



## Diplomová práce

# Využití fotogrammetrie pro vyhodnocení mezních stavů deformace

*Studijní program:*

N0715A270015 Materiály a technologie

*Autor práce:*

**Bc. Jakub Kameník**

*Vedoucí práce:*

Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie

*Konzultant práce:*

Ing. David Koreček

Katedra strojírenské technologie

Liberec 2023



## Zadání diplomové práce

# Využití fotogrammetrie pro vyhodnocení mezních stavů deformace

*Jméno a příjmení:*

**Bc. Jakub Kameník**

*Osobní číslo:*

S21000221

*Studijní program:*

N0715A270015 Materiály a technologie

*Zadávající katedra:*

Katedra strojírenské technologie

*Akademický rok:*

2022/2023

### Zásady pro vypracování:

1. Hlubokotažné materiály používané v automobilovém průmyslu a způsoby hodnocení jejich tvářitelnosti (statická zkouška tahem, digram mezních přetvoření, zkouška hydrostatickým vypínáním, zkouška hloubením dle Erichsena atd.)
2. Možnosti bezkontaktní analýzy deformace, základy fotogrammetrie.
3. Pro zvolený testovaný materiál provést porovnání výsledku měření diagramu mezních přetvoření při použití metodiky vyhodnocení na základě rozložení deformace v okolí lomu a metodiky založené na časové změně velikosti deformace (gradientu deformace).
4. Statistické vyhodnocení naměřených dat.
5. Diskuze a závěr.

*Rozsah grafických prací:* tabulky, grafy  
*Rozsah pracovní zprávy:* cca 50 stran  
*Forma zpracování práce:* tištěná/elektronická  
*Jazyk práce:* Čeština

### **Seznam odborné literatury:**

- [1] DAVIES, Geoffrey. *Materials for Automobile Bodies*. B.m.: Butterworth-Heinemann, 2012. ISBN 978-0-08-096979-4.
- [2] ASHBY, M. F. *Materials selection in mechanical design*. 3rd ed. Amsterdam ; Boston: Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 978-0-7506-6168-3.
- [3] ASM INTERNATIONAL, Howard KUHN a ASM INTERNATIONAL, ed. *Mechanical testing and evaluation*. [11. ed.], 1. print. Materials Park, Ohio: ASM International, 2000. ASM handbook, prepared under the direction of the ASM International Handbook Committee; Vol. 8. ISBN 978-0-87170-389-7.
- [4] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. Brno: CERM, 2003. ISBN 978-80-7204-283-8.
- [5] LUHMANN, Thomas, Stuart ROBSON a Stephen KYLE, ed. *Close-range photogrammetry: principles, methods and applications*. Dunbeath: Whittles, 2006. ISBN 978-1-870325-50-9.
- [6] ČSN EN ISO 6892-1 (420310) *Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.

*Vedoucí práce:* Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.  
Katedra strojírenské technologie

*Konzultant práce:* Ing. David Koreček  
Katedra strojírenské technologie

*Datum zadání práce:* 30. listopadu 2022

*Předpokládaný termín odevzdání:* 30. května 2024

L.S.

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.  
děkan

doc. Ing. Iva Nováková, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 30. listopadu 2022

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

## **Název práce**

Využití fotogrammetrie pro vyhodnocení mezních stavů deformace

## **Anotace**

Tato diplomová práce se zabývá využitím fotogrammetrie pro měření a vyhodnocení diagramů mezních stavů přetvoření. Hlavním cílem je vyhodnocení diagramů mezních přetvoření (FLD) běžným způsobem daným dle normy ISO/DIN 12004 – 2, tedy metodou vyhodnocení na základě rozložení deformace v okolí lomu. Následně na stejných naměřených datech použít pro vyhodnocení metody vyhodnocení založené na časové změně velikosti deformace (gradientu deformace) a tyto čtyři FLD diagramy získané různým vyhodnocením stejných dat porovnat a určit rozdíly, výhody a nevýhody těchto čtyř vyhodnocení.

## **Klíčová slova**

Fotogrammetrie, GOM Correlate Pro, FLD, hlubokotažná ocel DC05, mezní stav

**Title**

The Use of Photogrammetry for the Evolution of Limit States of Deformation

**Annotation**

This thesis deals with the use of photogrammetry for the measurement and evaluation of the forming limit diagrams. The main objective is to evaluate the forming limit diagrams in the common way given by standard ISO/DIN 12004 – 2, i.e. by the method of evaluation based on the strain distribution in the vicinity of the fracture. Subsequently, on the same measured data, to apply the evaluation methods based on the time change of the strain magnitude (strain gradient) and to compute the four FLD obtained by different evaluations of the same data to compare and determine the differences, advantages and disadvantages of the given evaluations.

**Key words**

Photogrammetry, GOM Correlate Pro, FLD, deep – drawing steel DC05, limit state

## **Poděkování**

V této části bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. et. Bc. Jiřímu Sobotkovi , Ph.D. za jeho vynaložený čas a velice důležité rady při tvorbě této diplomové práce. Zároveň bych chtěl poděkovat za pomocnou ruku a rady panu doc. Ing Pavlu Solfronkovi , Ph.D. Nakonec bych chtěl poděkovat mé rodině za jejich podporu při celé délce studia.

## Obsah

1	Úvod .....	12
2	Teoretická část .....	13
2.1	Materiály používané pro stavbu karosérie .....	13
2.1.1	Oceli.....	15
2.2	Způsoby hodnocení tvářitelnosti .....	22
2.2.1	Statická zkouška tahem.....	22
2.2.2	Diagram mezních přetvoření.....	25
2.2.3	Zkouška hydrostatickým vypínáním (HBT – Hydraulic Bulge Test) .....	31
2.2.4	Zkouška hloubení dle Erichsena .....	32
2.3	Bezkontaktní optické metody měření deformace (fotogrammetrie) .....	33
2.3.1	Rozdělení fotogrammetrie .....	33
2.3.2	Princip fotogrammetrie.....	34
2.3.3	Optické měřicí systémy .....	35
3	Experimentální část.....	39
3.1	Cíle experimentální části .....	39
3.2	Použitý materiál .....	39
3.3	Statická zkouška tahem.....	41
3.3.1	Postup zkoušky.....	41
3.4	Tvorba FLD.....	43
3.4.1	Příprava vzorků pro měření.....	43
3.4.2	Postup měření při zjišťování FLD.....	45
3.4.3	Vyhodnocení naměřených dat .....	47
3.4.4	Přehled FLD pomocí jednotlivých metod .....	56
4	Diskuze výsledků .....	61
5	Závěr.....	64
	Literatura.....	66
	Seznam příloh.....	69



## Seznam použitých zkratk a symbolů

$A$	[%]	Tažnost
$A_{80mm}$	[%]	Tažnost pro délku zkušební vzorku 80 mm
AHSS		Pokročilé vysokopevnostní oceli (Advanced High Strength Steel)
$b$	[mm]	Šířka zkušební vzorku
BH		Bake Hardenable
BiW		Body in White
CP		Komplexní fáze (Complex Phase)
$D$	[mm]	Průměr zkušební vzorku
DP		Dvoufázové (Dual Phase)
DiC		Digitální kontrola obrazu
$dx$	[mm]	Vzdálenost na ose x
EU		Evropská unie
$F$	[N]	Zatěžující síla
FLD		Diagram mezních přetvoření (Forming Limit Diagram)
FLC		Křivka mezních přetvoření (Forming Limit Curve)
FPS		Počet snímků za sekundu (Frames per second)
$H$	[mm]	Výška vzorku
HSLA		Vysokopevnostní nízkolegované oceli (High Strength Low Alloy)
HSS		Vysokopevnostní oceli (High Strength Steel)
$IE$	[mm]	Prohloubení plechu
IF		Bez intersticií (Interstitial Free)
$k$	[1]	Koeficient zaplnění plochy

KUT	[1]	Komplexní ukazatel tvářitelnosti
$L$	[mm]	Aktuálně dosažená délka
$L_u$	[mm]	Konečná měřená délka po lomu
$L_0$	[mm]	Počáteční měřená délka
$\Delta L$	[mm]	Absolutní prodloužení
LSS		Nízkopevnostní oceli (Low Strength Steel)
MS		Martenzitické oceli (Martensitic Steel)
$m_\sigma$	[1]	Ukazatel stavu napjatosti
$m_\varphi$	[1]	Ukazatel stavu přetvoření
ppm		Jedna milióntina celku (Parts per million)
$R$	[MPa]	Smluvní napětí
$R_m$	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
$R_{p0,2}$	[MPa]	Smluvní mez kluzu
$S$	[mm <sup>2</sup> ]	Aktuální plocha průřezu vzorku v průběhu zkoušky
$S_u$	[mm <sup>2</sup> ]	Konečná průřezová plocha zkoušené délky
$S_0$	[mm <sup>2</sup> ]	Počáteční průřezová plocha zkoušené délky
TRIP		Oceli s transformačně indukovanou plasticitou (Transformation Induced Plasticity)
TWIP		Oceli s plasticitou indukovanou dvojčatěním (Twinning Induced Plasticity)
UH	[1]	Ukazatel hlubokotažnosti
$w$	[mm]	Vzdálenost určující počátek inverzní paraboly
$Z$	[%]	Kontrakce
ZP	[MPa]	Zásoba plasticity
$\varepsilon$	[1]	Poměrná deformace

$\sigma$	[MPa]	Skutečné napětí
$\varphi$	[1]	Skutečná deformace
$\varphi_{ik}$	[1]	Kritická intenzita přetvoření
$\varphi_{1l;r}$	[1]	Levý; pravý inflexní bod křivky $\varphi_1$
$\varphi_{1m}$	[1]	Mezní skutečná deformace sloužící pro výpočet šířky $w$
$\varphi_{2l;r}$	[1]	Levý; pravý inflexní bod křivky $\varphi_2$
$\varphi_{2m}$	[1]	Mezní skutečná deformace sloužící pro výpočet šířky $w$

## 1 Úvod

Diagramy mezních přetvoření (Forming Limit Diagram – FLD) jsou dnes nedílnou součástí hodnocení tvářitelnosti v technické praxi. Jednou z hlavních oblastí využívání FLD je strojírenský průmysl, který by se bez těchto diagramů takřka neobešel. Například v automobilovém průmyslu jsou tyto diagramy využívány zejména pro určení lisovatelnosti jednotlivých částí karosérií, kde designéři navrhují stále složitější tvary pohledových dílů. Díky rychlému pokroku a již zmíněné poptávce výrobců na lisování stále složitějších a komplexnějších dílů jsou vývojáři nuceni vymýšlet stále nové a nové vylepšení. Tento fakt se podepisuje i při tvorbě a vyhodnocení diagramů mezních přetvoření, kde jsou hledány nové a inovativnější metody samotného vyhodnocování FLD. Zatím je však v technické praxi stále nejvíce využívána norma ISO/DIS 12004 – 2, která vyšla v platnost roku 2006. Tato norma provádí vyhodnocení FLD na základě rozložení deformace v okolí trhliny pomocí metody řezu (section metod). S nezastavitelným technickým pokrokem celkového procesu lisování a s ním spojená tvorba FLD diagramů poukazuje na fakt, že pro některé stavy napjatosti se zdá být postup vyhodnocení běžně používanou metodou ve strojírenské praxi danou normou ISO/DIS 12004 – 2 ne zcela vyhovující. Příkladem může být přílišné snižování mezních hodnot deformací u některých stavů napjatosti. Proto existuje v poslední době tendence navrhnout pro určení FLD nové metodiky, které vyhodnocují diagramy mezních přetvoření na základě časové změny velikosti deformace – tzv. time-dependend methods. A právě využitím těchto metod a jejich porovnáním s metodou ISO/DIS 12004 - 2 se zabývá tato diplomová práce.

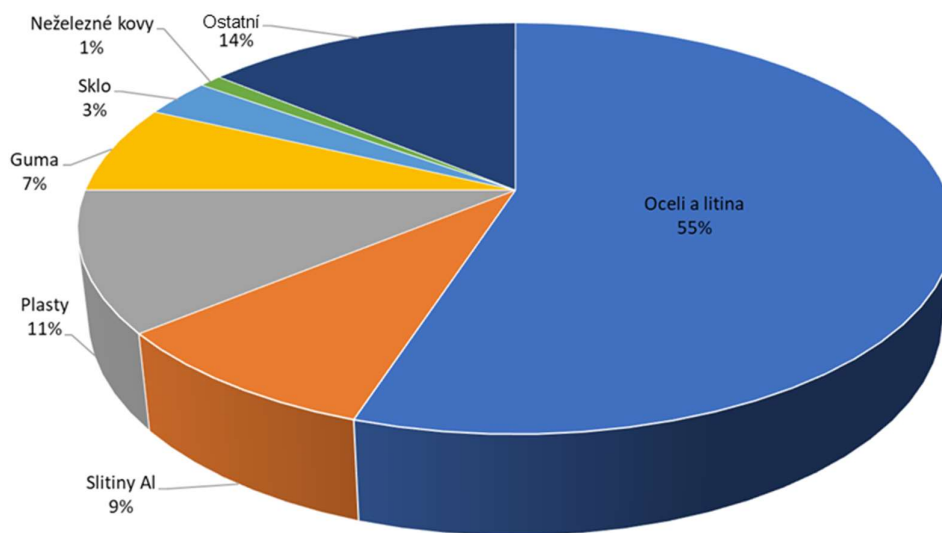
Cílem této diplomové práce bylo provést naměření hodnot nezbytných k určení FLD pro hlubokotažný materiál DC05 + 75/75 BP. Následně z těchto získaných naměřených hodnot vytvořit FLD, a to jak běžnou normovanou metodou ISO/DIS 12004 – 2, tak i pomocí již zmíněných metod založených na základě časové změny velikosti deformace. Pro vyhodnocení FLD byla tedy použita jedna normovaná metoda a tři metody vyhodnocení založené na časové změně velikosti deformace. První metoda založená na časové změně velikosti deformace byla aktuálně nabízená metoda přímo v softwaru GOM Software 2021. Další dvě metody představovaly vlastní navržený způsob, jak vyhodnotit diagramy mezních přetvoření. Tyto zmíněné metody (time-dependend methods) byly provedeny z důvodu časové náročnosti pouze na určitých vybraných stavech napjatosti testovaného materiálu. Na konci této práce následovalo porovnání výsledků mezi sebou s přihlédnutím nejenom na celkové diagramy mezních přetvoření, ale i na výsledky ve všech vyhodnocovaných geometriích a následné doporučení pro výzkum v této oblasti.

## 2 Teoretická část

Hlavním tématem této kapitoly je přehled a využití vhodných materiálů pro konstrukci karosérie v automobilovém průmyslu a možné způsoby vyhodnocení tvářitelnosti těchto materiálů. V dnešní době jsou kladeny stále větší požadavky na vývoj a konstrukci karosérií automobilů, přičemž hlavním požadavkem je uplatnění na trhu. S tím souvisí např. nízká cena vozidla, splnění legislativy EU a moderní design. Dále pak bezpečnost všech účastníků provozu, čímž je myšleno maximální požadavek na bezpečnost pasažérů a také zvýšená bezpečnost chodců. Zároveň v dnešní době jeden z největších požadavků na výrobu karosérií automobilů spočívá ve zvýšení ekologičnosti a snížení výrobních nákladů. Tím jsou automobilky tlačeny k používání nových materiálů a výrobních technologií. [1, 2]

### 2.1 Materiály používané pro stavbu karosérie

Při stavbě karosérií se vybírá z velkého množství materiálů, kde je využití jednotlivých materiálů odvozeno od jejich specifických vlastností. V současné době jsou hlavními materiály, využívanými pro stavbu karosérií ocel, hliník, plasty, guma, sklo a ostatní. Procentuální zastoupení využití těchto jednotlivých materiálů při stavbě karosérií je vyobrazeno na obr. 1. [3]



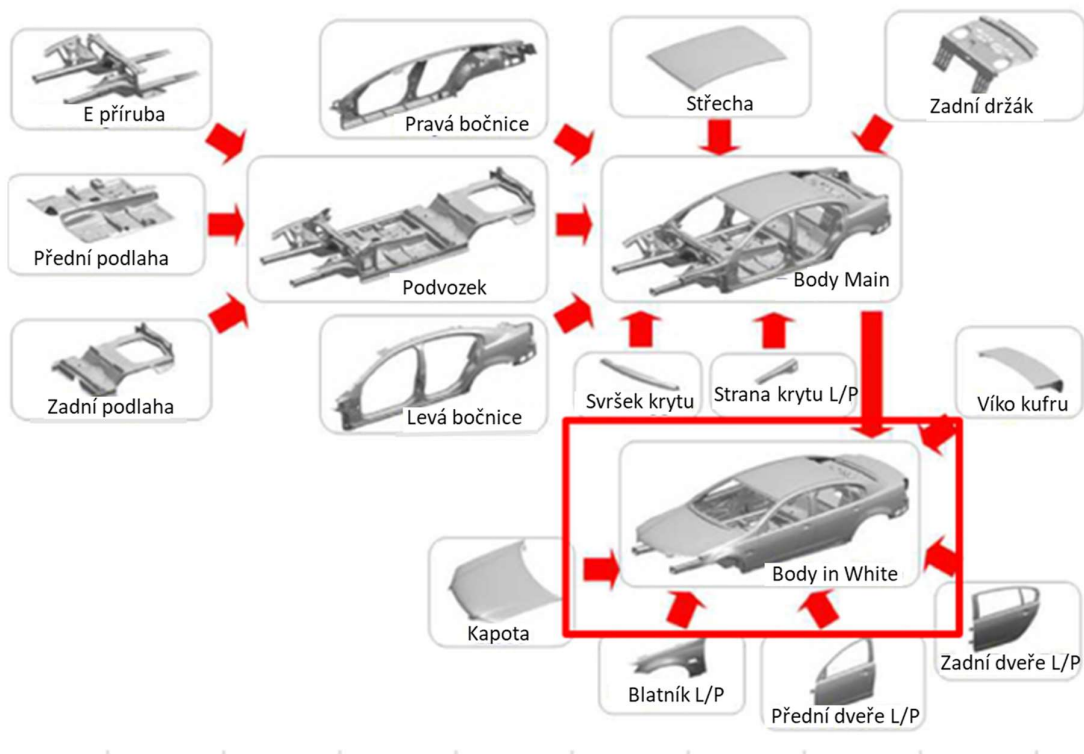
Obr. 1 Procentuální zastoupení materiálů pro tvorbu automobilů [3]

Tato část je však zaměřena na hlavní skelet tzv. BiW (Body in White). BiW je označení pro souhrn výlisků, kromě pohyblivých částí, které byly svařeny dohromady. Zabírá asi 27 % pohotovostní hmotnosti vozidla. Od BiW se očekává, že bude mít řadu významných vlastností jako je zejména vysoká pevnost v tahu a vysoká tuhost (ohybová, torzní, statická i dynamická). Důvodem je zajištění vysoké tuhosti karosérie vozu, což se týká především bezpečnosti, ale i pohodlí pasažérů vozidla. [3]

## BiW lze rozdělit:

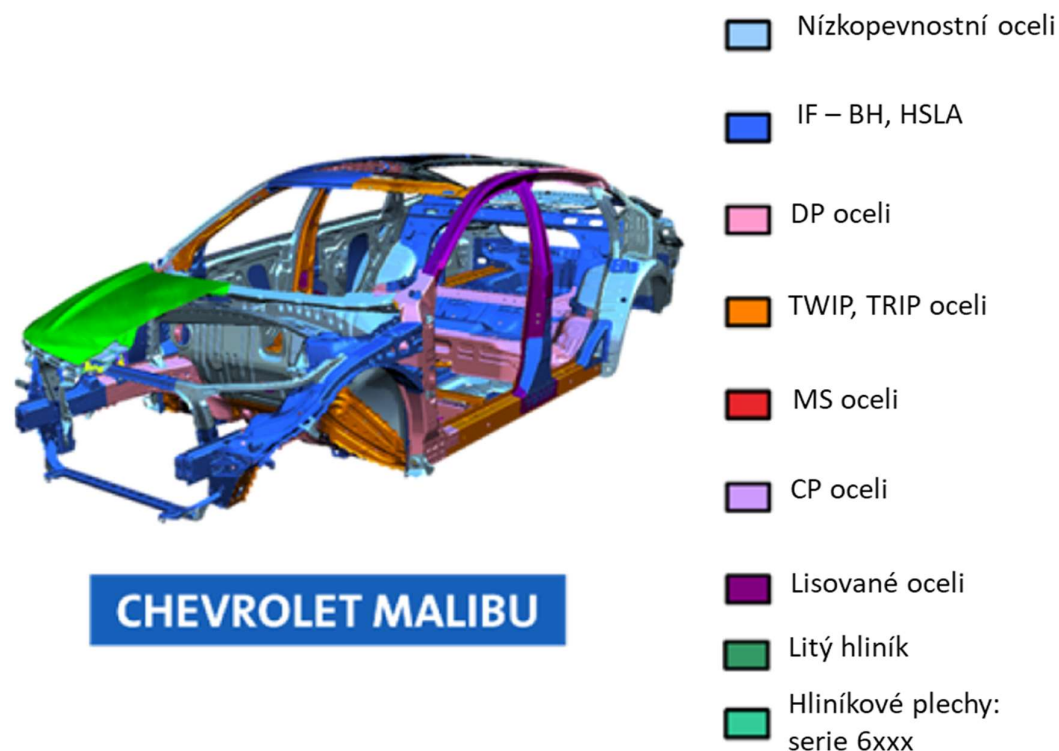
- **Boky karosérie**
  - vnější část karosérie
  - vnitřní část karosérie
- **Spodní část karosérie (podvozek)**
  - přední část pod rámem: – místo, kde se nachází motorový prostor
  - hlavní podlaha: – část určená pro pasažéry vozidla
  - zadní část pod rámem: – jde o prostor v zadní části vozidla
- **Střecha**
- **Blatníky**

