 má stejnou značku, tudíž se jedná o materiály, které jsou zaměnitelné.

V práci jsem se v úvodní části věnoval problematice tvářitelnosti, se zaměřením na její hodnocení a na činitele, které ji ovlivňují. S ohledem na to, že motivací této práce bylo vytvoření diagramu mezních přetvoření pro materiálovou jakost DC05 pro vyšší rychlosti zatěžování, respektive vyšší rychlosti deformace, jsem popsal význam FLC křivek na tvářitelnost a metodiky pro jejich stanovení. Znalost těchto závislostí je velmi důležitá pro pochopení zásoby plasticity při lisovacích operacích, ale také pro správné definování kritéria porušení v simulačních softwarech, na které se spoléhají konstruktéři při návrhu nástrojů pro lisování karoserií.

V další části práce jsem uvedl různé způsoby určování tvářitelnosti. Popsal jsem, jak z charakteristik naměřených zkouškou tahem, můžeme jednoduše získat základní představu o tvářitelnosti. Následoval výčet základních technologických zkoušek s popisem zkušebního tělesa a ukazatele tvářitelnosti. Popsány byly i zkoušky podle normy ČSN EN ISO 12004-2, která definuje dva možné způsoby zkoušení, a to dle Nakajimy nebo dle Marciniaka. Závěr teoretické části jsem věnoval digitální korelaci obrazu, jejímu principu a požadavkům.

V rámci experimentální části práce jsem se zaměřil nejprve na ověření postupů pro eliminaci tření v průběhu zkoušky, aby došlo ke vzniku trhliny v oblasti, která je definována v normě. Také bylo třeba ověřit navržené postupy pro odstranění nečistot na povrchu vzorků pro zajištění dostatečné přilnavosti naneseného patternu a pro ověření vhodného nástřiku pro vytvoření patternu. Poté byly na připravených vzorcích provedena měření, jejichž cílem bylo pro vybrané rychlosti deformace sestavení křivky mezních deformací.

Měření bylo provedeno na stroji Zwick Roell BUP 600, který byl osazen tažníkem pro zkoušku dle Nakajimy. Deformace byly zaznamenány a vyhodnocovány systémem ARAMIS od firmy GOM. Měřili jsme celkem při čtyřech rychlostech tažníku (2, 10, 14, 17 mm/s), přepočít na rychlost deformace proveden nebyl, předpokládali jsme, že úměrně rychlosti tažníku roste i rychlost deformace. Před samotným měřením jsme nastavili a zkalibrovali systém ARAMIS, který jsme poté používali k vyhodnocení. Na omytý a odmaštěný povrch jsme nanесли bílou základovou barvu Belton Universal Primer White, na kterou jsme krátkými stříky nanесли barvu Montana GRANIT. Z testů se ukázalo, že příliš zaschlá barva se loupe, proto jsme vzorky stříkali těsně před samotnou zkouškou. Při vlastním měření bylo třeba vypořádat se s řadou problémů, mezi které patřilo i zajištění dostatečného osvětlení plochy sledovaného vzorku pro snímání vyššími rychlostmi při vyšších rychlostech pohybu nástroje.

V rámci práce bylo proměřeno 160 vzorků, které jsem zpracoval v programu MS Excel. Po vyhodnocení se potvrdil předpoklad, že by se FLC s rostoucí rychlostí deformace měli posouvat k nižším hodnotám hlavní deformace. Největší rozdíl byl zaznamenán v levé části diagramu, kde byl mezi rychlostmi 2 mm/s a 17 mm/s pokles o přibližně 15 %. Na pohyb FLC měli určitě vliv doprovodné jevy vyšších rychlostí deformace, a to zvýšené deformační teplo a zvýšené tření mezi nástrojem a plechem. Nakonec jsme získaná data ze zkoušky dle Nakajimy přepočítali, tzn nejnižší bod FLC jsme položili na osu hlavní deformace.

Naměřená data poslouží k tvorbě detailnější materiálové karty pro simulační software Autoform. Díky tomuto měření bude možné v simulacích nastavit reálné rychlosti zatěžování a

zabránit tak zbytečným nákladům, které jsou spojeny s nesprávně vyrobeným nástrojem. Doporučení k dalšímu výzkumu by mělo být zpřesňování získaných poznatků a zahrnutí vlivu výroby plechu, např. poloha v rámci svitku (začátek, střed, konec), jiná šarže materiálu nebo zkoumání materiálu od různých výrobců.