Proces složení BiW probíhá tak, že dochází ke stavbě karosérie tzv. odspoda nahoru. Nejprve se spojí všechny spodní díly karosérie a dojde tak ke vzniku podlahy. Následně se k této konstrukci připojí boční díly karosérie a současně se připojí vnitřní panely. Tím dochází ke vzniku tzv. body main. BiW vzniká následným připojením odpovídajících vnějších panelů k vnitřním. Složení BiW z jednotlivých komponentů je vyobrazeno na obr. 2. [1–4]



Obr. 2 Složení BiW [4]

BiW je z hlavní části vytvářeno z ocelí, což je dáno jejich materiálovými vlastnostmi spolu s relativně snadnou výrobou a při porovnání s alternativními druhy materiálů i relativně nízkou cenou. Problémem je však vysoká hustota oceli a tím pádem i vysoká hmotnost jednotlivých dílů. Tento fakt se podepisuje na tom, že ocelové díly zabírají až padesát procent celkové hmotnosti automobilu. Na obr. 3 jsou vyobrazeny materiály používané pro různé díly karosérie. [4]



Obr. 3 Materiály karosérie automobilu Chevrolet Malibu [5]

### 2.1.1 Oceli

Přestože v posledních 30 letech bylo věnováno velké úsilí hledání alternativních materiálů a značnému množství výzkumů za účelem vývoje lepších a lehčích materiálů, je dnes stále ve většině automobilek pro výrobu karosérií nejpoužívanějším materiálem ocel. Tento fakt je dán velkou všestranností tohoto materiálu z hlediska trvanlivosti, pevnosti a ceny. Navíc díky tomuto materiálu je průmysl schopen reagovat na měnící se potřeby ve strojírenství. Mezi hlavní výhody oceli jako materiálu pro výrobu karosérií patří poměrně nízká cena, snadné tváření, odolnost proti korozi, snadné spojování (zejména svařování a lepení), dobrá absorpce energie při nárazu a dobrá recyklovatelnost. V současné době se napříč automobilovým průmyslem používá velká škála různých druhů ocelí od ultra vysokopevnostních ocelí až po nízkouhlíkové IF oceli bez intersticií pro součásti, které vyžadují vlastnosti hlubokého tažení. [1, 6]

## A. Nízkopevnostní oceli

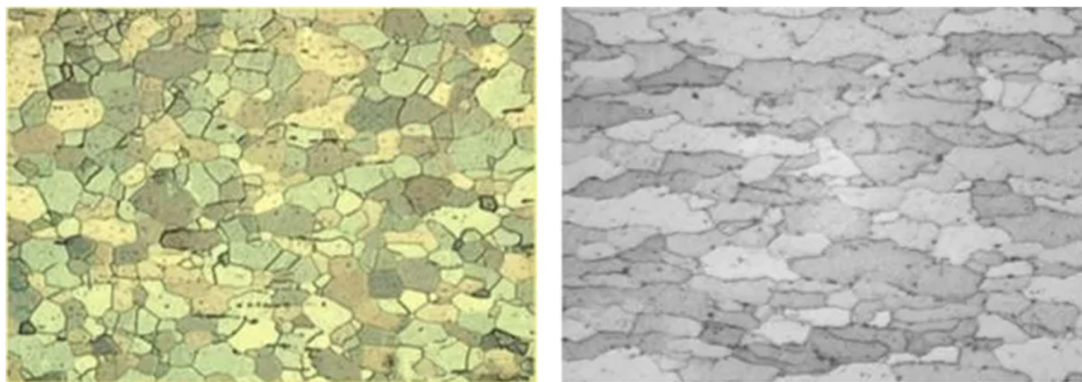
Nízkopevnostní oceli (LSS – Low Strength Steel) jsou oceli hlubokotažné a patří sem zejména následující skupiny jakou jsou IF (Interstitial Free) oceli, respektive IF oceli s BH efektem, nízko-uhlíkové oceli (Mild Steels) a IF – HS oceli. Oceli IF – HS už částečně tvoří přechod mezi nízkopevnostními a vysokopevnostními oceli.[7]

### IF ocel (Interstitial Free)

Jedná se o oceli s velmi nízkým obsahem intersticiálně rozpuštěného uhlíku a dusíku. Součet intersticiálních atomů nepřekračuje hodnotu 40 ppm. Jedná se o vakuově odplyněné oceli. Mají čistě feritickou strukturu (viz. obr 4 vlevo) a jsou mikrolegovány hliníkem, titanem a niobem. Tyto prvky slouží jako karbidonitridační stabilizátory a tím snižují obsah uhlíku a dusíku. V důsledku velmi nízkého obsahu intersticiálních atomů dosahují tyto oceli extrémně vysoké hodnoty tažnosti a jsou tedy používány pro tvarově složitě hlubokotažné díly karosérií jako jsou např. nárazníky, dveře, kapota, kufr, střecha atd. [6–8]

### Nízko-uhlíkové oceli (Mild Steels)

Jde o nízkopevnostní nízko-uhlíkové oceli s obsahem uhlíku mezi 0,015 – 0,02 hm% a s velmi nízkým obsahem legujících prvků. Jejich struktura je převážně feritická – viz obr. 4 vpravo. Obecně tyto oceli mají dobrou tvářitelnost a svařitelnost. Dnes se jako materiál pro výrobu karosérií takřka nevyužívají, a to z důvodu jejich vysoké hmotnosti. [7]

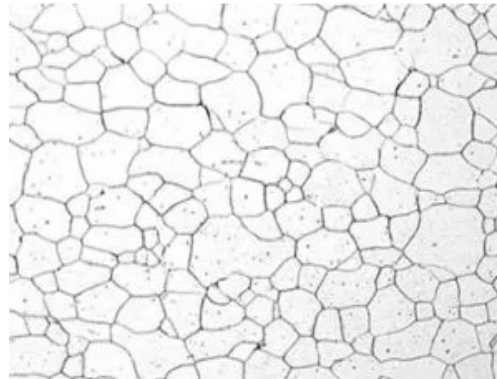


Obr. 4 Typická mikrostruktura IF oceli (vlevo) a mikrostruktura mild steel (vpravo) [7]



### **IF oceli s BH efektem (Bake Hardenable)**

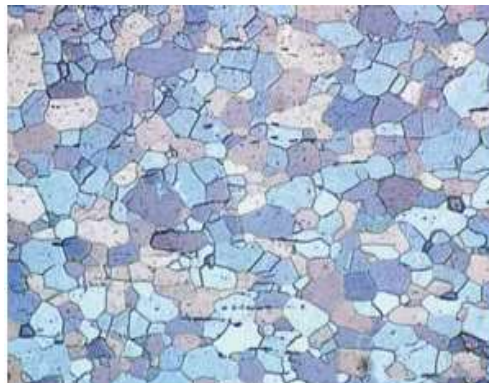
Patří sem všechny hlubokotažné oceli, u kterých dochází ke zvýšení pevnosti v důsledku zpevnění díky kombinaci deformace a umělého stárnutí. Stárnutí probíhá v rámci procesu vypalování kataforetického laku v lakovnách (nejčastěji 20 minut při teplotě 180 °C). Jde o oceli s relativně nízkým obsahem uhlíku a feritickou strukturou – viz obr. 5. Tyto oceli jsou běžně používány na panelové díly jako jsou např. díly bočních dveří, střecha a kapota. [6, 7]



*Obr. 5 Mikrostruktura oceli 180 BH [7]*

### **IF – HS oceli (Interstitial Free – High Strength)**

IF oceli jsou zpevněné přísadou Mn, Si a P v tuhém roztoku feritu. Mají jemnozrnnou feritickou strukturu. Typická mikrostruktura IF – HS ocelí je vyobrazena na obr. 6. Při porovnání s klasickou IF ocelí vykazují vyšší hodnoty mezí kluzu bez výrazného zhoršení plastických vlastností. Jsou vhodné pro tvarově složité součásti vyžadující vysokou pevnost. Někdy bývají považovány za přechod mezi nízkopevnostními a vysokopevnostními oceli. [7–9]



*Obr. 6 Mikrostruktura oceli IF 180[7]*

## HSLA oceli (High Strength Low Alloy)

HSLA oceli tvoří přechod mezi nízkopevnostními a vysokopevnostními oceli. Někdy je lze řadit už do vysokopevnostních ocelí. Lze je tedy nazývat jako pevnostní nízkolegované oceli s velmi nízkým obsahem uhlíku. Jde o mikrolegované a termomechanicky zpracované oceli. Vyrábí se válcováním za studena i za tepla a vyznačují se vysokou plasticitou. Jejich typická feritická mikrostruktura s perlitem je vyobrazena na obr. 7. Jsou vhodné i pro náročné výtažky, a to zejména kvůli své vysoké hlubokotažnosti. Při porovnání s běžnými uhlíkovými oceli vykazují HSLA oceli při stejné pevnosti nižší hmotnost asi o 20 – 30 %. Používají se na díly jako jsou výztužné díly dveří, nárazníků a na některé dynamicky namáhané díly podvozku. [7–9]



Obr. 7 Mikrostruktura oceli HSLA 340 [7]

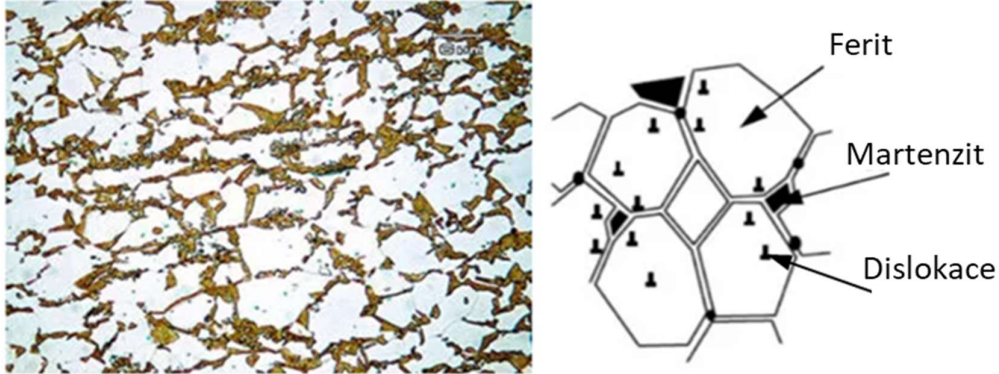
## B. Vysokopevnostní oceli

Vysokopevnostní oceli (HSS – High Strength Steel) jsou dnes nejpoužívanější konvenční oceli s vysokou pevností. Za oceli HSS jsou považovány oceli dosahující meze kluzu 550 MPa. Dále do této skupiny spadají AHSS oceli (Advanced High Strength Steel), což jsou speciální materiály vyznačující se vyšší pevností než HSS oceli. Používají se převážně na bezpečnostní a nosné prvky automobilových karosérií. Mez kluzu se u těchto ocelí pohybuje v rozmezí 180 – 600 MPa a mez pevnosti v rozmezí 500 – 1600 MPa. [7–9]

### DP oceli (Dvoufázové – Dual Phase)

DP oceli jsou oceli, v jejichž mikrostruktura se skládá z měkké feritické matrice a uvnitř této matrice se nachází tvrdé martenzitické ostrůvky – viz obr. 8. Z tohoto důvodu se tyto oceli vyznačují výbornou kombinací pevnosti a tažnosti. Navíc tyto oceli mají schopnost vysokého mechanického zpevnění, což způsobuje zvýšení meze kluzu po tváření. Tyto vlastnosti jsou způsobeny legujícími prvky jako jsou Mn, Cr, Mo, V a Ni. Dále se tyto oceli řadí do ocelí s tzv. BH efektem tzn. že při vypalování laku dochází ke zvýšení meze kluzu, a to až o 80 MPa. Tyto oceli se vyznačují vysokým

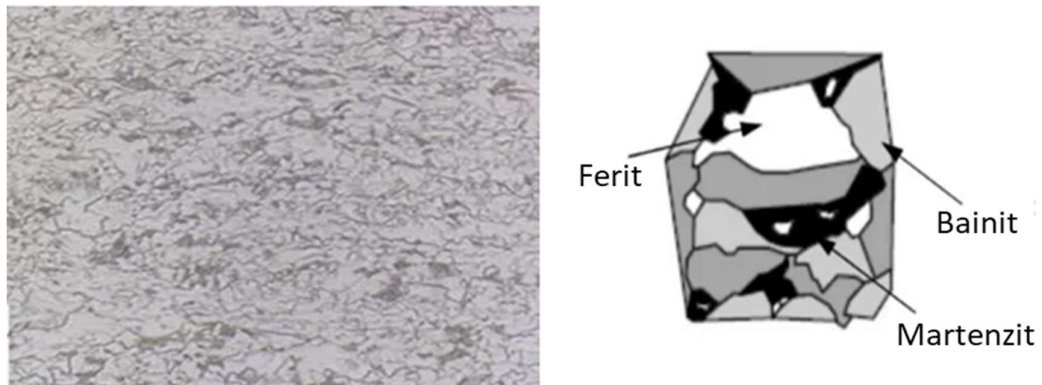
koeficientem zpevnění, vynikající odolností proti iniciaci a šíření únavových lomů a nedochází u nich k tepelnému stárnutí. Jsou typickým materiálem pro výrobu A, B, C, a D sloupků, dále pak pro prahy dveří, podélné nosníky, výztuhy střech a podlah, boční rámy podlah a přední nárazníkové konstrukce. Dříve tento materiál tvořil většinový podíl při tvorbě karosérií ze všech použitých materiálů. [7–9]



Obr. 8 Mikrostruktura DP oceli (vlevo) a schéma DP oceli (vpravo) [7]

#### CP oceli (Komplexní fáze – Complex Phase)

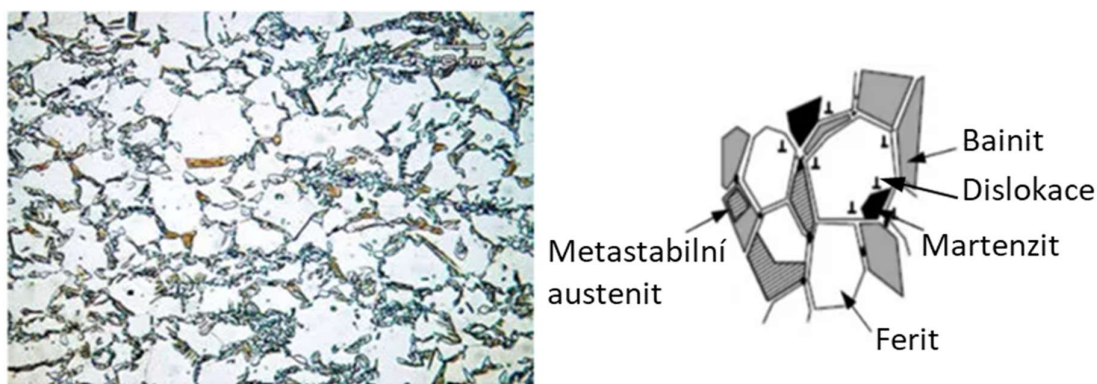
CP oceli se řadí do vícefázových ocelí obsahující mikrostrukturu s feriticko – bainitickou matricí (viz obr. 9), ve které se nachází částice martenzitu, perlitu a zbytkového austenitu. Pro vytvoření velmi jemných zrn se často používá velmi pomalá rekrystalizace. Tyto oceli se mikrolegují Ti a Nb pro vytvoření precipitačního zpevnění. Za jejich nejlepší vlastnost je považováno zachování hodnoty meze pevnosti v tahu, a to při vysoké hodnotě meze kluzu. Tyto oceli se používají na výrobu dílů karosérie jednoduchých tvarů jako jsou např. dveřní lišty a příruby sedadel. [7–9]



Obr. 9 Typická mikrostruktura oceli HDT780C (vlevo) a schéma CP oceli (vpravo) [7]

### TRIP oceli (Oceli s transformačně indukovanou plasticitou – Transformation Induced Plasticity)

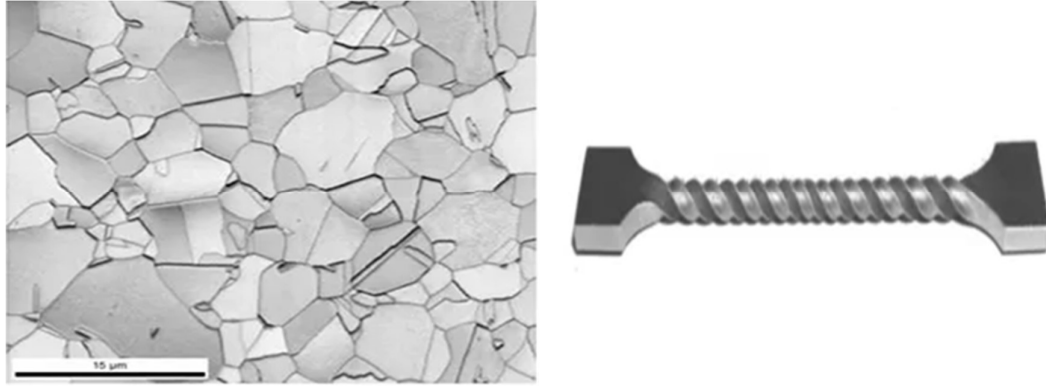
Multifázové oceli jsou oceli s převážně feritickou maticí (obr. 10) obsahující zbytkový austenit, který se v průběhu tváření dále transformuje na martenzit. Obsahují vyšší obsah C při porovnání s DP oceli, který zajišťuje stabilitu netransformovaného zbytkového austenitu. Další legující prvky jsou Si, Al, a Mn, které způsobují urychlení transformace feritu na bainit a zabraňují vzniku karbidů v oblasti bainitu. Mezi jejich vlastnosti patří vynikající kombinace pevnosti a tažnosti, vysoká absorpční energie a únavová pevnost. Tyto vlastnosti dělají z tohoto materiálu materiál vhodný na výrobu automobilových konstrukcí a bezpečnostních dílů jako jsou příčné a podélné nosníky, výztuhy pro B sloupky a nárazníky. [6–9]



Obr. 10 Mikrostruktura TRIP oceli (vlevo) a schéma TRIP oceli (vpravo) [7]

### TWIP oceli (Oceli s plasticitou indukovanou dvojčatěním – Twinning Induced Plasticity)

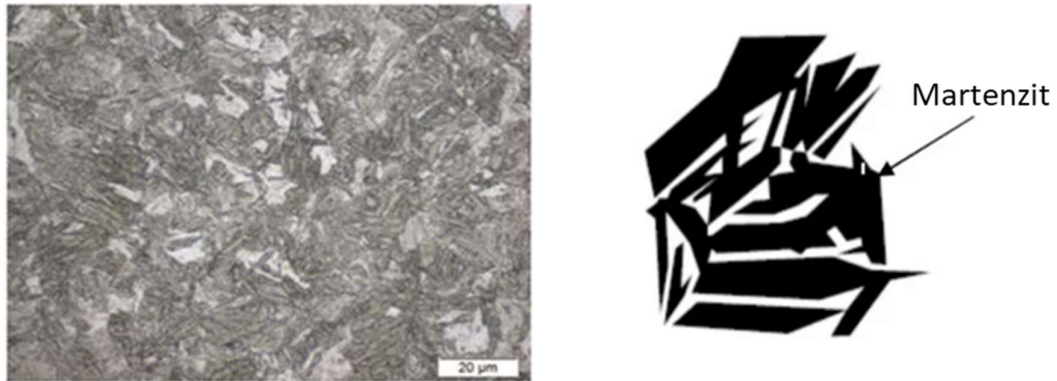
TWIP oceli jsou charakteristické tím, že jejich plastická deformace je založena na mechanismu dvojčatění, kdy plastická deformace probíhá právě pomocí tohoto efektu. Tyto oceli mají při pokojové teplotě plně austenitickou strukturu vlivem vysokého obsahu manganu. Obsah manganu se může pohybovat v rozmezí 17 – 24 hm%. Mangan zajišťuje udržení C v tuhém roztoku uhlíku. Dále se tyto oceli dolegovávají Al, který potlačuje přeměnu austenitu na nežádoucí martenzit a Si, který zvyšuje pevnost tuhého roztoku. Díky těmto legurám je matrice plně austenitická a ocel vykazuje extrémní hodnoty tažnosti při relativně vysoké pevnosti. Tato ocel umožňuje docílit vysokého stupně deformace materiálu a tím je schopna realizovat sekvenční deformační procesy. Důvodem je nízká úroveň energie vrstvené chyby. Z důvodu jejich vlastností jsou perspektivní pro automobilový průmysl. Protože na průběh TWIP efektu je potřeba velké množství energie, jsou tyto materiály využívány v deformačních zónách karosérie. Používají se tedy zejména na B sloupky a boční výztuhy karosérie. [6–9]