# Bibliografie

- [1] Technologie tváření kovů. Katedra strojírenské technologie [online]. Liberec: TUL [cit. 2022-07-30]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/obsah\\_kovy.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/obsah_kovy.htm)
- [2] Technologie tváření. Katedra strojírenské technologie [online]. Brno: VUT [cit. 2022-07-30]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/technologie\\_tvareni/index.htm](http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/technologie_tvareni/index.htm)
- [3] Basics Of The Metal Forming Process [online]. Belleville Ontario, Canada, 2019 [cit. 2022-07-30]. Dostupné z: <https://questtech.ca/blog/basics-of-the-metal-forming-process/>
- [4] PETRUŽELKA, Jiří a Pavel SONNEK. Tvářitelnost kovových materiálů [online]. 3 Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2006, poslední aktualizace 9.1.2007
- [5] TATÍČEK, František. Vliv materiálu na kvalitu výlisku. MM Průmyslové spektrum [online]. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 2018(1) [cit. 2022-07-04]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vliv-materialu-na-kvalitu-vylisku.html>
- [6] SCHINDLER, Ivo, Petr KAWULOK a Miroslav LEGERSKI. Metalurgická tvářitelnost [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2008 [cit. 2022-07-15].
- [7] SCHINDLER, Ivo a Petr KAWULOK. Teoretické základy tváření materiálů [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2022-07-15].
- [8] ŽÍDEK, Milan. Metalurgická tvářitelnost ocelí za tepla a za studena. Praha: ALEKO, 1995. ISBN 80-85341-45-X.
- [9] ČSN EN ISO 10275: Kovové materiály – Plechy a pásy – Stanovení exponentu deformačního zpevnění tahem. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.
- [10] ČSN ISO 16630: Kovové materiály – Plechy a pásy – Zkouška rozšiřováním otvoru. 2. vyd. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [11] ČSN EN ISO 12004-2: Kovové materiály – Plechy a pásy – Stanovení křivek mezní tvářitelnosti – Část 2: Stanovení křivek mezní tvářitelnosti v laboratoři. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [12] Digital Image Correlation: Motion and Deformation Analysis [online]. GOM [cit. 2022-08-04]. Dostupné z: <https://www.gom.com/en/topics/digital-image-correlation>
- [13] Product Information BUP 400 BUP 600 [online]. Zwick Roell [cit. 2022-07-04]. Dostupné z: [https://www.zwickroell.com/fileadmin/content/Files/SharePoint/user\\_upload/PI\\_EN/11\\_933\\_BUP\\_400\\_BUP\\_600\\_testControl\\_II\\_PI\\_EN.pdf](https://www.zwickroell.com/fileadmin/content/Files/SharePoint/user_upload/PI_EN/11_933_BUP_400_BUP_600_testControl_II_PI_EN.pdf)
- [14] ARAMIS: User Information - Hardware. Braunschweig: GOM, 2018. Dostupné z: [www.gom.com](http://www.gom.com)
- [15] VALEŠ, Michal. Vliv deformační rychlosti na stabilitu lisovacího procesu karosářských výlisků. Praha, 2016. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Ing. František Tatíček, Ph.D.
- [16] BOLJANOVIC, Vukota. Sheet metal forming processes and die design. New York: Industrial Press, c2004, xix, 219 p. ISBN 08-311-3182-9.
- [17] ČSN EN ISO 10113: Kovové materiály – Plechy a pásy - Stanovení součinitele plastické anizotropie. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.