Obr. 11 Mikrostruktura TWIP ocel (vlevo) a deformovaná TWIP ocel (vpravo) [7]

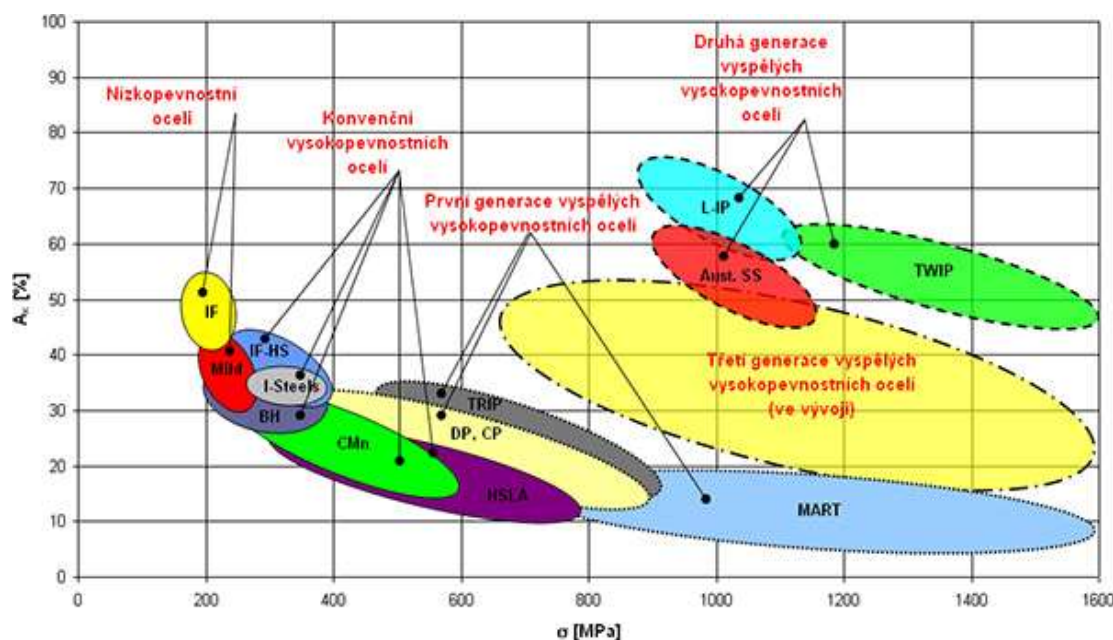
### MS oceli (Martenzitické oceli – Martensitic Steel)

MS oceli jsou tvořeny mikrostrukturou (viz obr. 12) tvořenou převážně martenzitem s velmi malým obsahem feritu a bainitu. Tato ocel je vyráběna válcováním za tepla, po kterém následuje kombinované tepelné zpracování skládající se ze zakalení, následného žíhání a opětovného zakalení. Pro zvýšení kalitelnosti se používá pečlivě zvolená kombinace legujících prvků jako je Mn, Si, Cr, Mo, B, V a Ni. Zvýšené pevnosti a tvrdosti je dosahováno větším obsahem uhlíku. Tyto oceli se používají převážně na bezpečnostní prvky se zvýšenými nároky na odolnost proti nárazům. Jsou to převážně části předního a zadního nárazníku, boční prahové výztuhy, výztuhy dveří, boční rámy karosérie a střešní příčnický. [7–9]



Obr. 12 Mikrostruktura MS oceli (vlevo) a schéma MS oceli (vpravo) [7]





Obr. 13 Porovnání celkové tažnosti a meze kluzu u jednotlivých ocelí [9]

## 2.2 Způsoby hodnocení tvářitelnosti

Jedná se o soubor zkoušek materiálů určených k vyhodnocování jejich tvářitelnosti. Tvářitelnost je jedna z nejdůležitějších vlastností materiálu z hlediska tváření ocelí, která představuje schopnost materiálu být nevratně tvářen vnějšími silami bez vzniku mikroskopického porušení tvářeného materiálu. Míru tvářitelnosti udává tzv. ukazatel tvářitelnosti. Obecně je tedy cílem, aby při plastické deformaci materiálu danou metodou tváření nedošlo k jeho porušení. Pokud má však materiál malou tvářitelnost, může během tváření dojít k jeho porušení. [10] S ohledem na zaměření této diplomové práce je největší důraz v této kapitole kladen na hodnocení tvářitelnosti pomocí FLD diagramů a na metody a způsoby jejich určení.

### 2.2.1 Statická zkouška tahem

Statická zkouška tahem je zkouška určující vlastnosti materiálu při kontinuálním zatížení za podmínek jednoosého tahu. Jde o tzv. destruktivní zkoušku, což znamená, že zkušební těleso (kruhového či obdélníkového tvaru) je zatěžováno až do jeho porušení. Celý postup a jednotlivé náležitosti statické zkoušky tahem jsou dány normou ČSN EN ISO 6892. [11, 12]

Jedním z nejdůležitějších aspektů, který je u tahové zkoušky zohledněn, je praktický přechod z pružných (vratných) do plastických (nevratných) deformací, který v realitě představuje zejména mez kluzu. Princip tahové zkoušky spočívá v jednoosém tahovém zatěžování zkušební vzorku až do jeho destrukce. [13] Průběh zkoušky je následně graficky znázorněn pomocí tří hlavních diagramů. Prvním je tzv. pracovní diagram v souřadnicích  $F - \Delta L$ .

V praxi nejpoužívanější je tzv. smluvní diagram v souřadnicích  $R - \varepsilon$ . Posledním používaným diagramem je tzv. skutečný diagram v souřadnicích  $\sigma - \varphi$ , který se využívá pro reálné výpočty. Rozdíl mezi smluvním a skutečným diagramem u tahové zkoušky spočívá v tom, že skutečný diagram je vztažen k aktuálním rozměrům vzorku v průběhu zkoušky, kdežto smluvní diagram je vztažen k počátečním rozměrům před zkouškou. [14]

Základní měřené a vyhodnocované veličiny ze statické zkoušky tahem jsou:

$F$  [N] – zatěžující síla,

$\Delta L$  [mm] – absolutní prodloužení,

$R$  [MPa] – smluvní napětí, které lze vypočítat jako (1),

$$R = \frac{F}{S_0} [MPa] \quad (1)$$

kde:  $S_0$  [ $mm^2$ ] – je počáteční průřezová plocha zkoušené délky

$\varepsilon$  [1] – poměrná deformace, kterou lze určit vztahem (2),

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} [1] \quad (2)$$

kde:  $L_0$  [mm] – je počáteční měřená délka

$\sigma$  [MPa] – skutečné napětí, které je dáno vztahem (3),

$$\sigma = \frac{F}{S} [MPa] \quad (3)$$

kde:  $S$  [ $mm^2$ ] – je aktuální plocha průřezu vzorku v průběhu zkoušky

$\varphi$  [1] – skutečná deformace daná vztahem (4).

$$\varphi = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) [1] \quad (4)$$

kde:  $L$  [mm] – aktuálně dosažená délka

Další v praxi nejvíce používané pojmy jsou z hlediska pevnostních charakteristik  $R_{p0,2}$  a  $R_m$  a z hlediska deformačních charakteristik  $A$  a  $Z$ .

**Smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$  [MPa]** – je napětí při kterém je celkové prodloužení rovno 0,2 % měřené délky. [12]

**Mez pevnosti v tahu  $R_m$  [MPa]** – určuje maximální napětí, které je materiál schopen vydržet bez jakéhokoliv porušení. [12]

**Tažnost  $A$  [1]** – jde o trvalé prodloužení měřené délky po lomu. [12]

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \quad (5)$$

kde:  $L_u$  [mm] – je konečná měřená délka po lomu

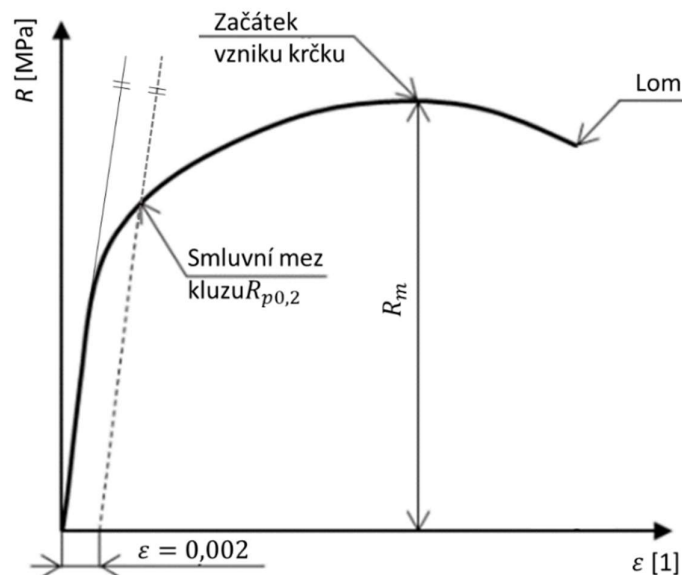
**Kontrakce  $Z$  [1]** – jedná se o největší změnu průřezové plochy, ke které došlo během zkoušky. [12]

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \quad (6)$$

kde:  $S_u$  [mm<sup>2</sup>] – je minimální průřezová plocha po lomu

### Smluvní diagram

Při měření průběhu tahové zkoušky je ze softwaru získána zatěžující síla  $F$  [N] a pomocí extenzometru je změřeno absolutní prodloužení  $\Delta L$ . Pro získání smluvního diagramu se z těchto naměřených veličin určí smluvní veličiny ( $R$  a  $\epsilon$ ) – viz obr. 14.



Obr. 14 Smluvní diagram  $R$ - $\epsilon$  [11]



Výše uvedené hodnoty jsou tzv. hlavní ukazatelé pro určení tvářitelnosti. Z praktických důvodů byly zavedeny také vedlejší ukazatelé z důvodu lepšího popsání deformačního chování materiálu. Mezi tyto veličiny se řadí především komplexní ukazatel tvářitelnosti KUT, ukazatel hlubokotažnosti UH a zásoba plasticity ZP.

**Komplexní ukazatel tvářitelnosti:**

$$KUT = A_x \cdot \frac{R_{p0,2}}{R_m} [1] \quad (7)$$

**Ukazatel hlubokotažnosti:**

$$UH = \frac{R_{p0,2}}{R_m} [1] \quad (8)$$

**Zásoba plasticity:**

$$ZP = k \cdot (R_m - R_{p0,2}) \cdot A_x [MPa] \quad (9)$$

$k$  [1] – koeficient zaplnění plochy

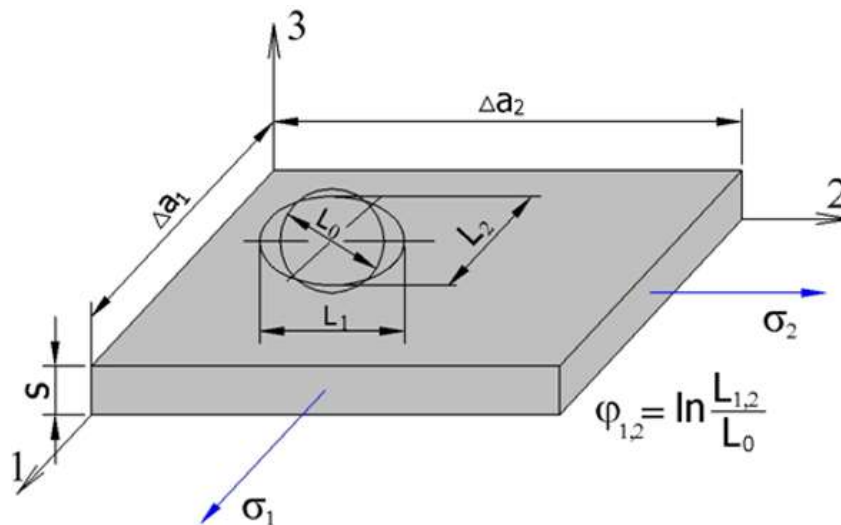
V dnešní době se již zásoba plasticity klasickým způsobem určení pomocí vztahu (9) takřka nepoužívá. Určuje se totiž převážně softwarově, a to jako plocha pod křivkou zpevnění daného materiálu.

### 2.2.2 Diagram mezních přetvoření

Pakliže je nutno provést komplexní hodnocení tvářitelností ocelových plechů a posouzení jejich lisovatelnosti daného materiálu, je nutné pozorovat mezní stavy (okamžik těsně před porušením materiálu). Tyto mezní stavy je nutné pozorovat pro různé stavy napjatosti, které se mohou během plošného tváření objevit. Výsledkem pak může být následně diagram, který pokrývá všechny tyto stavy a díky němuž bude možné určit stav bezpečného lisování daného materiálu. Tento diagram se nazývá diagram mezních přetvoření (FLD) a hranici lisovatelnosti v něm udává tzv. křivka mezních přetvoření (FLC – Forming Limit Curve). Obecným základním východiskem pro určení FLD jsou možné ztráty stability. [15–17]

### Ztráty stability v rámci plošného tváření:

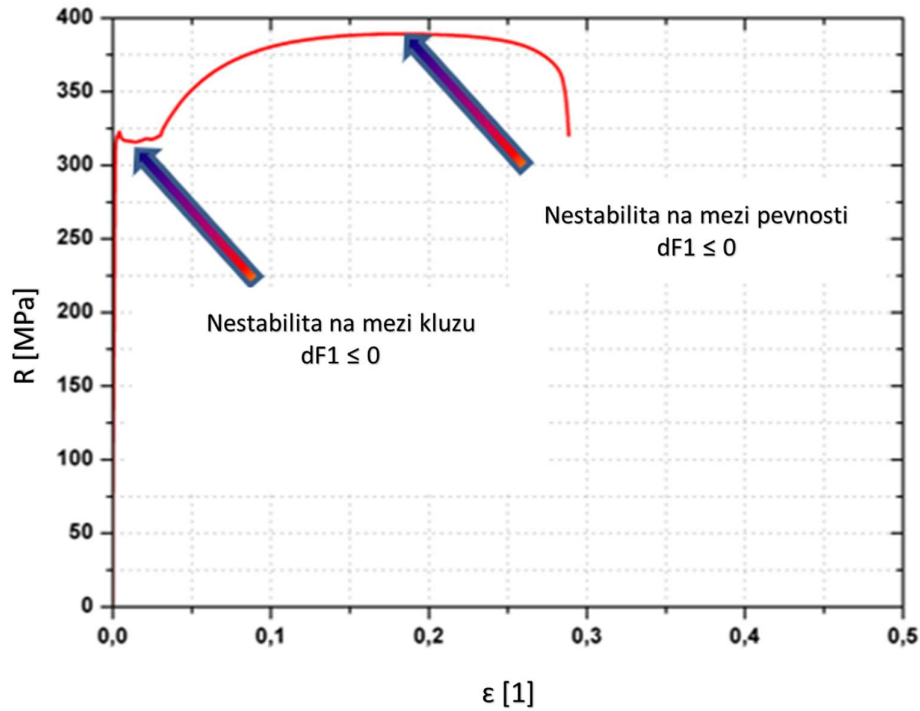
Na obr. 15 je vytknut element plošného tváření, kde dochází k zatěžování v osách a je zde vykreslen důsledek deformační odezvy. Obecně pak ztráta stability nastává, pokud v daném materiálu dojde k vyčerpání plastické schopnosti, tím pádem je materiál nucen přejít do nestabilního stavu a následně při dalším zatěžování materiálu může docházet ke vzniku lomu. Za stabilní proces tváření se považuje proces, kdy  $dF_1 > 0$  a  $dF_2 > 0$ . Nestabilní proces tváření nastává pokud  $dF_1 \leq 0$  ( $dF_2 \leq 0$ ). [16]



Obr. 15 Stabilita procesu tváření [16]

Existují tři základní stavy nestabilit v rámci plošného tváření:

- **Na mezi kluzu** – je typická pro oblast malých plastických deformací a vyskytuje se v oblasti meze kluzu. Vlivem této nestability dochází k tvorbě tzv. Lüdersových čar na povrchu plechu. [15, 16]
- **Na mezi pevnosti** – je typická pro oblast velkých plastických deformací. Z hlediska tváření jde o nejvýznamnější ztrátu stability, protože ihned po jejím dosažení nastává nebezpečí tvorby trhlin. U jednoosého tahového namáhání (statická zkouška tahem) se tento fakt projeví tvorbou lokalizovaného krčku, což znamená nehomogenitu rozložení deformace v celém měřeném objemu materiálu. [15]
- **Vybočení vlivem tlakových napětí** – při tažení výlisků se tato ztráta stability objevuje v oblasti přidržovače. Jedná se o zvlnění a odpovídá charakteru ztrátě stability při namáhání na vzpěr. Tuto ztrátu stability lze však odstranit (nebo alespoň redukovat) pomocí správně zvolené velikosti přidržovacího tlaku. [15]



Obr. 16 Nestabilita procesu tváření [16]

Pakliže chceme docílit výsledného grafického znázornění FLD diagramu, je nutné definovat jednotlivé možné veličiny vyskytující se následně na osách FLD diagramu.

#### Ukazatel stavu napjatosti $m_\sigma$ :

Jde o faktor ovlivňující schopnost materiálu být plasticky deformován. Ukazatel stavu napjatosti nabývá hodnot  $m_\sigma \in (-1; 1)$ . Pakliže platí, že hlavní normálová napětí v rovině plechu jsou  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 = 0$  a  $|\sigma_1| \geq |\sigma_2|$  a jejich odpovídající přetvoření  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ , která jsou definována jako logaritmická deformace, pak pro rovinnou napjatost platí  $\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = 1 : m_\sigma : 0$ . [15]

$$m_\sigma = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad [1] \quad (10)$$

#### Kritická intenzita přetvoření $\varphi_{ik}$ :

$\varphi_{ik}$  je intenzita přetvoření, která nastává v okamžiku dosažení mezního stavu. Je dána rovnicí (11), kde  $\varphi_{1k}, \varphi_{2k}, \varphi_{3k}$  jsou naměřené hodnoty kritických hlavních normálových přetvoření. [15]

$$\varphi_{ik} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{(\varphi_{1k} - \varphi_{2k})^2 + (\varphi_{2k} - \varphi_{3k})^2 + (\varphi_{3k} - \varphi_{1k})^2} \quad [1] \quad (11)$$

Předem zmíněné ukazatele lze následně použít jako souřadnice  $m_\sigma - \varphi_{ik}$  pro sestavení diagramu mezních přetvoření. Křivka mezních přetvoření pak odpovídá ztrátě stability na mezi pevnosti. Tento postup je však velice pracný, a proto byl vyvinut postup, kdy se využijí přímo naměřené hodnoty kritických hlavních normálových přetvoření  $\varphi_{1k}$  a  $\varphi_{2k}$ . Díky tomu vznikla závislost mezi hlavním přetvořením označovaným  $\varphi_1$  a vedlejším přetvořením  $\varphi_2$ . Tyto stavy napjatosti jsou pak charakterizovány pomocí tzv. ukazatele stavu přetvoření  $m_\varphi$ . [15]

#### **Ukazatel stavu přetvoření $m_\varphi$ :**

Jednotlivé hodnoty přetvoření způsobené působením napětí lze přímo změřit na výlisku pomocí deformační sítě a pro tyto hodnoty je pak možné spočítat ukazatel stavu přetvoření  $m_\varphi$ . Tento ukazatel pak slouží k určení konkrétního stavu napjatosti v diagramu mezních přetvoření. Výpočet je dán rovnicí (12). [15]

$$m_\varphi = \frac{\varphi_2}{\varphi_1} \quad [1] \tag{12}$$

#### **Způsoby zjišťování diagramů mezních přetvoření**

Při tvorbě FLD je obecně možné využít dvou různých postupů. První možností je využití stanovení FLD pomocí teoretického přístupu početními metodami, kde princip je založen na získání křivek přetvoření pomocí teoretického rozboru vlastností plechu. Vychází se ze vztahů odvozených z teorie plasticity, kde výsledné křivky přetvoření jsou určovány funkcí materiálových charakteristik získaných zkouškou tahem a stavu napjatosti. Metody vycházejí z různých definic dosažení vlastního mezního stavu. Pro výpočet těchto metod se zavádí spousta zjednodušení, což může vést ke zkreslení výsledku. Dále není možné určit (a pro výpočet brát v úvahu) veškeré vlivy ovlivňující vznik lokálního ztenčení materiálu. Přestože v posledních letech dochází k značnému rozvoji těchto početních metod, v praxi jsou stále více upřednostňovány metody experimentální. Druhou, v dnešní době více využívanou metodou určování FLD, je metoda experimentální. Základem těchto metod je určení mezní deformace materiálů při různém stavu napjatosti  $m_\varphi$ . Určení těchto deformací se provádí za daných teplotně rychlostních podmínek, nejčastěji v laboratoři. Postup vyhodnocení je popsán různými laboratorními zkouškami. Přehled experimentálních metod a teoretických přístupů vedoucích k získání FLD je popsán v tab. 1. [15, 16, 18]

Tab. 1 Experimentální metody a teoretické přístupy k získání FLD

Experimentální metody	Teoretické přístupy
Zkouška tahem tyčí opatřených různými vruby	Teoretické Goodwin – Keelerovy diagramy mezních přetvoření
Zkouška hydrostatická s kruhovou případně eliptickou tažnicí	Marciniak a Kucziňsky (MK) teorie
Zkouška hloubením plechů pomocí tažníků o různých poloměrech	
Nakazima test	Křivka přetvoření dle Goosche
Zkouška vypínáním tvarových nástřihů s vystřiženými kruhovými segmenty konstantního poloměru polokulovým tažníkem	

#### Přehled metod:

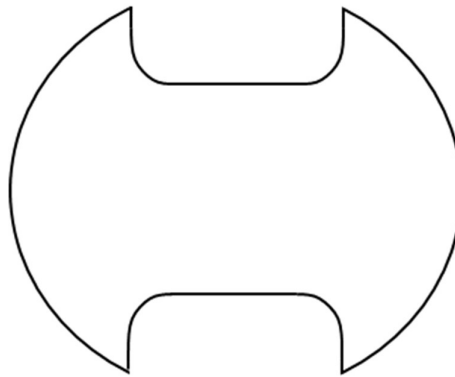
##### A) Teoretické přístupy

- 1) Teoretické Goodwin – Keelerovy diagramy mezních přetvoření** – výpočetní metoda pro určení okamžiku ztráty stability na mezi pevnosti. Pro levou větev FDM se využívá podmínka lokální ztráty stability a pro pravou větev podmínka difúzní ztráty stability. [15]
- 2) MK (Marciniak a Kucziňsky) teorie** – založena na předpokladu, že v materiálu se nacházejí výchozí nehomogenity jako je např. nerovnoměrnost tloušťky plechu. Tyto nehomogenity pak způsobují lokální ztenčení plechu. [15]
- 3) Křivka přetvoření dle Ghosche** – metoda uvažuje porušení materiálu v důsledku spojení, které vznikly kolem vměstků přítomných v materiálu. Metoda vychází ze zjištěných poznatků z mechanismu tvárného lomu. [15]

##### B) Experimentální metody

- 1) Zkouška tahem tyčí opatřených různými vruby** – různé stavy přetvoření jsou určovány pomocí různých tvarů jednotlivých vrubů. Lze naměřit pouze levou část FLD. [15]
- 2) Zkouška hydrostatická s kruhovou případně eliptickou tažnicí** – různé stavy přetvoření jsou určovány pomocí eliptických tažnic s proměnou velikostí hlavních os. Lze použít pouze pro pravou část FLD. [15]

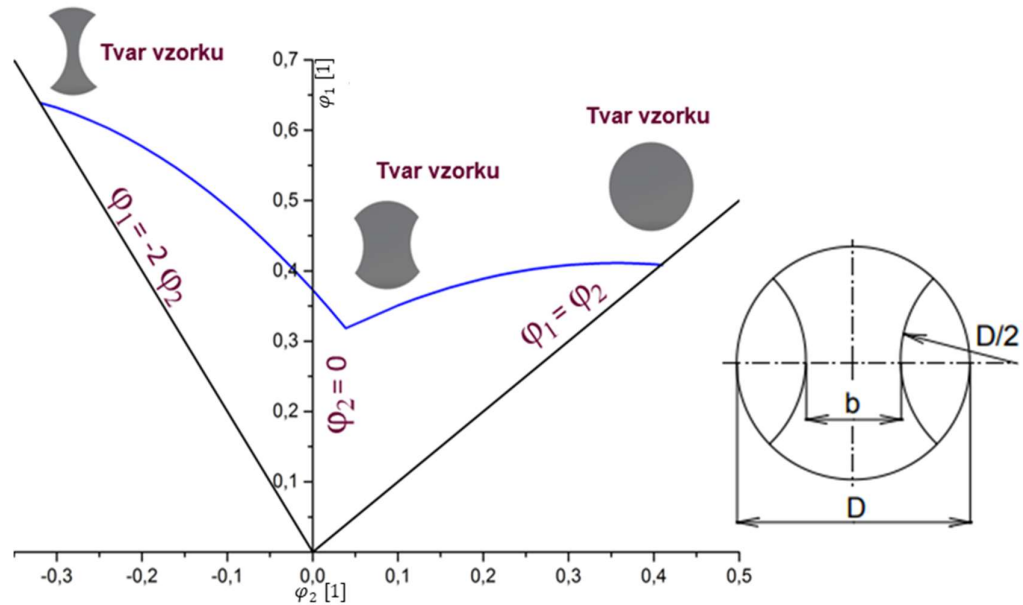
- 3) **Zkouška hloubením plechů pomocí tažníku o různých poloměrech** – princip je založen na určování stavů přetvoření pomocí tažníků různých průměrů a lze jej použít pouze pro pravou část FLD. [15]
- 4) **Nakazima test** – je kombinací všech předešlých metod pro komplexní určení celého FLD diagramu. Tato metoda je považována za nejpřesnější metodu vytváření FLD diagramů a její postup je popsán normou ISO/DIS 12004-2. Rozdíl mezi Nakazima testem a zkouškou vypínání tvarových nástřihů s vystřiženými kruhovými segmenty konstantního poloměru polokulovým tažníkem spočívá pouze ve tvaru vzorku – viz obr. 17. Jinak je postup stejný a je založen na vypínání polokulovým tažníkem až do vzniku první trhliny. Tato metoda vyžaduje vzorky s rozdílnou šířkou. [15]



Obr. 17 Tvar zkušebního tělesa pro Nakazima test

- 5) **Zkouška vypínání tvarových nástřihů s vystřiženými kruhovými segmenty konstantního poloměru polokulovým tažníkem** – tato metoda zahrnuje celý interval stavů přetvoření. Její nevýhodou je nespojitost mezních přetvoření v oblasti rovinného přístřihu. Naopak velkou výhodou je možnost použití pouze jednoho střižného nástroje pro výrobu vzorků. Tato metoda se považuje za nejvhodnější metodu pro určení FLD z hlediska její náročnosti na nástroj a přípravu jednotlivých vzorků. Pro výrobu vzorků není totiž potřeba měnit nástroj, stačí pouze měnit velikost kroku na střižném nástroji. Obecný tvar vzorku je vyobrazen na obr. 18 vpravo. Jak je vidět na obr. 18 vlevo, šířka vzorku se zvětšuje až do okamžiku, kdy je vzorek čistě kruhového průřezu. Každá šířka vzorku tedy představuje rozdílný stav přetvoření  $m_\varphi$ . Pokud je šířka vzorku  $b = D$ , pak  $m_\varphi = 1$  ( $\varphi_1 = \varphi_2$ ), což odpovídá rovnoosému dvouosému vypínání testovaného materiálu. Zde se nejčastěji využívá zkouška hydrostatickým vypínáním (HBT). Vzorky s minimální šířkou vzorku ( $b = 30$  mm) zhruba odpovídá stavu napjatosti při zkoušce tahem (hodnota  $m_\varphi = -0,5$  – oblast jednoosého tahu). Pro plynulé pokrytí celého intervalu

je zapotřebí použít minimálně 9 geometrií vzorků a pro každou geometrii je většinou používáno 5 vzorků. U hlubokotažných materiálů je však nutné dbát zřetel na vysokou anizotropii. [15] Z tohoto důvodu je směr odebrání materiálu předepsán normou, která udává směr odebrání  $0^\circ$  vůči směru válcování pro hliník a směr odebrání  $90^\circ$  vůči směru válcování pro oceli. V dnešní době se nejenom k samotnému měření, ale i k vyhodnocení FLD v naprosté většině případů využívají bezkontaktní optické metody jako byl např. systém ARGUS a ARAMIS (dnes souhrnně nazývány GOM Correlate Pro) [15, 19]



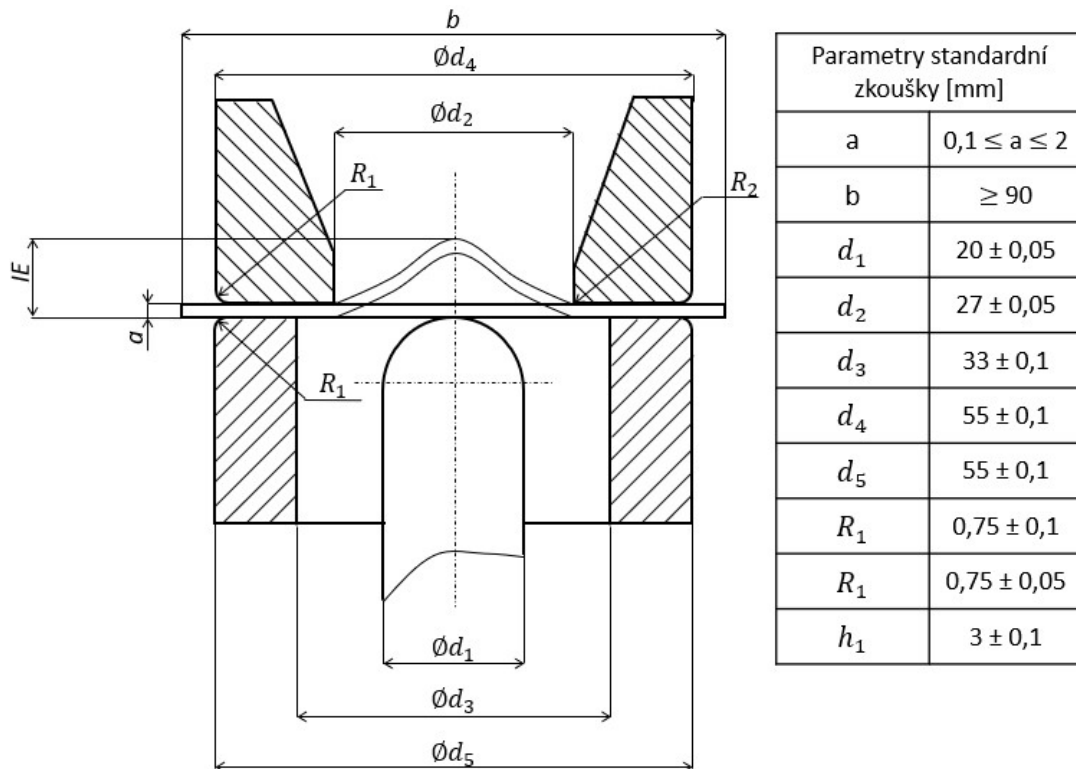
Obr. 18 Ukázka šířky vzorků pro jednotlivé části FLD (vlevo) [16] a tvar zkušebního tělesa (vpravo) [15]

### 2.2.3 Zkouška hydrostatickým vypínáním (HBT – Hydraulic Bulge Test)

Při plošném tváření plechů dochází k deformaci víceosým namáháním. Z tohoto důvodu je deformační křivka zjištěná ze zkoušky tahem (jednoosý tah) pro simulaci procesu tváření ne zcela dostačující. Pro potřebu určení chování materiálu při víceosém namáhání je z tohoto důvodu prováděna také zkouška hydrostatickým vypínáním, která odpovídá rovnoosému dvouosému vypínání testovaného materiálu. Princip zkoušky spočívá ve vypínání plného vzorku ( $b = D$ ) přes kruhovou tažnici do té doby, než se objeví trhлина. Vyhodnocovaným parametrem je maximální dosažené přetvoření. I v této oblasti se v dnešní době v naprosté většině k jejímu zpracování a vyhodnocení využívají bezkontaktní optické metody měření deformace. [20]

## 2.2.4 Zkouška hloubení dle Erichsena

Tato zkouška slouží k technologickému posouzení hlubokotažnosti tenkých plechů. Jde o jednu z nejzákladnějších technologických zkoušek tvářitelnosti, která je popsána v normě ČSN EN ISO 20482. Tato norma udává označení tloušťky plechu  $a$  [mm] a prohloubení plechu má označení  $IE$  [mm], což je hlavní kritérium pro určení hlubokotažnosti plechu. Nejprve je plech čtvercového tvaru upnut mezi přidržovač a tažnici. Pomocí tažníku ve tvaru polokoule o průměru 20 mm, který postupně zajíždí do materiálu, se uprostřed plechu vytváří prohloubení. Pohyb tažníku je zajištěn mechanickým nebo hydraulickým způsobem. Schéma této zkoušky a způsob upnutí je vyobrazen na obr. 19. Pro posouzení a vyhodnocení hlubokotažnosti je nutné, aby na povrchu plechu vznikla první trhlinka v celé tloušťce zkušebního plechu. Pokud dochází ke vzniku trhlin kulovitěho tvaru, jedná se o hlubokotažný materiál. Dále se hodnotí směr trhliny, díky kterému je možné částečně posoudit anizotropii plechu a hrubost povrchu důlku, ta je pak ukazatelem velikosti zrna plechu. Ocel s hrubšími zrny může vykazovat vysokou schopnost hlubokého tažení, avšak pro automobilový průmysl může být problém její vzhled, kde povrch karosérie musí být lesklý a hladký. K výhodám této zkoušky patří hlavně její jednoduchost a zároveň rychlá a nenáročná příprava zkušebního vzorku. Naopak velkou nevýhodou je zejména značný rozptyl jednotlivých výsledků pro jednu jakost plechu, navíc nelze určit anizotropii mechanických vlastností vzorku. [21, 22]



Obr. 19 Schéma zkoušky hloubení dle Erichsena [22]



## 2.3 Bezkontaktní optické metody měření deformace (fotogrammetrie)

Fotogrammetrie je základní princip optických měřících systémů. Jde o všeobecné metody, díky kterým je možno pomocí jednotlivých snímků získat nepřímou metodou informace o tvaru a poloze daného objektu, který je na snímku zachycen. Fotogrammetrii je možno uplatnit všude, kde lze daný objekt či proces zachytit fotoaparátem. V dnešní době je fotogrammetrie velice rozšířená jak ve strojírenství, tak v letectví, kriminalistice, medicíně, kartografii a v dalších oborech. Díky rozvoji měřící techniky a počítačů je velkou výhodou v dnešní době umožnění vyhodnocení fotografie bezprostředně po jejím pořízení (real measurement). [23–25]

### 2.3.1 Rozdělení fotogrammetrie

V této podkapitole jsou popsána jednotlivá základní rozdělení fotogrammetrie.

#### 1) Dle místa pořízení snímku a vzdálenosti (h)

- **Vesmírná** – vzdálenost  $h \geq 200$  km. Vyhodnocení je prováděno pomocí dalekohledů a satelitů.
- **Letecká** – vyhodnocování snímků z letadla (vzdálenost cca  $h \geq 300$  m).
- **Pozemní** – snímkování míst spjatých s povrchem (vzdálenost snímkování  $h \leq 300$  m).
- **Blízká** – vzdálenost snímkování  $h \leq 300$  m.
- **Makro** – makroskopické záběry.

#### 2) Dle počtu pořízených snímků současně

- **Jeden snímek**
- **Dva snímky (stereo fotogrammetrie)**
- **Více snímků**

#### 3) Dle stylu pořízení a vyhodnocení snímku

- **Snímky pořízení na měřícím stole** – nejstarší způsob vyhodnocování (od roku 1930), kde byly snímky vyhodnocovány graficky.
- **Analogová fotogrammetrie** – opticko-mechanické vyhodnocování pomocí analogových kamer.
- **Analytická fotogrammetrie** – řízené počítačové vyhodnocení snímků z analogových kamer.
- **Videogrammetrie** – využití videokamer.
- **Liniová fotogrammetrie** – přímkové vyhodnocení snímků. [23]

#### 4) Dle časové dostupnosti snímků

- **Real time** – pořízení snímku a zároveň jeho vyhodnocení v reálném čase během procesu tzn. frekvence snímání koresponduje s frekvencí změny objektu.
- **Offline** – časově oddělené vyhodnocení pořízených snímků.
- **Online** – snímání více snímků najednou a zároveň jejich vyhodnocování. Pro tento způsob se často využívají kamery přímo připojené k počítači.[23]

#### 2.3.2 Princip fotogrammetrie

Prvním přístupem je využití bodů, kde jsou nejprve pořízeny snímky označených bodů, které jsou vymezeny v daném souřadném systému referenčními body. Pořízené snímky jsou následně očíslovány a k jednotlivým snímkům jsou vypočítány souřadnice nasnímaných bodů. Poté dojde k identifikaci a měření označených bodů. Tyto body jsou pak následně porovnávány mezi jednotlivými snímky. Body, které nebyly identifikovány se pro výpočet nepoužívají a jsou tedy z výpočtu odstraněny. Dochází k vytvoření 3D souřadnic bodů, které jsou následně použity pro numerické zpracování a následně grafické vyhodnocení zkoumaných charakteristik.

Druhou možností je na zkoumanou plochu nastříkat tzv. patern. To je nástřík, který se skládá z bílého podkladu a na něm jsou černou barvou nastříkané malé kapičky černé barvy (lze i obráceně). Následně je v daném softwaru nastavována velikost tzv. fazetek. Fazetka je čtvercový útvar, kde hrana čtverce je udávána v pixelech a velikost této hrany je nastavována uživatelem. Tyto fazetky jsou poté rozloženy na zkoumanou plochu s daným překrytím. V každé fazetce pak systém vyhodnocuje poměr bílá/černá a je jí tedy přiřazena charakteristická hodnota podle stupně šedi. Podle těchto fazetek, které jsou určeny charakteristickou hodnotou stupně šedi, jsou v dalších snímcích vyhodnocovány změny poloh jednotlivých fazetek a tyto změny se následně používají pro numerické a grafické vyhodnocení pomocí softwaru. V případě 3D měření v prostoru je nutné použít minimálně dva překrývající se snímky. Pokud by byl použit pouze jeden snímek, tak z tohoto snímku je možné určit pouze 2D souřadnice. Pro 3D prostor je měřící předmět zobrazen současně na obou snímcích, kde z každého snímku je pak možné určit jeho 3D polohu. Jak již bylo popsáno v kapitole 2.3.1, lze fotogrammetrii rozdělit dle zpracování snímku, a to na analogové, analytické a digitální metody. V dnešní době dochází nejvíce k rozvoji a využívání digitálních metod. Důvodem je technický rozvoj, kde dochází k neustálému zlepšování počítačové a měřicí techniky. Jedno z využití fotogrammetrie v automobilovém průmyslu je měření deformace plechů a její využití např. při tvorbě FLD diagramů. V dnešní době je jedním z nejvíce využívaným optickým systémem pro měření deformace systém GOM Correlate Pro od německé firmy Zeiss GOM Metrology. [23–25]

## Kódované a nekódované body

Pro identifikaci bodů systémem se můžeme setkat s dvěma typy bodů. Prvním typem bodů jsou body kódované (obr. 20 vlevo), které jsou systémem automaticky identifikovány a k těmto bodům jsou přiřazovány jedinečná označení. Kódované body jsou označeny binárním kódem, který se nachází v kruhu okolo samotného bodu. Tyto body jsou využívány zejména při kalibraci bezkontaktního optického systému. Druhými body jsou body nekódované (obr. 20 vpravo), u kterých je jejich identifikace založena na poloze jejich umístění. Výhodou těchto bodů je snadná produkce a malá velikost zabrané plochy. Tyto body jsou používány pro samotné měření např. pro měření v rámci kinematiky. [24, 25]



Obr. 20 Kódované (vlevo) a nekódované (vpravo) body [23]

### 2.3.3 Optické měřicí systémy

S ohledem na použití v experimentální části a zároveň z důvodu zastoupení v praxi v ČR jsou veškeré níže popsané systémy od německé firmy Zeiss GOM Metrology. V dnešní době jsou již všechny dále zmíněné metody shrnuty do jednotného systému nazývaného GOM Correlate Pro. Vzhledem k tomu, že k této změně došlo v nedávné době a z důvodu stálého výskytu starého značení v praxi, jsou v této kapitole popsány jednotlivé bezkontaktní optické metody dle starého rozdělení.