- [18] ČSN EN ISO 6892-1: Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [19] MARCINIAK, Z., J.L DUNCAN a S.J HU. Mechanics of sheet metal forming. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. ISBN 0750653000.
- [20] ČSN EN ISO 20482: Kovové materiály – Plechy a pásy - Zkouška hloubením podle Erichsena. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [21] BANABIC, Dorel. Sheet Metal Forming Processes: Constitutive Modelling and Numerical Simulation [online]. Cluj Napoca: Springer Berlin, Heidelberg [cit. 2022-07-04]. ISBN 978-3-540-88112-4. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88113-1> Dostupné z: [https://www.academia.edu/35135478/Sheet\\_Metal\\_Forming\\_Processes\\_Constitutive\\_Modelling\\_and\\_Numerical\\_Simulation](https://www.academia.edu/35135478/Sheet_Metal_Forming_Processes_Constitutive_Modelling_and_Numerical_Simulation)
- [22] KOÇ, Muammer a Tugrul ÖZEL, ed. Modern Manufacturing Processes. Hoboken (New Jersey): Wiley, 2019. ISBN 9781118071922.
- [23] NIELSEN, Chris a Paulo MARTINS. Metal Forming: Formability, Simulation, and Tool Design. Academic Press, 2021. ISBN 9780323852555.
- [24] JURČIŠIN, Miroslav. Experimentální měření křivky mezních deformací. MM Průmyslové spektrum [online]. 2015 [cit. 2022-08-04]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/experimentalni-mereni-krivky-meznich-deformaci>
- [25] FALLAHIAREZOODAR, Ali, Berk AYKAS, David DIAZ-INFANTE a Taylan ALTAN. Practical methods for estimating formability of sheet materials. STAMPING Journal [online]. 2016 [cit. 2022-08-04]. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/stampingjournal/article/stamping/r-d-update-practical-methods-for-estimating-formability-of-sheet-materials>
- [26] PÖHLANDT, K., BANABIC, Dorel, ed. Formability Testing. In: Formability of Metallic Materials. Formability of Metallic Materials, 2000, s. 61-117. ISBN 978-3-642-08750-9. Dostupné z: doi: 10.1007/978-3-662-04013-3\_3
- [27] Multikamerové DIC měření. Dantec Dynamics [online]. [cit. 2022-07-29]. Dostupné z: <https://www.merani-deformaci.cz/multikamerove-dic/>
- [28] Digital Image Correlation: Overview of Principles and Software. Correlated Solutions [online]. [cit. 2020-02-29]. Dostupné z: <http://www.correlatedsolutions.com/supportcontent/condensed-shortcourse.pdf>
- [29] PAN, B. Recent Progress in Digital Image Correlation. Experimental Mechanics. 2011, 51(7), 1223-1235. ISSN 0014-4851. Dostupné z: doi:10.1007/s11340-010-9418-3
- [30] AVERMANN, Markus. Why do we still need Forming Limit Diagrams (FLDs)?. Forming World [online]. 2020 [cit. 2022-08-04]. Dostupné z: <https://formingworld.com/forming-limit-diagram/>
- [31] DOUBEK, Pavel. Výzkum deformačního chování vysokopevnostních plechů při vyšších rychlostech deformace. Technická Univerzita v Liberci, 2006. Dostupné také z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/38810>
- [32] ZDENĚK, Buchar. Diagramy mezních přetvoření tenkých hlubokotažných plechů. Liberec, 1987. Disertační práce. Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, Fakulta Strojní, Katedra tváření a plastů. Vedoucí práce doc. Ing. Jaroslav Tměj, CSc.