#### A) Systém PONTOS

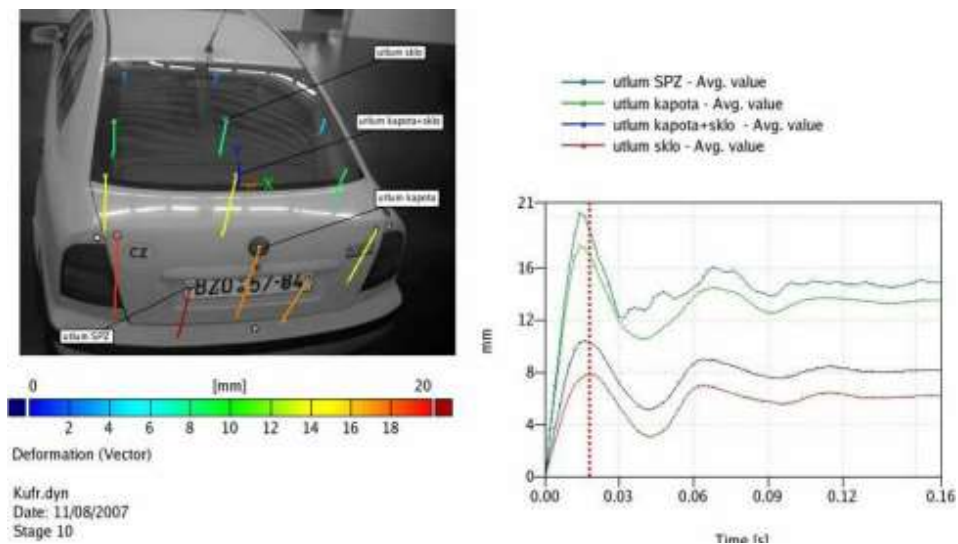
PONTOS je bezkontaktní optický 3D měřicí systém založený na zkoumání bodů. Slouží pro analýzu, vyhodnocení a dokumentaci deformace, pohybu a dynamického chování měřeného objektu. PONTOS využívá softwaru Tritop. Pro lepší viditelnost při vysokých frekvencích snímání je využíváno reflexní měření bodů. Jak je možné vidět na obr. 21, kruhově postavené nasvícení slouží k zajištění dostatečného osvětlení. Na zkoumaný objekt jsou umístěny jednotlivé body, které

mohou být magnetické nebo samolepící. Princip je založen na snímání objektu pomocí systémů kamer. Během procesu dojde ke snímání jednotlivých bodů, u kterých dochází ke změně polohy v důsledku zatížení. Následně dojde k softwarovému vyhodnocení a porovnání 3D souřadnic jednotlivých bodů. [23, 24]



Obr. 21 Dvojice kamer systému PONTOS [23]

Nejčastěji se systém PONTOS v praxi využívá pro měření dynamického chování dílů (např. útlum pátých dveří automobilu – viz obr. 22), pro crash testy, drop testy a vibrační testy k určování deformace při aerodynamických zatíženích atd. [23]



Obr. 22 Útlum pátých dveří Škoda Octavia [23]

## B) Systém ARGUS

ARGUS je bezkontaktní optická 3D metoda pro měření analýzy a deformace po procesu tváření. Tato metoda využívá fotoaparát s vysokým rozlišením – viz obr. 23. Pro snímání je nutné nejprve na povrch objektu elektrochemicky nebo laserem nanést síť měřících bodů. Tato síť je po tváření identifikována, změřena a následně vyhodnocena. Díky tomu, že je pro tento způsob využíván kompaktní fotoaparát je tato metoda nezávislá a je možné ji použít jak na malé, tak na velké výlisky o velikosti až několika metrů. Hlavními aplikacemi tohoto systému jsou zjišťování kritických oblastí, řešení komplexních problémů tváření, optimalizace tvářecího procesu, ověřování nástrojů, ověřování a optimalizace numerických simulací. ARGUS dále umožňuje import CAD souborů, který umožňuje správně nastavit měření na souřadný systém. [26]



*Obr. 23 Fotoaparát využívaný při metodě ARGUS [26]*

## C) Systém ARAMIS

Jde o bezkontaktní optický systém, který využívá principu digitální korelace obrazů (DIC). Díky DIC je možné tímto systémem měřit jakýkoliv druh materiálu. Umožňuje celoplošnou analýzu deformace povrchu a zároveň i analýzu pouze v diskrétních bodech. Princip spočívá ve fotogrammetrické korelaci zobrazení. Dochází ke stanovení deformace na základě změny polohy sledovaných bodů vlivem působení zatížení. Maximální rychlost snímání je cca 8 000 snímků za sekundu pro ARAMIS High Speed (systém vhodný jak pro pomalé statické zkoušky, tak i pro rychlé dynamické zkoušky – např. rázová zkouška). Výstupem je barevná mapa rozložení deformací na zkoumaném objektu. Tento způsob umožňuje propojení několika systémů ARAMIS dohromady, což nachází uplatnění např. u měření rotačních součástí. Mezi hlavní přednosti patří možnost měřit objekty velikosti 1 až 1000 mm, dále velký rozsah měřené deformace, jednoduchá příprava nástřikového paternu na povrchu a vysoká hustota naměřených dat. Další velkou výhodou je, že se jedná o mobilní systém. Lze jej tedy převážet automobilem na místa, kde je potřeba měřit. [24, 27]

## Hlavní druhy systémů ARAMIS

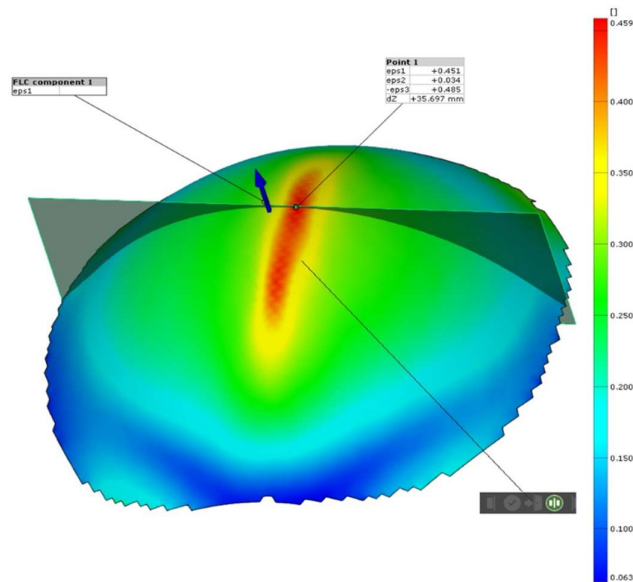
1) **ARAMIS 4M** – systém určený pro měření deformace v případech nutností vysokého rozlišení a rychlosti kamer. Za plného rozlišení je tento systém schopen snímat vzorkovací frekvencí 55 Hz a při snížené rozlišovací schopnosti frekvencí až 440 Hz. Při vysokém rozlišení je tedy možné snímat středně rychlé děje. [24]

2) **ARAMIS 5M** – systém využívající CCD čipů s vyšší rozlišovací schopností. Rozlišení čipu je 5 000 000 bodů a frekvence snímkování je 15 Hz pro plné rozlišení. Používá se pro měření velkých objektů s vyšším rozlišením detailů. Ukázka výstupu z ARAMISU je na obr. 25. [24]

3) **ARAMIS HS** – systém pro měření velmi rychlých dynamických jevů. Při plném rozlišení lze snímat frekvence snímkování cca 500 Hz a při sníženém rozlišení je možné dosáhnout frekvence snímkování až 8 kHz. Rozlišení čipu je přibližně 1 300 000 pixelů. [24]



Obr. 24 Systém kamer ARAMIS [27]



Obr. 25 Rozložení deformace  $\varphi_1$  na vzorku

### 3 Experimentální část

Úkolem experimentální části bylo vytvořit diagram mezních přetvoření pomocí normované metody ISO/DIS 12004 – 2 a vůči této metodě provést nové, zatím nenormované metody vyhodnocení FLD založené na časové změně velikosti deformace. Tyto metody se v posledních letech jeví jako nové možnosti určení FLD s určitými výhodami (např. menší snížení mezních hodnot deformací) a uvažuje se u nich možná normalizace. Experiment byl proveden na hlubokotažné oceli DC05. Pro získání potřebných dat k následnému vyhodnocení experimentu byla provedena zkouška vypínání tvarových nástřihů s vystřiženými kruhovými segmenty konstantního poloměru polokulovým tažníkem. Pro snímání hodnot a následné vyhodnocení byl použit bezkontaktní optický systém GOM Correlate Pro (v roce 2021 došlo ke sloučení systémů ARAMIS, ARGUS a PONTOS do jednoho nazývaného jako GOM Correlate Pro). Tento optický systém je součástí softwaru GOM Software 2021, do kterého spadá například ještě systém GOM Inspect nebo GOM Volume.

#### 3.1 Cíle experimentální části

U tvorby FLD diagramů dochází stále k určitému vývoji ať už z hlediska měření, ale také při jeho vyhodnocování. S tímto faktem přichází také nové a nové způsoby vyhodnocení naměřených dat pro následné získání FLD diagramů. Z tohoto důvodu bylo cílem tohoto experimentu naměření a vyhodnocení FLD diagramu běžným již normovaným způsobem, který je dán dle normy ISO/DIN 12004 – 2. Jedná se o vyhodnocení, kdy jsou jednotlivé hlavní deformace ( $\varphi_1$  a  $\varphi_2$ ) měřeny po délce řezu (tzv. section metod). Dále bylo provedeno vyhodnocení, kde se změna  $\varphi_1$  sleduje v závislosti na čase (tzv. time-dependent methods), tedy metodou vyhodnocení založenou na časové změně velikosti deformace (gradientu deformace). Tento způsob ještě není aktuálně normovaný, ale jeho norma by mohla vyjít v platnost v průběhu dalších let. Nakonec bylo provedeno porovnání těchto čtyř FLD diagramů, určení jejich odlišností, výhod a nevýhod jednotlivých způsobů vyhodnocení a také bylo provedeno doporučení pro další výzkum.

#### 3.2 Použitý materiál

Pro tento experiment byl použit materiál DC05 + ZE 75/75 BP – označení dle normy VW 50065. Jedná se o nelegovanou jakostní hlubokotažnou ocel. Tyto oceli (obecně označeny jako DC05) jsou jedny z nejvyužívanějších ocelí pro hluboké tažení. Oceli s tímto označením vynikají vysokou tažností a to až 45 %, jemnozrnnou strukturou a úzkým rozptylem mechanických vlastností. Jsou široce využívány v automobilovém průmyslu – např. pro různé části karosérie automobilu. Dále jsou používány pro kolejová vozidla, v letectví atd. Předepsané chemické složení dle normy VW 50065 je ukázáno v tab. 2. a předepsané základní mechanické hodnoty jsou zobrazeny v tab. 3.

Tab. 2 Tabulka předepsaného chemického složení oceli DC05

Materiál	C [hm%]	Si [hm%]	Mn [hm%]	P [hm%]	S [hm%]	Al [hm%]	Ti [hm%]
DC05	≤ 0,06	≤ 0,50	≤ 0,40	≤ 0,025	≤ 0,025	≤ 0,010	≤ 0,30

Tab. 3 Tabulka předepsaných základních mechanických vlastností oceli DC05

Materiál	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_{80mm}$ [%]
DC05	max 180	270 – 330	≥ 39

Rozbor značení: DC05 + ZE 75/75 BP

Samotné označení v sobě skrývá více informací o daném materiálu, kde:

- D – ploché ocelové výrobky určené k tváření za studena,
- C – válcováno za studena,
- 05 – jakost oceli,
- 75/75 – elektrolyticky nanášený ochranný zinkový povlak z obou stran  
(předepsané vlastnosti tohoto povlaku – viz tab. 4),
- B – předepsání lepšího povrchu,
- P – fosfátovaný povrch.

Tab. 4 Předepsané hodnoty elektrolyticky nanášeného ochranného zinkového povlaku

Povrch	Hmotnost nátěru [g/m <sup>2</sup> ]	Tloušťka [μm]	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]
ZE 75/75	47 – 61	6,6 – 8,6	7,1



### 3.3 Statická zkouška tahem

Statická zkouška tahem byla provedena za účelem získání a zároveň ověření základních mechanických vlastností zkoušeného materiálu DC05 + ZE 75/75 BP (dále již pouze DC05). Zkouška byla provedena dle všech náležitostí normy ISO 6891 – 1. Pro zahrnutí vlivu anizotropie byly vzorky odebrány ve směru 0 °, 45 ° a 90 ° vůči směru válcování.

#### 3.3.1 Postup zkoušky

Pro statickou zkoušku tahem byla vyrobena zkušební tělesa dle normy ISO 6891 – 1. Tyto vzorky byly vyrobeny technologií stříhání. Následně byly změřeny šířky a tloušťky jednotlivých vzorků. Tloušťka byla změřena pomocí úchylkoměru MITUTOYO ID – H0530 a šířky vzorků byly změřeny pomocí posuvného měřítka MITUTOYO CD – 15 DCX.

Z důvodu následného statistického vyhodnocení bylo připraveno a následně změřeno pět zkušebních vzorků pro každý směr. Zkouška byla provedena na trhacím stroji TIRA Test 2300 (obr. 26). Ovládání stroje, následné ukládání dat a vytváření protokolů o zkoušce je zajištěno pomocí softwaru LabNet v.4. Pro měření bylo nejprve nutné do programu definovat jednotlivé parametry, jako jsou velikost předpětí pro vyrovnání vzorku, následnou prodlevu při dosažení předpětím a velikost průřezu vzorku. Rychlost posuvu byla zvolena s ohledem na hlubokotažný materiál tak, že do dosažení hodnoty průtahoměru 600  $\mu\text{m}$  byla rychlost posuvu příčnicku 1 mm/min a po překročení této hodnoty došlo k nárůstu rychlosti na 15 mm/min. K ukončení zkoušky došlo po dosažení poklesu síly o 40 % vůči maximální naměřené síle  $F_{\text{max}}$ .

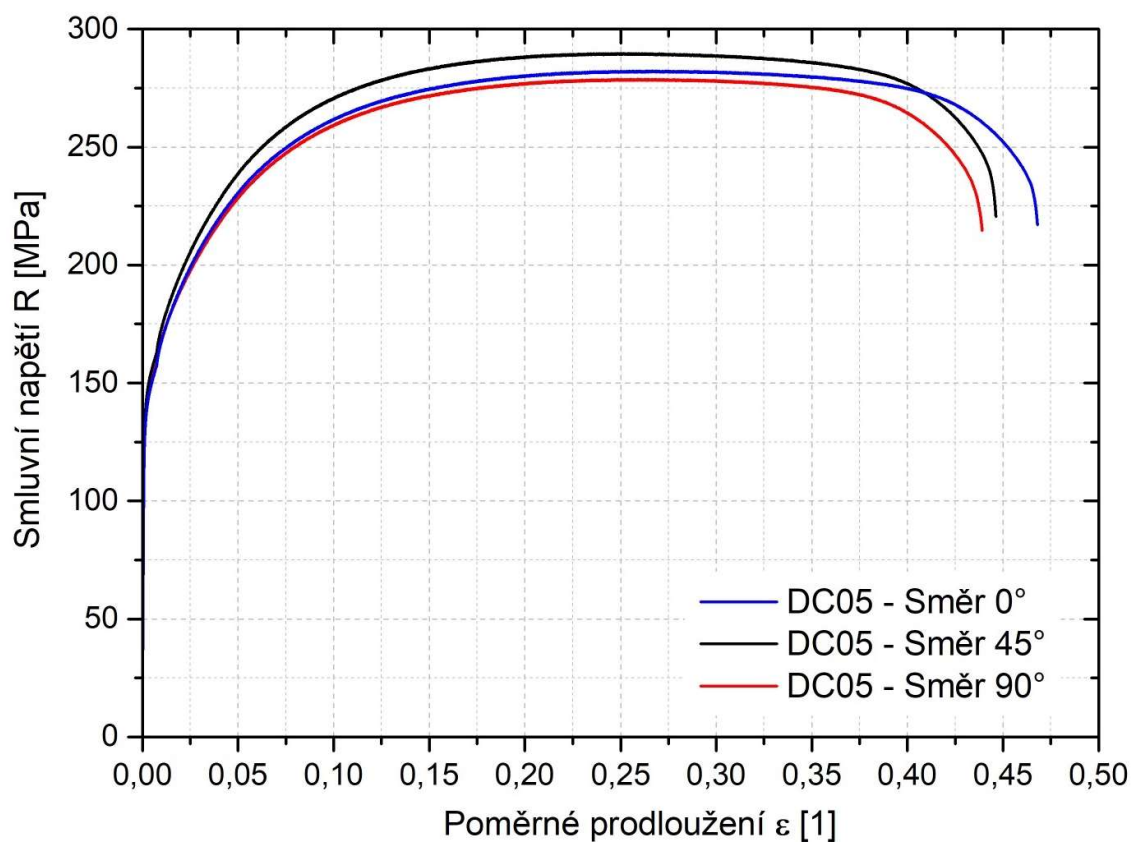


Obr. 26 Trhací zařízení TIRA Test 2300

Data získaná ze zkoušky tahem byla následně z programu LabNet v.4 exportována do softwaru OriginPro. V tomto softwaru byla následně data vyhodnoceny. Jednotlivé průměrné hodnoty mechanických vlastností materiálu DC05 jsou v tab. 5 a grafické porovnání křivek zpevnění ze zkoušky tahem pro zobrazení anizotropie materiálu je vyobrazeno na obr. 27. V tomto grafu se nachází všechny tři směry (0 °, 45 ° a 90 °) testovaného materiálu.

Tab. 5 Průměrné hodnoty mechanických vlastností materiálu DC05

Směr odebrání vzorku	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_g$ [%]	$A_{80mm}$ [%]
0 °	133,2 ± 2,5	287,0 ± 1,8	27,21 ± 0,46	46,56 ± 0,93
45 °	142,8 ± 0,5	296,3 ± 0,1	25,42 ± 0,49	44,25 ± 0,1
90 °	139,5 ± 0,3	285,5 ± 0,3	26,52 ± 0,24	45,57 ± 0,42



Obr. 27 Graf tahové zkoušky materiálu DC05 pro různé směry odebrání vzorku

### 3.4 Tvorba FLD

Pro určení FLD byla naměřena data pomocí zkoušky vypínání tvarových nástřihů s vystřiženými kruhovými segmenty konstantního poloměru polokulovým tažníkem. Pro měření deformace při této zkoušce byl použit optický systém GOM Correlate Pro. Naměřená data byla pro porovnání vyhodnocena jak ručním způsobem (dále označeno jako 1. a 2. vlastní metoda), tak zároveň pomocí softwaru GOM Software 2021 (dále označeno již pouze jako metoda GOM Correlate).

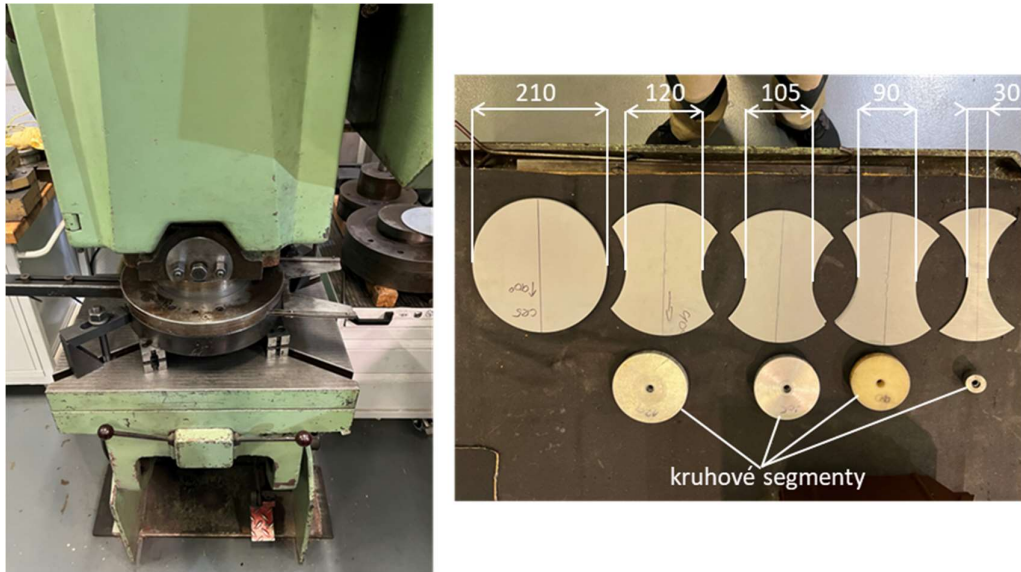
#### 3.4.1 Příprava vzorků pro měření

Pro provedení zkoušky vypínání tvarových nástřihů s vystřiženými kruhovými segmenty konstantního poloměru polokulovým tažníkem byly použity vzorky s pěti různě vystřiženými kruhovými segmenty. Jednalo se o vzorky s šířkou tzv. můstku  $b = 30$  mm,  $b = 90$  mm,  $b = 105$  mm,  $b = 120$  mm a  $b = 210$  mm (poslední označovány jako HBT). To znamená, že pro tento experiment bylo použito pět druhů geometrií a od každé geometrie (kromě vzorků HBT) byly změřeny čtyři vzorky. Vzorky HBT byly z důvodu časové náročnosti měření změřeny pouze dva. Postup přípravy jednotlivých vzorků byl následující. Nejprve byly z tabule plechu na mechanických nůžkách MS2004 (obr. 28 vlevo) nastříhány pásy plechů o šířce 217 mm (obr. 28 vpravo).