- [33] REDDY, A. C. S., S. RAJESHAM, P. R. REDDY a A. C. UMAMAHEWAR. Formability: A review on different sheet metal tests for formability. In: The Open Conference Proceedings Journal. 2020, 2020. ISSN 2210-2892. Dostupné z: doi:10.1063/5.0019536
- [34] SILVA, M.B., A.J. MARTÍNEZ-DONAIRE, G. CENTENO, D. MORALES-PALMA, C. VALLELLANO a P.A.F. MARTINS. Recent Approaches for the Determination of Forming Limits by Necking and Fracture in Sheet Metal Forming. *Procedia Engineering*. 2015, 132, 342-349. ISSN 18777058. Dostupné z: doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.504
- [35] VÍT, Novák. Zpracování a kvalita kovových materiálů. Praha, 2021. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie.
- [36] PAUL, Surajit Kumar. Theoretical analysis of strain- and stress-based forming limit diagrams. In: The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. SAGE Publications, 2013, s. 177-188. ISSN 0309-3247. Dostupné z: doi: 10.1177/0309324712468524
- [37] J. PAVAN KUMAR, R. UDAY KUMAR, B. RAMAKRISHNA a B RAMU. Formability of sheet metals – A review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*,. Telangana: IOP Publishing, 2018, 2018(455). ISSN 1757-8981.
- [38] SUDARSAN, C., K. H. BANKER, S. HAZRA, R. BHAGAT a S. K. PANDA. Experimental investigations on forming limit diagram of ultra thin SS 304 steel: effect of circular grid size, sheet orientation, punch size and deformation speed. In: *Advances in Materials and Processing Technologies*. Informa UK, 2018, s. 25-38. ISSN 2374-068X. Dostupné z: doi:10.1080/2374068X.2018.1510679
- [39] VDA 239-100: Flacherzeugnisse aus Stahl zur Kaltumformung / Sheet Steel for Cold Forming.
- [40] MCCORMICK, Nick a Jerry LORD. Digital Image Correlation. *Materials Today*. 2010, 13(12), 52-54.
- [41] CENTENO, G., A.J. MARTÍNEZ-DONAIRE, D. MORALES-PALMA, C. VALLELLANO, M.B. SILVA a P.A.F. MARTINS. Novel experimental techniques for the determination of the forming limits at necking and fracture. *Materials Forming and Machining*. Elsevier, 2015, 2015, 1-24. ISBN 9780857094834. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-85709-483-4.00001-6
- [42] KIM, S.B., H. HUH, H.H. BOK a M.B. MOON. Forming limit diagram of auto-body steel sheets for high-speed sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2011, 211(5), 851-862 [cit. 2020-02-04]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.01.006. ISSN 09240136. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092401361000018X>
- [43] The Library of Manufacturing [online]. [cit. 2022-07-15]. Dostupné z: <https://thelibraryofmanufacturing.com/index.html>
- [44] Metal forming handbook. Berlin: Springer, 1998. ISBN 3-540-61185-1.



## Seznam obrázků

Obrázek 1 – Závislost přetvárného odporu na teplotě .....	10
Obrázek 2 - Tvorba vln u tažení bez přidržovače (vlevo) a s přidržovačem (vpravo).....	11
Obrázek 3 - Princip stříhání otvoru .....	11
Obrázek 4 - Rozložení a velikost napětí v ohybku .....	12
Obrázek 5 - Schéma vlivu teploty na tvářitelnost .....	14
Obrázek 6 - Vliv stavu napjatosti na tvářitelnost pro ocel 11 500 .....	14
Obrázek 7 - Smluvní diagram tahové zkoušky .....	15
Obrázek 8 - Zkušební těleso pro klínovou zkoušku .....	16
Obrázek 9 - Schéma zkoušky hloubením dle Erichsena .....	16
Obrázek 10 - Schéma kalíškovací zkoušky.....	17
Obrázek 11 - Schéma zkoušky rozšiřování otvoru HET .....	17
Obrázek 12 - Schéma zkoušky střídavým ohybem .....	18
Obrázek 13 - Tvar ohybníku pro zkoušku dle Günthera.....	18
Obrázek 14 - Keeler-Goodwinův diagram.....	19
Obrázek 15 - Typické deformační stopy operací plošného tváření.....	19
Obrázek 16 - Posunutí FLC v závislosti na mezi kluzu (vlevo) .....	20
Obrázek 17 - Posunutí FLC v závislosti na tloušťce materiálu (vpravo) .....	20
Obrázek 18 - Posunutí FLC v závislosti na součiniteli plošné anizotropie, respektive exponentu deformačního zpevnění.....	20
Obrázek 19 - Schéma zkoušky dle Nakajimy (vlevo) .....	21
Obrázek 20 – Schéma zkoušky dle Marciniaka (vpravo) .....	21
Obrázek 21 - Rozložení geometrií vzorku podél křivky FLC .....	21
Obrázek 22 -Rozdílné deformační cesty obou zkoušek (vlevo) .....	22
Obrázek 23 – Detail s vyznačením bodů pro korekci (vpravo).....	22
Obrázek 24 - Ukázka správného patternu.....	23
Obrázek 25 - Teoretický princip korelace (nahore „snímek kamery“, dole stupně šedi, vlevo před pohybem, vpravo po pohybu) .....	23
Obrázek 26 - Korelační funkce .....	24
Obrázek 27 - Princip 2D korelace na skutečném patternu .....	24
Obrázek 28 - Princip 3D korelace .....	24
Obrázek 29 - Geometrie zkušební vzorku z nevyužitého plechu s rovnoběžnou délkou dřívku s vyznačenou orientací válcování .....	26
Obrázek 30 - Vyříznuté vzorky vyskládané do tvaru FLC.....	27
Obrázek 31 - Zkušební zařízení Zwick Roell BUP 600.....	27
Obrázek 32 - Schéma nástroje pro zkoušku dle Nakajimy .....	28
Obrázek 33 - Přípravky pro zarovnání geometrií .....	28
Obrázek 34 - Systém ARAMIS nad BUP 600 s přidáním osvětlením .....	29
Obrázek 35 - Hodnoty pro zaostření kamer.....	30
Obrázek 36 - Kalibrační destička GOM CP20 MV55x44 na distančních válečcích .....	32
Obrázek 37 - Mycí stanoviště s použitými přípravky .....	32
Obrázek 38 – Belton PU Wasserlack RAL 9010 + Motip Matt Black RAL 9005 (zleva: po uschnutí nástřiku; po 24 h; po 48 h).....	33
Obrázek 39 - Motip Matt White RAL 9010 + Motip Matt Black RAL 9005 (zleva: po uschnutí nástřiku; po 24 h; po 48 h).....	34
Obrázek 40 - Belton Universal Primer +Montana GRANIT (zleva: po uschnutí nástřiku; po 24 h; po 48 h).....	34
Obrázek 41 - Ovládací panel stroje s nastavenými podmínkami zkoušky .....	35
Obrázek 42 - Umyté a nahrubo odmaštěné vzorky .....	36
Obrázek 43 - Nástřikové stanoviště s připraveným vzorkem.....	36
Obrázek 44 - Nanášení tribologického systému.....	37