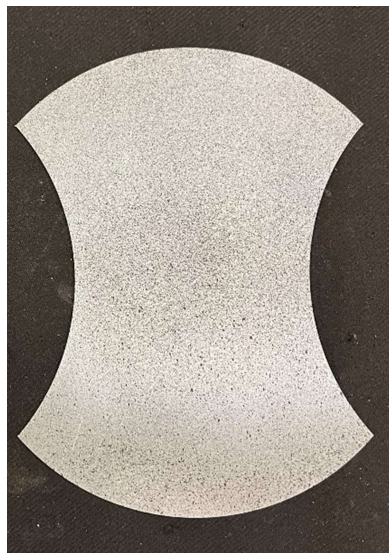
Obr. 28 Mechanické nůžky MS2004 (vlevo) a nastříhané pásy plechů (vpravo)

Z takto nastříhaných pásů plechu byly na výstředníkovém lisu LEN – P 40 (obr. 29 vlevo) pomocí střížného nástroje vytvořeny jednotlivé geometrie vzorků – viz obr. 29 vpravo. Střížný nástroj na tomto lisu je konstruovaný tak, aby bylo možné do nástroje namontovat kruhový segment (doraz) o daném poloměru (obr. 29 vpravo) pro zajištění různých tvarů vzorků, tedy vzorků kruhového tvaru s různým poloměrem tohoto kruhového segmentu. Tyto vzorky byly následně připraveny k vytvoření černobílého paternu na povrchu vzorku.



Obr. 29 Mechanický lis LEN – P 40 se střížným nástrojem (vlevo) a jednotlivé tvary vzorků s dorazy (vpravo)

Následně bylo nezbytné vytvořit nepravidelný (stochastický) černobílý patern na povrchu vzorku. Z důvodu snímání bezkontaktním optickým systémem spočíval postup tvorby tohoto paternu nejprve v dostatečném odmaštění vzorků. Poté byla pomocí spreje nanесena celistvá tenká vrstva bílé matné barvy, která se nechala zaschnout. Na tuto zaschlou vrstvu bílé barvy se aplikovala černá barva tak, aby vznikl jemný patern černé matné barvy na podkladové bílé barvě (viz obr. 30). Během přípravy bylo nutné zajistit, aby se takto připravované vzorky nenechaly přeschnout, jelikož je nutné, aby při zkoušce nedocházelo k praskání či odrolování paternu. Pokud by k tomuto docházelo, byla by zkouška neplatná.



Obr. 30 Připravený vzorek pro měření (geometrie 105 mm)



### 3.4.2 Postup měření při zjišťování FLD

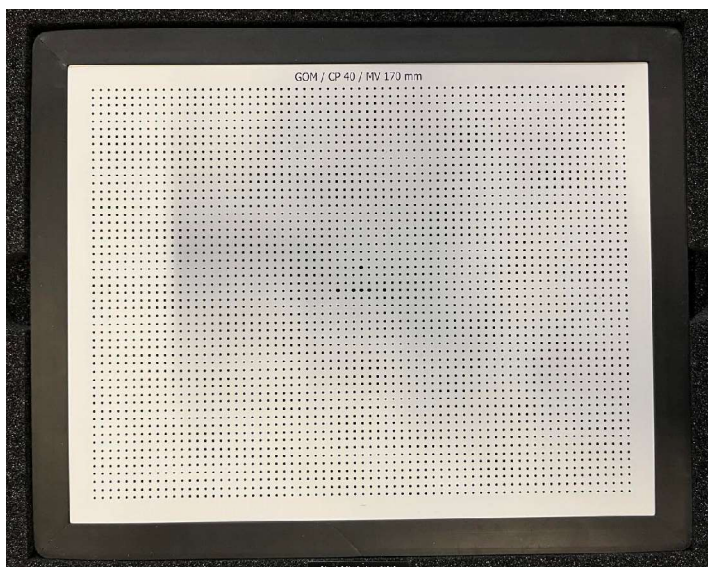
Pro získání dat byla provedena zkouška vypínání tvarových nástřihů s vystřiženými kruhovými segmenty konstantního poloměru polokulovým tažníkem. Zkouška probíhala na hydraulickém dvojčinném lisu CBA 300/63 (obr. 31 vlevo), na kterém byl nainstalován optický měřicí systém GOM Correlate Pro. Před vlastním měřením bylo nejprve nutné připevnit a následně zapojit optický měřicí systém (obr. 30 vpravo). Následně byla provedena kalibrace tohoto měřicího systému.



Obr. 31 Hydraulický dvojčinný lis CBA 300/63 (vlevo) a měřicí systém GOM Correlate Pro (vpravo)

#### Kalibrace optického měřicího systému

Jelikož se jedná o klasický bezkontaktní optický systém, samotná kalibrace spočívala ve správném napozicování kamer a nastavení světel pro dobrou viditelnost procesu zkoušky. Dalším krokem bylo dostatečné zaostření, nastavení clon a tzv kalibrace, která byla provedena pomocí kalibrační destičky GOM / CP40 / MV 170 mm. Kalibrační destička je zobrazena na obr. 32. Na této destičce se nacházejí různé kalibrační body, pomocí kterých je následně provedena kalibrace a to tak, že je destička naklápěna do různých směrů a úhlů. Optický systém zaznamenává body v různých polohách a následně podle záznamu určí kalibraci.



Obr. 32 Kalibrační destička GOM / CP40 / MV 170 mm

#### **Postup měření:**

Na připravené vzorky (viz kapitola 3.4.1) byla ze spodní strany (strana, na které není nanesená vrstva paternu) aplikována vrstva vazelíny, aby došlo k eliminaci tření mezi polokulovým tažníkem a zkoušeným materiálem. Následně byly takto připravené vzorky postupně vkládány do hydraulického dvojčinného lisu CBA 300/63. Po vlastním vycentrování byl vzorek sevřen pomocí dvou přidržovačů (velikost přidržovací síly byla nastavena na 120 tun). Následovalo měření, kde byl vzorek deformován pomocí polokulového tažníku a zároveň bylo zapnuto snímání děje optickým měřícím systémem GOM Correlate Pro. Rychlost polokulového tažníku byla na lisu nastavena na 1,5 mm/s. V ovládacím PC došlo k definici zkoušky – tzn. vlastní pojmenování zkoušky, nastavení frekvence snímání (FPS) a také nastavení tzv. trigrování, které spočívá v možném naprogramování doby, po kterou bude snímač nejprve snímat např. frekvenci jednoho snímku za sekundu a po určité době přepne na rychlost snímání dvanáct snímku za sekundu. Tato rychlost (12 FPS) je normou předepsaná minimální hodnota rychlosti snímání před okamžikem porušení vzorku. Zkouška byla ukončena manuálně po porušení zkušebního vzorku. Tímto způsobem byly měřeny všechny testované geometrie, kromě geometrie 210. Tyto vzorky byly měřeny pomocí tzv. HBT, u kterého je deformace vyvolána pomocí hydraulického oleje (naprostá eliminace tření).

### 3.4.3 Vyhodnocení naměřených dat

K získání diagramů mezních přetvoření byly využity čtyři různé metody vyhodnocení. Prvním a základním vyhodnocením byla běžně používaná normovaná metoda vyhodnocení pomocí řezů (tzv. section metod). Další tři metody se týkaly vyhodnocení založeného na časové změně velikosti deformace (tzv. time-dependent metod). Program GOM Software 2021 je schopen sám vyhodnotit a vytvořit diagramy mezních přetvoření, a to jak pomocí normované metody řezů, tak i určitým způsobem metodou založenou na časové změně velikosti deformace. Proto bylo jako druhý přístup zvoleno vyhodnocení, které provedl právě program GOM Software 2021 – viz. tab. 6. Poslední dvě metody byly zvoleny řešitelem DP jako vlastní modifikace metod založených na časové změně velikosti deformace. Jednotlivé způsoby vyhodnocení jsou popsány na následujících stránkách a jejich rychlý přehled je v tab. 6. Všechny tyto metody jsou ukázány pomocí vzorku označeného jako DC05\_30\_2 (druhý vzorek geometrie 30 mm). Všechny ostatní vzorky byly vyhodnoceny stejným způsobem.

Tab. 6 Metody vyhodnocování FLD použité v této diplomové práci

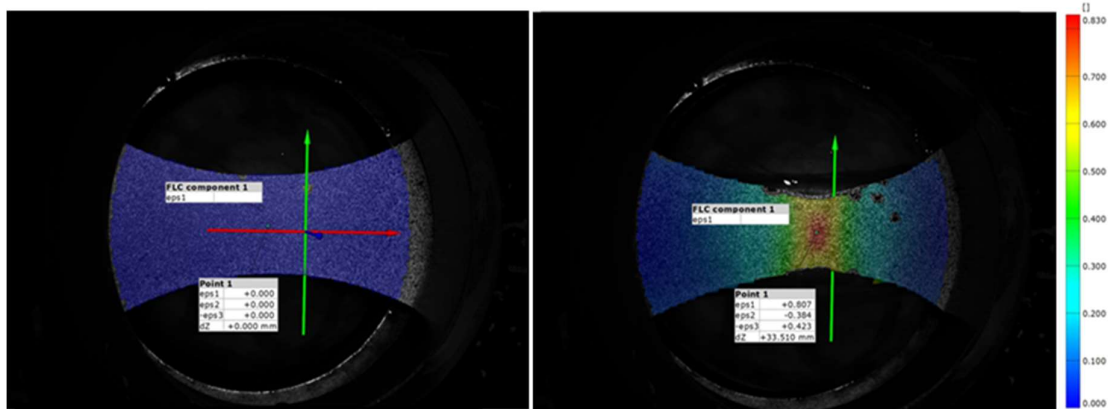
<b>Metoda řezu (section metod)</b>	<b>ISO/DIS 12004 – 2</b>	Normalizovaná metoda vyhodnocená na základě proložení řezu posledním snímkem před trhlinou	<b>A</b>
<b>Metody časové změny velikosti deformace (time-dependent methods)</b>	<b>Metoda GOM Correlate Pro</b>	Vyhodnocovací podmínky jsou dány nastavením softwaru GOM Software 2021	<b>B</b>
	<b>1. vlastní metoda</b>	Metoda založená na určení mezních hodnot deformací pomocí průsečíku přímky s osou X	<b>C</b>
	<b>2. vlastní metoda</b>	Metoda založená na určení mezních hodnot deformací pomocí průsečíku dvou přímek	<b>D</b>

#### A) Vyhodnocení provedené dle normy ISO/DIS 12004 – 2

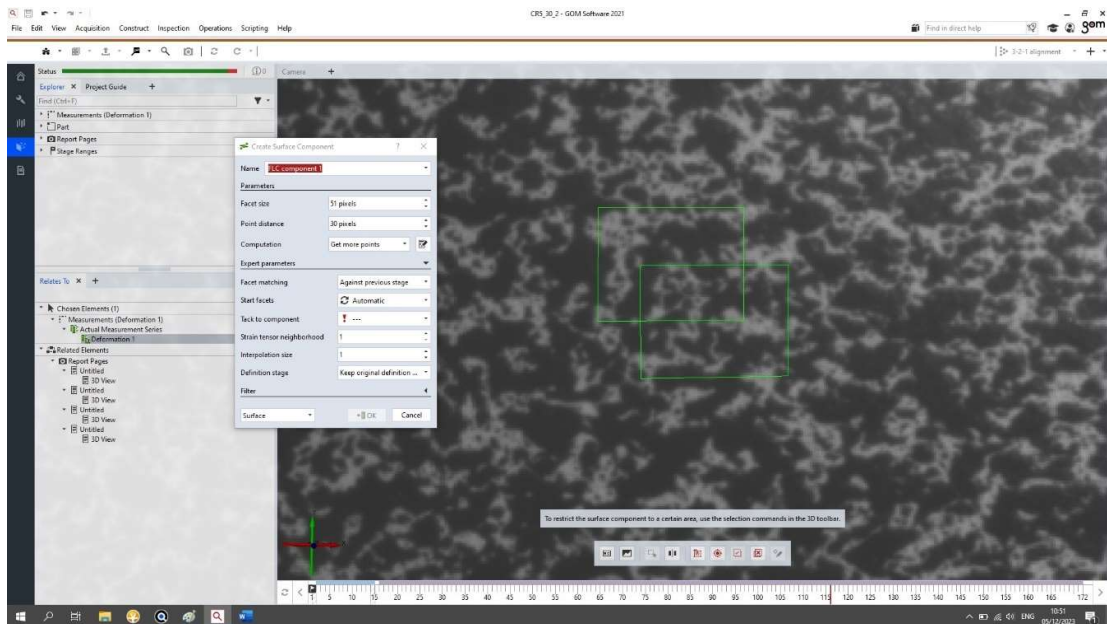
Jak již bylo napsáno, pro analýzu a získání dat byl využit bezkontaktní optický systém GOM Correlate Pro řízený pomocí programu GOM Software 2021. Tento způsob vyhodnocení je normovaný a po naměření a určité přípravě výstupních dat je tento software schopen provést vyhodnocení samostatně a ze zjištěných hodnot následně vytvoří FLD. Je však nutné zkontrolovat a potvrdit dané vyhodnocení v rámci tzv. post – processingu.

Při měření byla na vzorek nejprve v daném softwaru nanášena síť, která vychází z černobílého připraveného paternu – viz obr. 33 (vlevo). Velikost fazetek nanášené sítě byla nastavena na 51 pixelů – viz obr. 34. Následně pohybem kulového tažníku do zkoušeného vzorku docházelo

k deformaci a jejímu snímání. Ukázka rozložení hlavní deformace ( $\varphi_1$ ) před začátkem zkoušky a po dosažení limitního stavu (poslední snímek před vznikem trhliny) je vyobrazena na obr. 33.



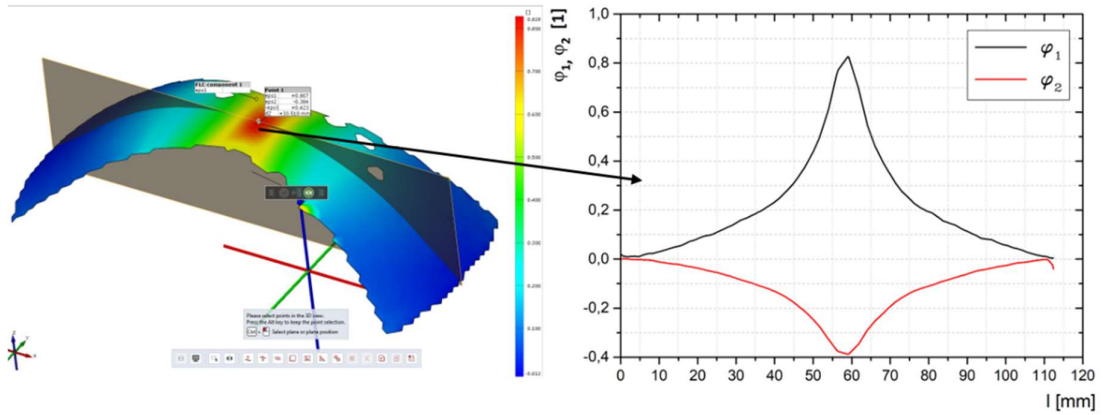
Obr. 33 Rozložení deformace  $\varphi_1$  na začátku zkoušky (vlevo) a na konci zkoušky (vpravo)



Obr. 34 Ukázka nastavení tzv. fazetek

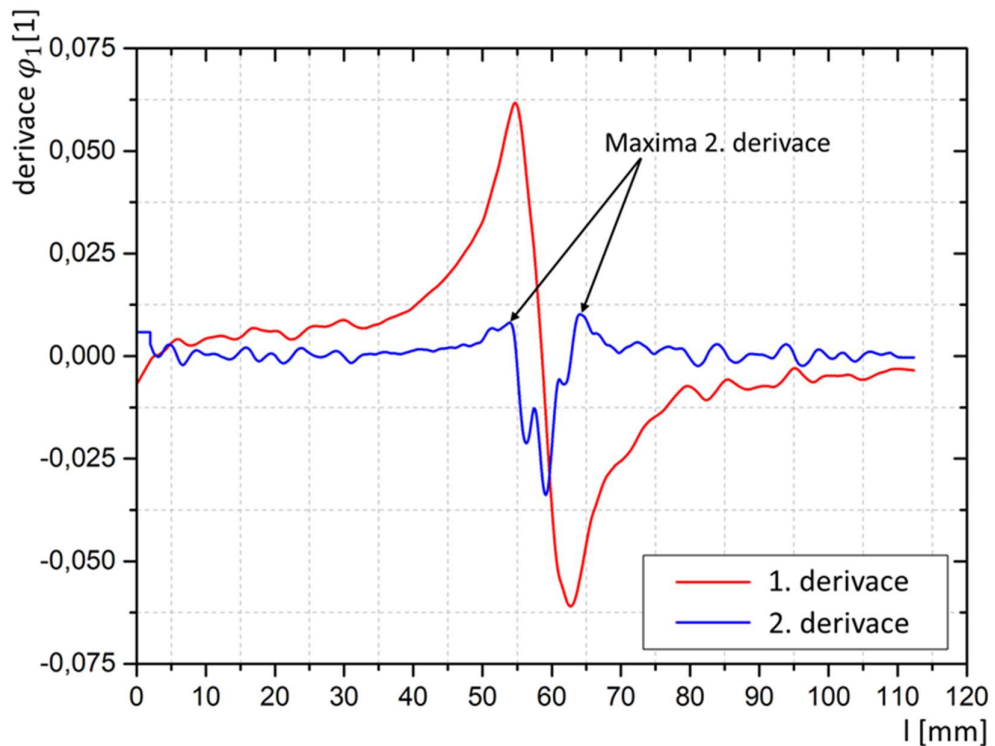
Prvním krokem po vlastním naměření bylo nalezení posledního snímku před porušením vzorku. Tento snímek byl stanoven jako referenční a následně byl pomocí daného scriptu v softwaru vyhodnocen. Postup tohoto vyhodnocení spočívá tedy ve vybrání posledního snímku před trhlinou, kterým se prokládá řez kolmo na trhlinu. Následuje možné zobrazení hodnot  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$  po délce tohoto řezu – viz obr. 35.





Obr. 35 Rozložení deformace  $\varphi_1$  na vzorku (vlevo) a rozložení deformací  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$  podél řezu (vpravo)

Pro tento získaný diagram (obr. 35 vpravo) je následně nutné provést první a druhou derivaci hlavních deformací  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$  podle délky  $l$  [mm] (obr. 36). Druhá derivace slouží pro určení inflexních bodů, které jsou zjištěny pomocí maxim získaných ze druhé derivace – viz obr. 36. Na základě těchto maxim lze pak stanovit velikost oblasti ( $w$ ), která slouží k následnému proložení inverzní paraboly. Tento postup je nutné provést stejným způsobem i pro křivku  $\varphi_2$ . Z takto vytvořených grafů jsou následně určeny inflexní body. Jedná se o dva inflexní body pro křivku  $\varphi_1$  – tedy body  $\varphi_{1l}$  a  $\varphi_{1r}$  a dva inflexní body pro křivku  $\varphi_2$ , a tedy body  $\varphi_{2l}$  a  $\varphi_{2r}$ .



Obr. 36 Derivace rozložení deformace v řezu pro  $\varphi_1$

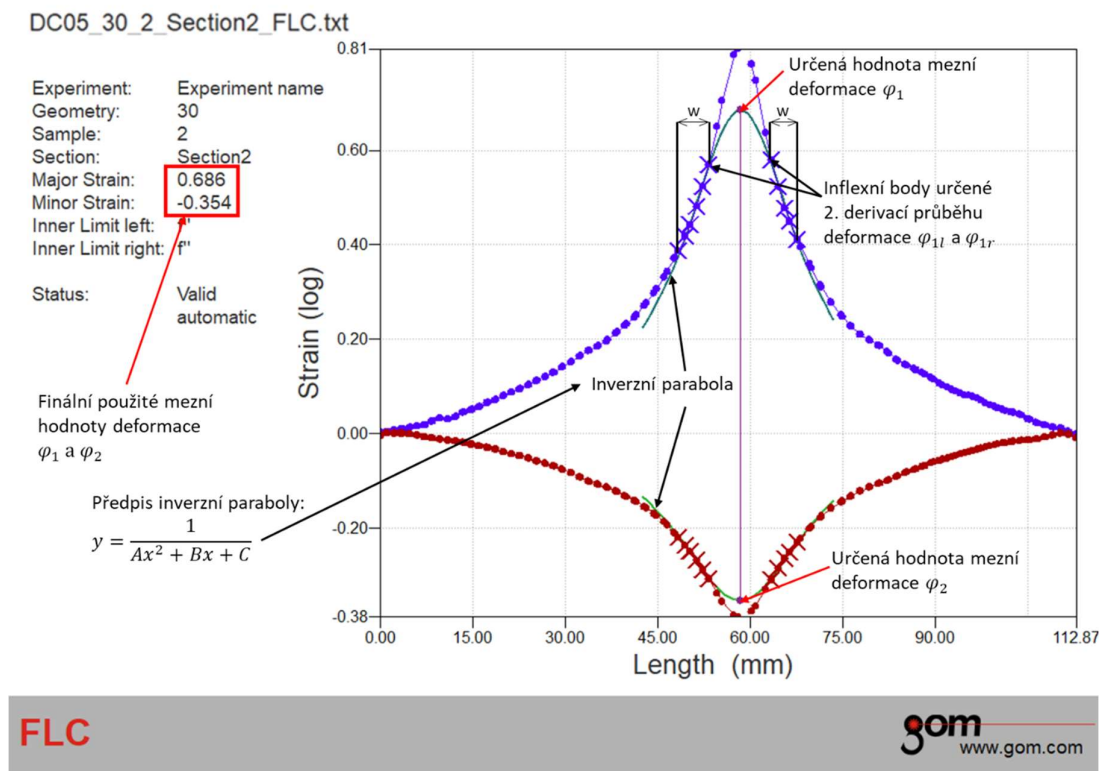
Následoval výpočet šířky  $w$ , která určuje vzdálenost počátku inverzní paraboly od již zmíněných inflexních bodů a lze ji určit pomocí (13):

$$w = 10 \cdot \left(1 + \frac{\varphi_{2m}}{\varphi_{1m}}\right) \quad (13)$$

Kde: 
$$\varphi_{2m} = \frac{1}{2} \cdot (\varphi_{2l} + \varphi_{2r}) \quad (14)$$

$$\varphi_{1m} = \frac{1}{2} \cdot (\varphi_{1l} + \varphi_{1r}) \quad (15)$$

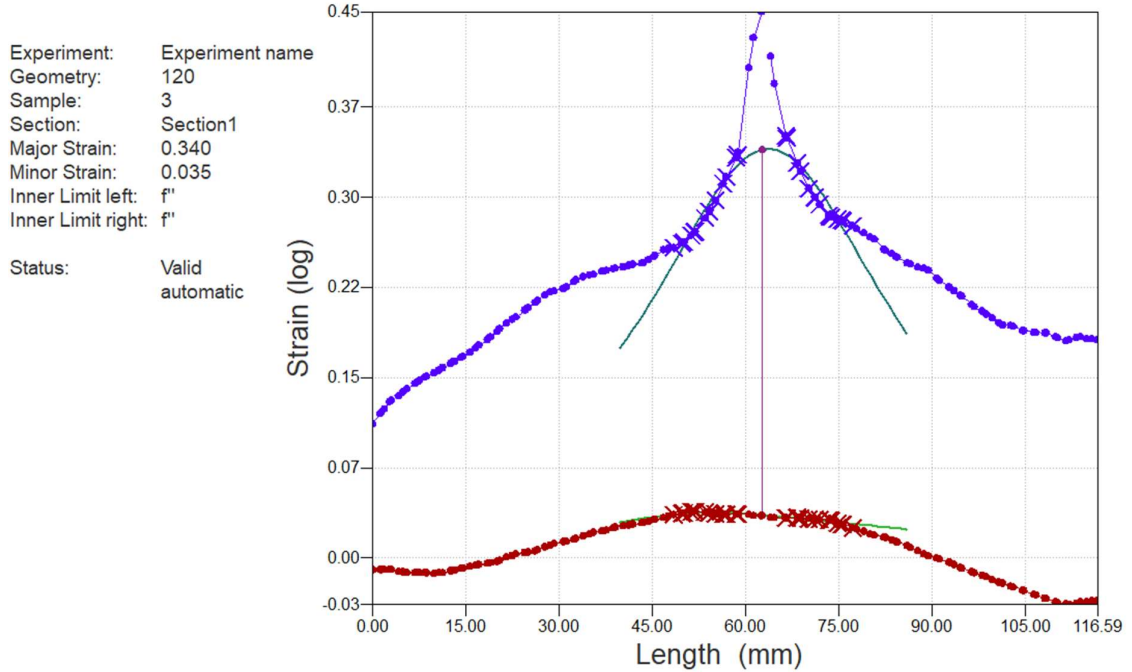
Následně byla určenými inflexními body  $\varphi_{1l}$  a  $\varphi_{1r}$  a body získanými vypočtením vzdálenosti  $w$  proložena inverzní parabola. Ve vrcholku této paraboly se nachází mezní hodnota deformace  $\varphi_1$  (obr. 37). Stejný postup platí pro získání mezní hodnoty  $\varphi_2$ . Všechny tyto postupy byly následně provedeny pro všechny naměřené vzorky. Z těchto vzorků byly takto stanoveny hledané hodnoty mezních deformací, které byly následně vyneseny do grafu tvořícího diagram mezních přetvoření.



Obr. 37 Určení hodnot mezních deformací – vzorek 30\_2

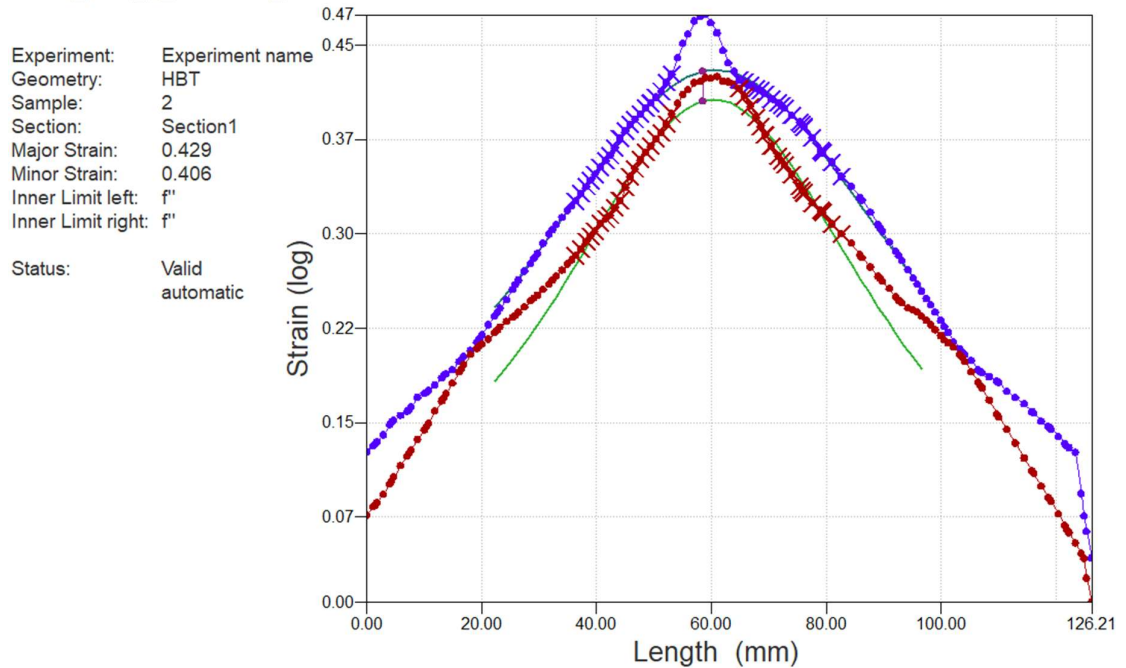
Na ukázkou jsou zde ještě uvedeny grafy pro vzorky 120\_3 a HBT\_2 (obr. 38 a obr. 39), u kterých bývá např. v literatuře [28] zmiňováno, že již dochází ke snižování mezních hodnot deformace vlivem špatného určení maxim, což se projevuje hlavně u průběhu  $\varphi_2$ .

DC05\_120\_3\_Section1\_FLC.txt



Obr. 38 Určení hodnot mezních deformací – vzorek 120\_3

DC05\_HBT\_2\_Section1\_FLC.txt



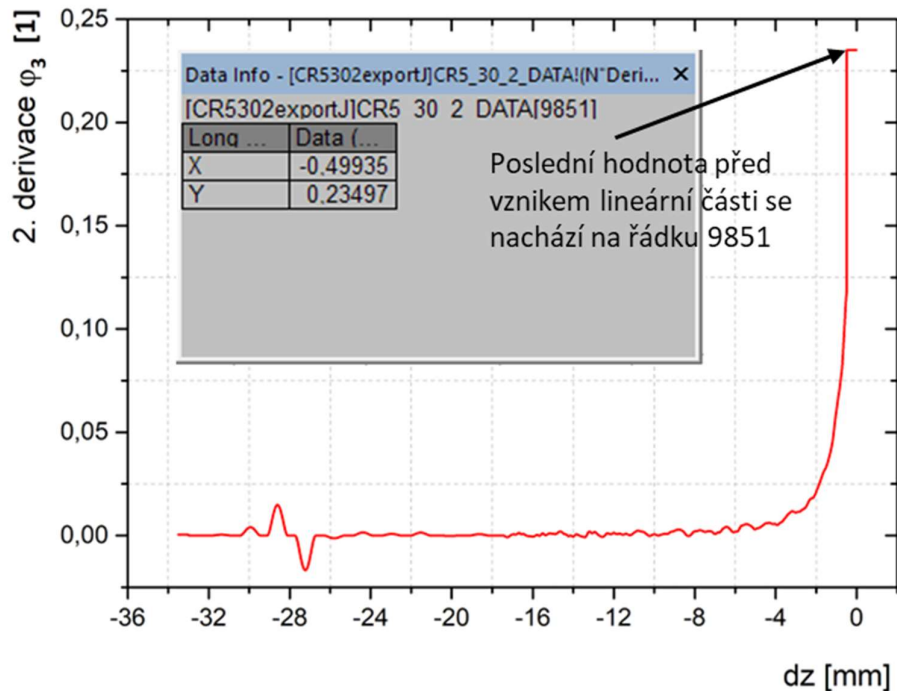
Obr. 39 Určení hodnot mezních deformací – vzorek HBT\_2



### C) 1. vlastní metoda (průsečík přímky a osy X)

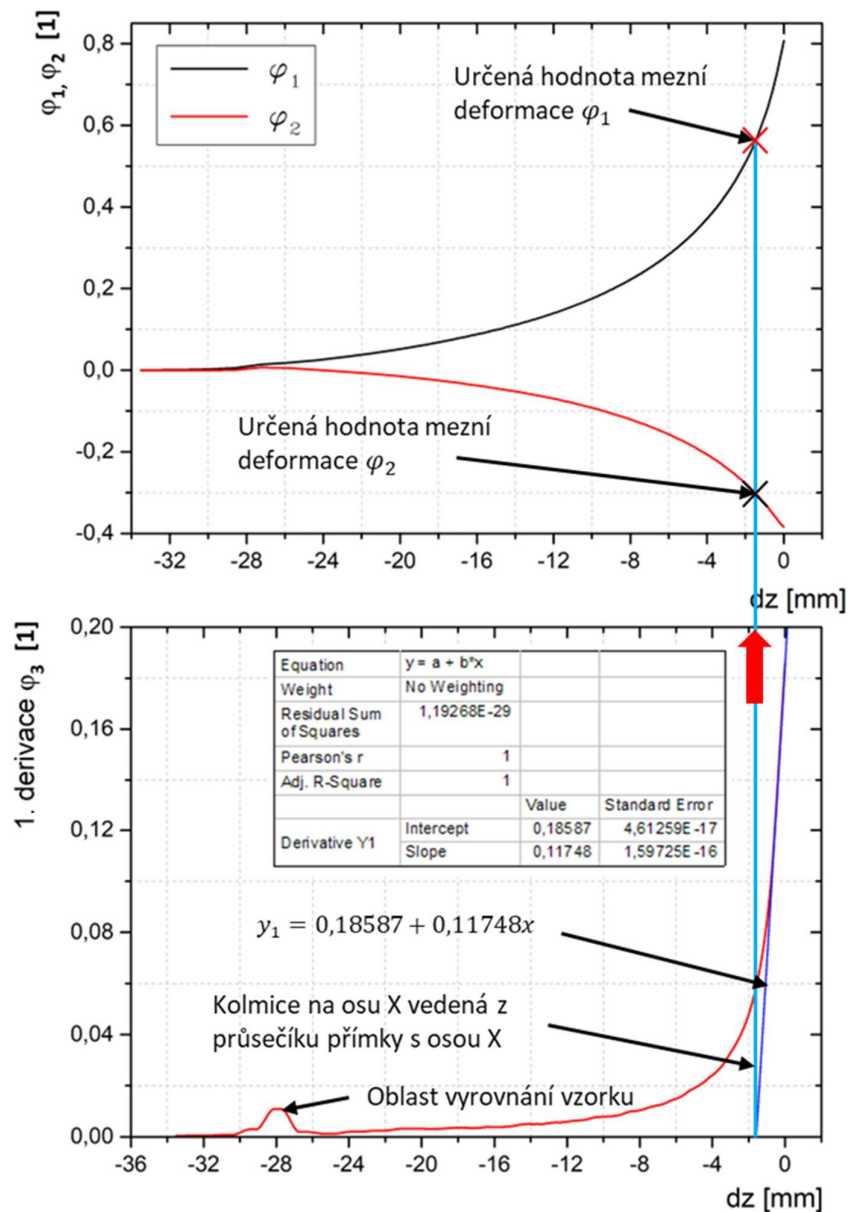
Toto vyhodnocení bylo zvoleno řešitelem DP jako vlastní přístup určení diagramů mezních přetvoření. Jedná se o vytvoření FLD pomocí vyhodnocení založené na časové změně velikosti deformace. Vyhodnocení této metody bylo provedeno v programu OriginPro, kde byla naměřená data importována ze softwaru GOM Software 2021. Nainportovány byly závislosti  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  a posuvu Z v závislosti na čase. V případě posuvu Z se přeneseně jednalo o posuv polokulového tažníku ve směru osy Z kolmo do vzorku. Přímo se pak jednalo o posuv zkoušeného vzorku ve směru osy Z.

Postup této metody byl takový, že nejprve se ze získaných hodnot rozložení deformace na vzorku  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$  vypočítala hodnota  $\varphi_3$  a všechny tyto průběhy byly graficky znázorněny v závislosti na hodnotě dz. Jako poloha nula byl brán okamžik vzniku trhliny. Tato poloha je zvolena jako referenční stav, vůči kterému je vykreslována změna polohy. Pro další postup bylo nutné tyto tři závislosti  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  a  $\varphi_3 = f(t)$  interpolovat. Důvodem bylo nedostatečné množství dat pro následné vyhodnocení a také zrovnomnění pokrytí po čase, které nebylo stejné z důvodu trigrování. Proto byly všechny tři průběhy interpolovány na 10000 hodnot. Následně bylo nezbytné křivku  $\varphi_3$  samostatně dvakrát zderivovat podle dz, kdy pomocí druhé derivace (viz obr. 41) byl nalezen počátek nestabilní oblasti. Jednalo se o sledování oblasti vzniku lineární části, tj. místa, kde došlo ke změně exponenciálního průběhu na část lineární. Tento bod tak vymezil šířku oblasti pro budoucí prokládání přímky v nestabilní oblasti.



Obr. 41 Druhá derivace  $\varphi_3/dz$

Po zjištění šířky nestabilní části byla v této oblasti následně proložena lineární závislost – viz obr. 42 přímka  $y_1$ . Tato přímka se proloží v grafu první derivace  $\varphi_3$  (viz obr. 42) body, které náležejí řádkům 9851 až 10000, tedy v nestabilní oblasti. Následné určení mezních hodnot deformací bylo dáno kolmicí na osu X (zde dz), která vede z průsečíku přímky  $y_1$  s osou X. V místech, kde tato kolmice protne průběhy deformací  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$  (viz obr. 42) byly odečteny výsledné mezní hodnoty těchto deformací. Hodnoty mezních deformací bylo také možné určit pomocí vzdálenosti X (respektive dz), kde byla rovnice  $y_1$  položena rovno nule a tím došlo k určení hodnoty průsečíku na ose X. Pomocí této hodnoty byly následně v datech pro  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$  přímo odečteny výsledné hodnoty mezních přetvoření.



Obr. 42 Určení mezních hodnot deformace – 1. vlastní metoda (průsečík přímky s osou X)

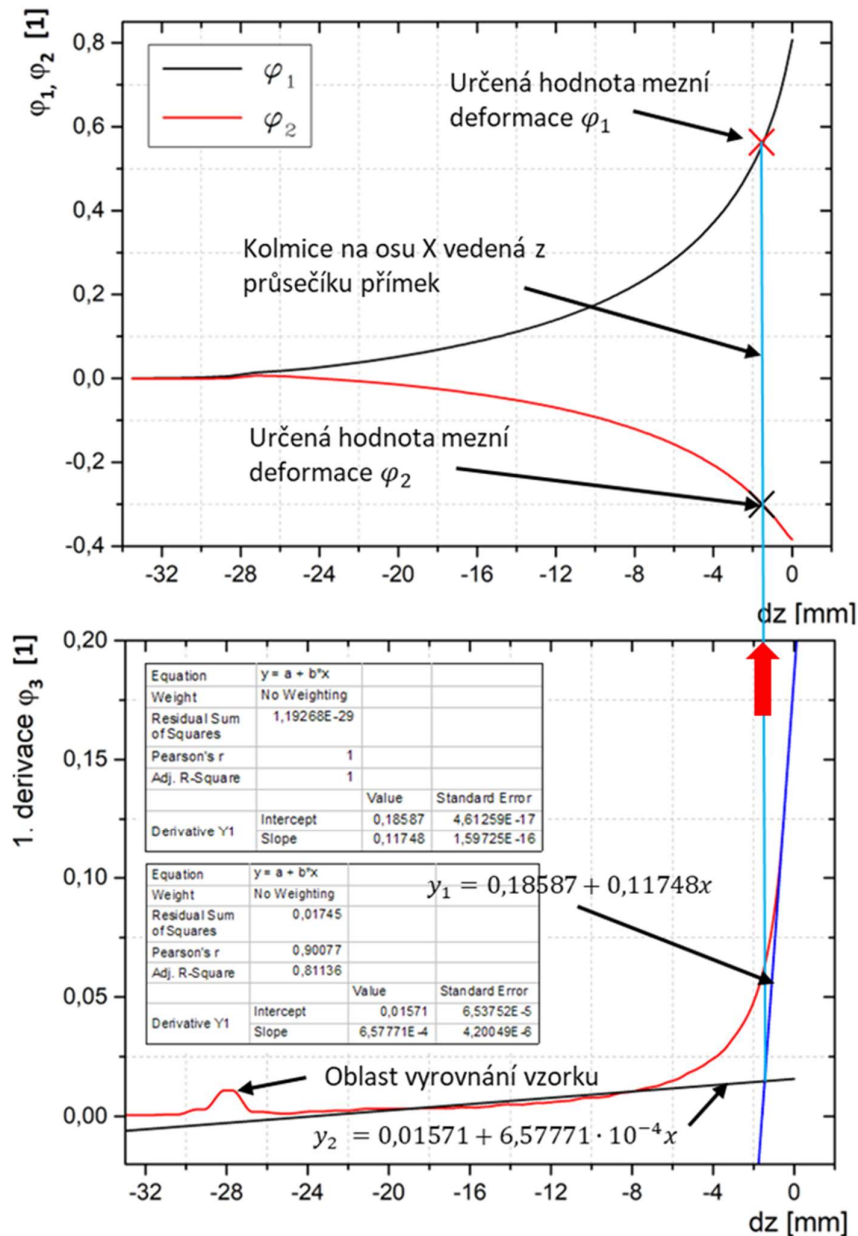
Takto popsaný postup byl proveden pro všechny naměřené vzorky. Následně byly všechny výsledné mezní hodnoty deformací jednotlivých vzorků sepsány do tab. 8. Tyto hodnoty pak jako celek vytváří FLD pro tuto metodu – viz obr. 46.

#### **D) 2. vlastní metoda (průsečík dvou přímk)**

Tato metoda je založena na určení mezních hodnot deformací pomocí průsečíku dvou přímk. První přímka byla vkládána do nestabilní části (zcela stejný postup jako u předešlé metody). Druhá přímka byla prokládána ve stabilní části, a to v jejím lineárním průběhu. Proto byl pro tuto metodu ze začátku aplikován úplně stejný postup jako u metody průsečíku přímky a osy X. Tedy nejprve výpočet  $\varphi_3$  a poté interpolace jednotlivých průběhů z důvodu získání většího množství dat. Následovala první a druhá derivace  $\varphi_3$  pro získání přímky v nestabilní části. Do této doby byl celý postup totožný s 1. vlastní zvolenou metodou.