Obrázek 45 - Zarovnání vzorku pomocí přípravků .....	37
Obrázek 46 - Změřené a označené vzorky s trhlinou dle normy.....	38
Obrázek 47 - Hodnocení kvality patternu a nastavení DIC metody .....	38
Obrázek 48 - Vyhodnocení metodou řezu .....	39
Obrázek 49 - Ukázkový protokol z měření .....	39
Obrázek 50 - Graf rozptylu naměřených hodnot pro rychlost 2 mm/s.....	40
Obrázek 51 - Graf rozptylu naměřených hodnot pro rychlost 10 mm/s.....	40
Obrázek 52 - Graf rozptylu naměřených hodnot pro rychlost 14 mm/s.....	41
Obrázek 53 - Graf rozptylu naměřených hodnot pro rychlost 17 mm/s.....	41
Obrázek 54 - FLC křivky pro různé rychlosti .....	42
Obrázek 55 - FLC křivky pro různé rychlosti po korekci .....	43

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Chemické složení oceli DC05 .....	25
Tabulka 2 - Tabulka mechanických vlastností oceli DC05 .....	25
Tabulka 3 - Rozměry geometrií pro popsání FLC a jejich značení .....	26
Tabulka 4 - Technické parametry systému ARAMIS 4M rev03 .....	29
Tabulka 5 - Parametry pro zaostřování kamer .....	30
Tabulka 6 - Testované barvy .....	33
Tabulka 7 - Vstupní parametry zkoušky .....	34
Tabulka 8 - Průměrné hodnoty pro jednotlivé geometrie a rychlosti.....	42
Tabulka 9 - Průměrné hodnoty po korekci pro jednotlivé geometrie a rychlosti.....	43

# Seznam příloh

Příloha 1 – Kalibrační protokol systému ARAMIS

Příloha 2 – FLC křivky pro různé rychlosti

Příloha 3 – FLC křivky pro různé rychlosti po korelaci

Příloha 4 – Změřené vzorky pro rychlost 2 mm/s

Příloha 5 – Změřené vzorky pro rychlost 10 mm/s

Příloha 6 – Změřené vzorky pro rychlost 14 mm/s

Příloha 7 – Změřené vzorky pro rychlost 17 mm/s