Změna nastala při přístupu ke stabilní oblasti. Zde byla druhá přímka prokládána stabilní částí tak, že byly stanoveny limity, mezi kterými byla tato přímka proložena. Prvním limitem byla vzdálenosti  $d_z = -5$  mm, ve které přímka začínala. Druhým limitem byla část, do které byla závislost  $\varphi_3$  zhruba lineární. Druhé kritérium bylo zvoleno z důvodu častého výskytu tzv. oblasti vyrovnání vzorku v levé části průběhu – viz obr. 43. Tato oblast (vrchlík) byla způsobena vyrovnáním vzorku, který byl částečně zdeformován při dosednutí horního přidržovače na zkoušený materiál. Důvodem zanedbání těchto dat v oblasti vrchlíku bylo možné zkreslení výsledků lineární aproximace, tzn. špatného proložení přímky tímto průběhem vlivem již zmíněného vrchlíku. Určení výsledných mezních hodnot těchto deformací bylo pak následně dáno průsečíkem obou přímk. V tomto průsečíku byla opět vedena kolmice na osu X – viz. obr. 43. V místech, kde tato kolmice protne průběhy deformace na vzorku  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$  jsou odečítány výsledné mezní hodnoty deformací. Další možností v rámci tohoto způsobu bylo určení  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$  početně a to tak, že byly výsledné předpisy přímk  $y_1$  a  $y_2$  položeny sobě rovny ( $y_1 = y_2$ ). Z této rovnice pak byla spočtena hodnota X, podle které byly  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$  odečteny přímo v souboru dat. Takto popsaný postup byl následně aplikován na všechny změřené vzorky. Jednotlivé hodnoty mezních deformací byly posléze sepsány do tab. 9. Z těchto získaných hodnot byl následně sestaven diagram mezních přetvoření (obr. 47) pro tuto metodu.





Obr. 43 Určení mezních hodnot deformace – 2. vlastní metoda (průsečík dvou přímek)

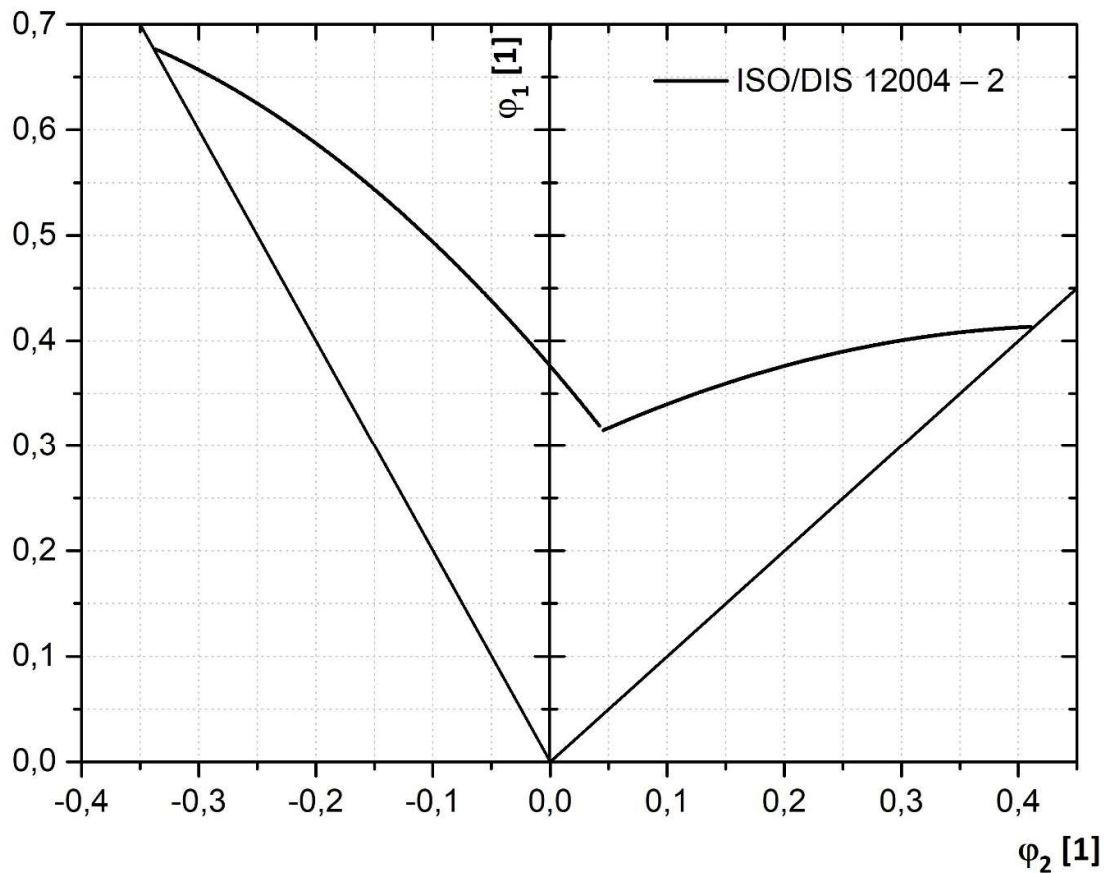
### 3.4.4 Přehled FLD pomocí jednotlivých metod

Tato kapitola obsahuje FLD získané pomocí všech předešlých popsaných metod vyhodnocení. U všech metod byla vždy do příslušného FLD vložena křivka mezních přetvoření získaná normovanou metodou ISO/DIS 12004 – 2 (obr. 44), která byla zvolena jako daný porovnávací „etalon“. U metod založených na časové změně deformace (označené B – D v předešlé kapitole) byly měřeny z důvodu časové náročnosti pouze vybrané referenční geometrie (30, 90, 105, 120 a 210). Jednotlivé diagramy pak byly následně zobrazeny v rámci porovnání jednotlivých metod vůči zvolenému „etalonu“ (ISO/DIS 12004 – 2).



### A) Diagram mezních přetvoření dle normy ISO/DIS 12004 – 2

Tento způsob vyhodnocení je v dnešní době hlavní metodou používanou pro určení a následné vytvoření diagramů mezních přetvoření. Jde o nejrozšířenější metodu pro určování FLD v technické praxi a jedná se o normovanou metodu. Z tohoto důvodu byla tato metoda zvolena jako porovnávací „etalon“ pro vyhodnocení a porovnání s ostatními metodami prováděnými v této diplomové práci. Výsledný diagram mezních přetvoření získaný touto metodou je na obr. 44.



Obr. 44 Diagram mezních přetvoření získaný normovanou metodou ISO/DIS 12004 – 2

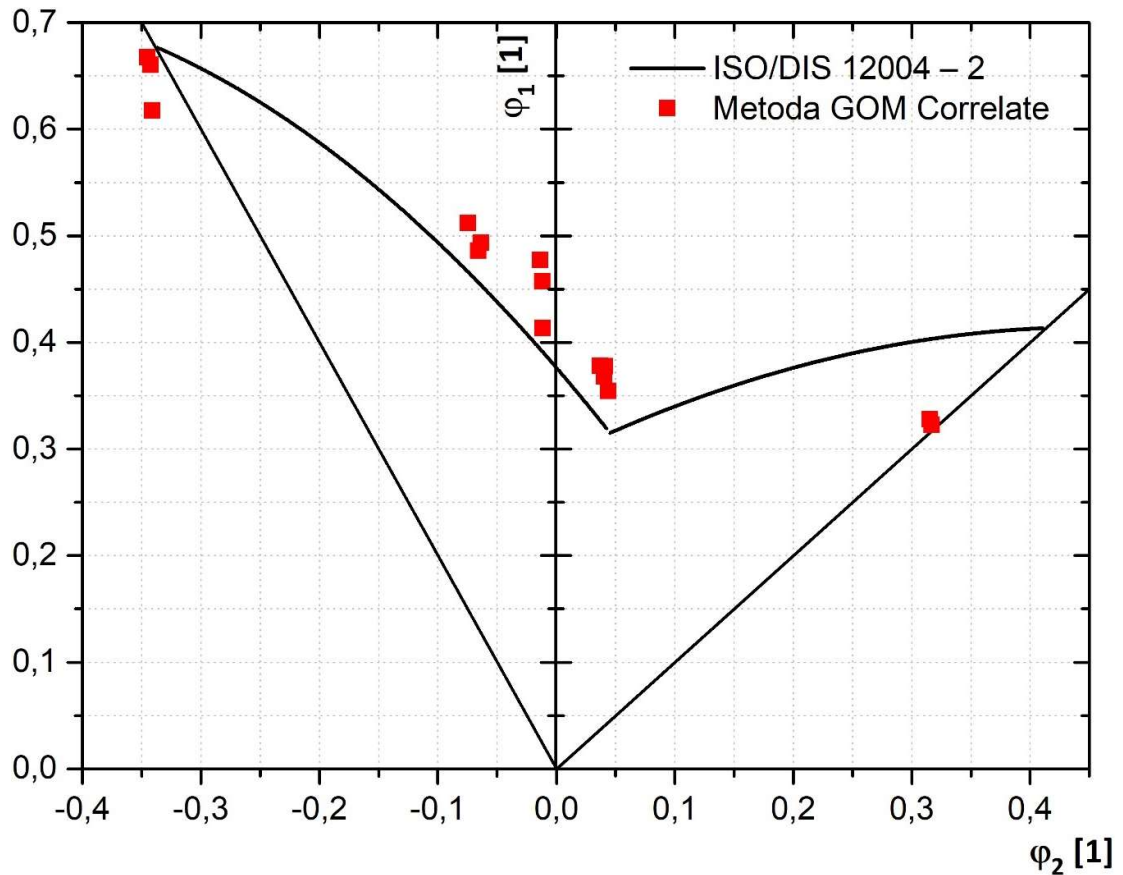
## B) Metoda GOM Correlate

Jedná se o první metodu určování mezních hodnot deformací pomocí časové změny deformace. Tento způsob je vyhodnocován podle skriptu aktuálně používaného softwaru GOM Software 2021 – viz str. 52. Jednotlivé hodnoty mezních deformací jsou zobrazeny v tab. 7 a grafická interpretace grafů je na obr. 45.

Tab. 7 Hodnoty mezních deformací z metody GOM Correlate

Geometrie	30_1	30_2	30_3	30_4	90_1	90_2	90_3
$\varphi_1$ [1]	0,6177	0,6677	0,7200	0,6604	0,5119	0,4860	0,4935
$\varphi_2$ [1]	-0,3413	-0,3453	-0,3687	-0,3422	-0,0746	-0,0657	-0,0635
Průměr $\varphi_1$ [1]	0,6665				0,4971		
Průměr $\varphi_2$ [1]	-0,3494				-0,0679		

Geometrie	105_2	105_3	105_4	120_1	120_2	120_3	120_4	HBT_1	HBT_2
$\varphi_1$ [1]	0,4135	0,4771	0,4571	0,3544	0,3777	0,3781	0,3678	0,3281	0,3228
$\varphi_2$ [1]	-0,0115	-0,0137	-0,0120	0,0436	0,0410	0,0368	0,0403	0,3156	0,3170
Průměr $\varphi_1$ [1]	0,4492			0,3695				0,3255	
Průměr $\varphi_2$ [1]	-0,0124			0,0404				0,3163	



Obr. 45 Diagram mezních přetvoření získaný metodou GOM Correlate

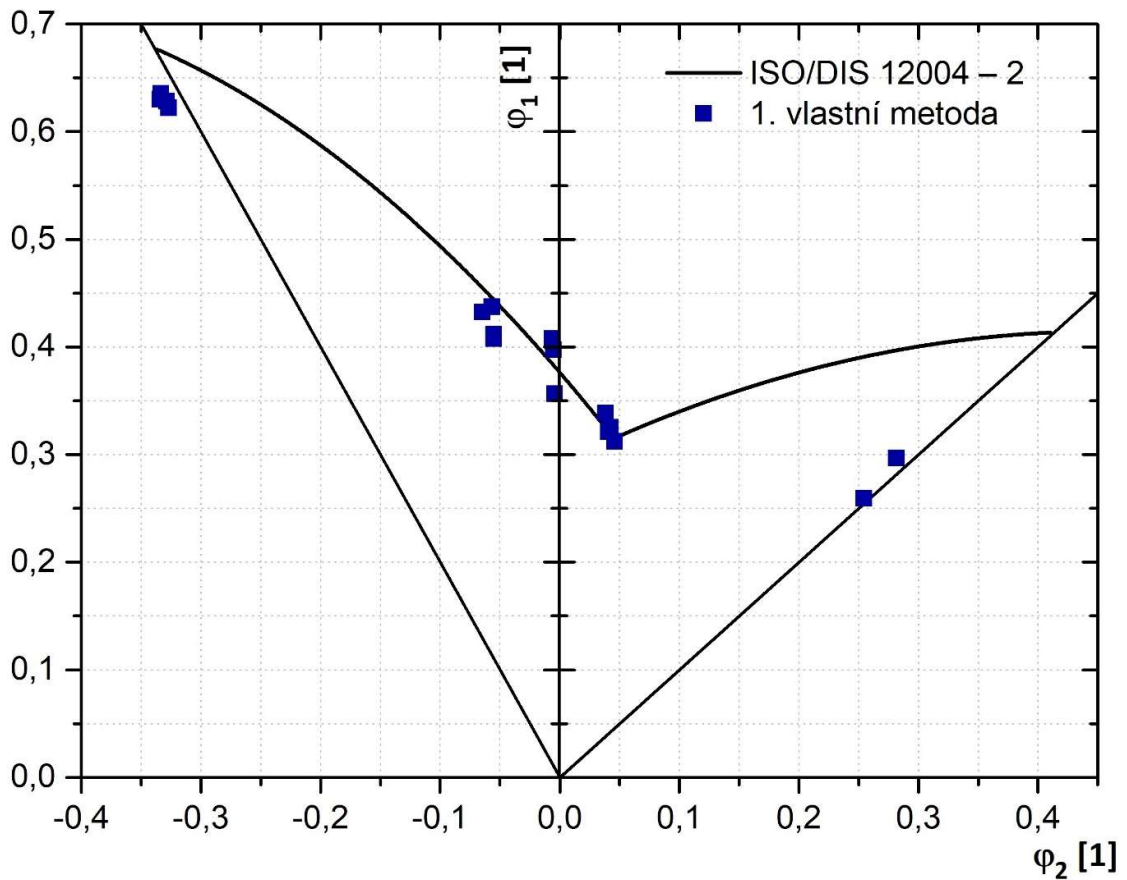
### C) 1. vlastní metoda (průsečík přímky a osy X)

Jedná se o první vlastní navrženou metodu, kde postup vyhodnocení FLD touto metodou byl popsán na str. 53 – 55. Metoda je obecně založena na průsečíku přímky přímo s osou X. Diagram mezních přetvoření získaný touto metodou je vyobrazen na obr. 46. Mezní hodnoty deformací jsou obsaženy v tab. 8.

Tab. 8 Mezní hodnoty deformace určené 1. vlastní metodou

Geometrie	30_1	30_2	30_3	30_4	90_1	90_2	90_3	90_4
$\varphi_1$ [1]	0,6304	0,6221	0,6357	0,6284	0,4327	0,4075	0,4375	0,4117
$\varphi_2$ [1]	-0,3343	-0,3269	-0,3335	-0,3289	-0,0646	-0,0552	-0,0567	-0,0552
Průměr $\varphi_1$ [1]	0,6291				0,4223			
Průměr $\varphi_2$ [1]	-0,3309				-0,0579			

Geometrie	105_2	105_3	105_4	120_1	120_2	120_3	120_4	HBT_1	HBT_2
$\varphi_1$ [1]	0,3565	0,4076	0,3974	0,3122	0,3251	0,3385	0,3213	0,2970	0,2592
$\varphi_2$ [1]	-0,0042	-0,0065	-0,0055	0,0457	0,0423	0,0382	0,0406	0,2816	0,2543
Průměr $\varphi_1$ [1]	0,3872			0,3243				0,2781	
Průměr $\varphi_2$ [1]	-0,0054			0,0417				0,2679	



Obr. 46 Diagram mezních přetvoření získaný 1. vlastní metodou

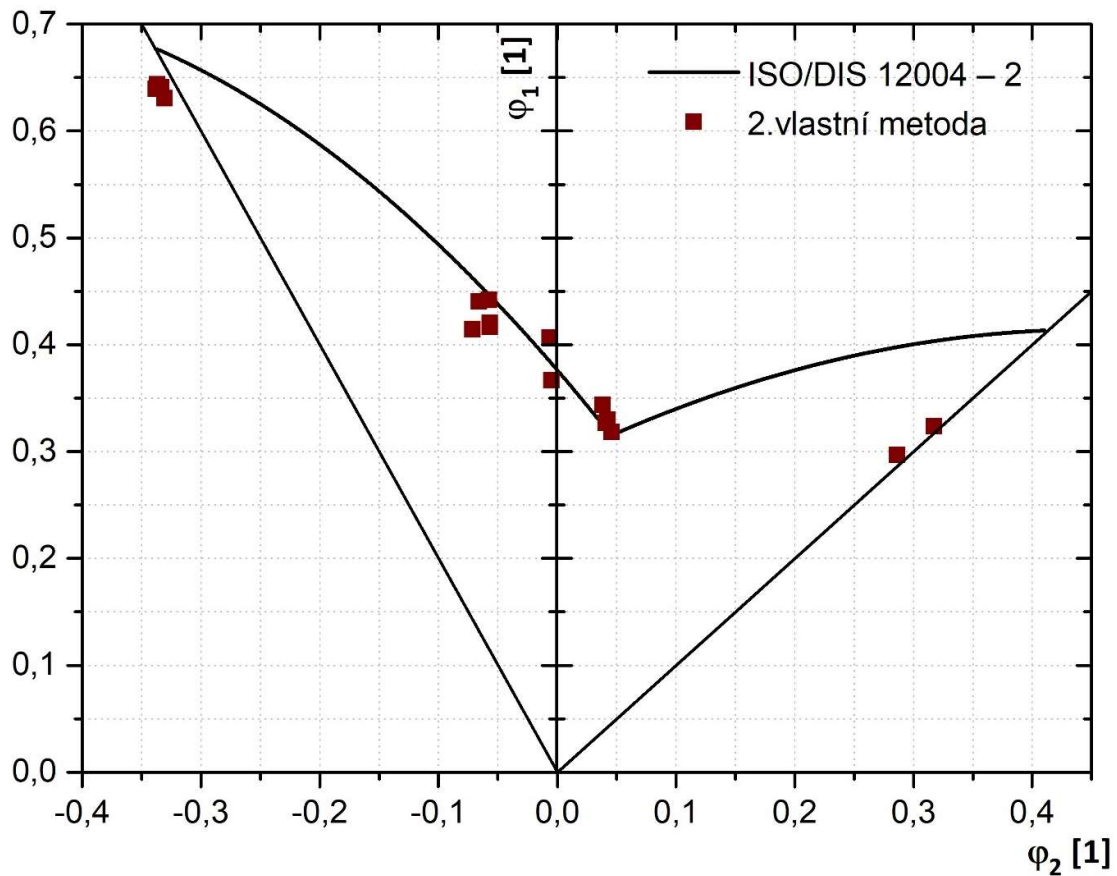
## D) 2. vlastní metoda (průsečík dvou přímk)

Tato metoda je druhá vlastní navržená metoda pro určování mezních hodnot deformací pomocí časové změny deformace do FLD. Metoda je obecně založena na principu průsečíku dvou přímk. Hodnoty mezních přetvoření jsou sepsány v tab. 9 a FLD získaný touto metodou je vyobrazen na obr. 47. Postup a vyhodnocení této metody je uveden na stránkách 55 a 56.

Tab. 9 Mezní hodnoty deformace určené 2. vlastní metodou

Geometrie	30_1	30_2	30_3	30_4	90_1	90_2	90_3	90_4
$\varphi_1$ [1]	0,6396	0,6307	0,6437	0,6409	0,4407	0,4168	0,4419	0,4203
$\varphi_2$ [1]	-0,3379	-0,3306	-0,3367	-0,3338	-0,0659	-0,0567	-0,0573	-0,0565
Průměr $\varphi_1$ [1]	0,6387				0,4300			
Průměr $\varphi_2$ [1]	-0,3347				-0,0591			

Geometrie	105_2	105_3	105_4	120_1	120_2	120_3	120_4	HBT_1	HBT_2
$\varphi_1$ [1]	0,3665	0,4146	0,4063	0,3185	0,3295	0,3436	0,3267	0,2970	0,3236
$\varphi_2$ [1]	-0,0051	-0,0713	-0,0064	0,0457	0,0421	0,0380	0,0406	0,2861	0,3172
Průměr $\varphi_1$ [1]	0,3958			0,3296				0,3103	
Průměr $\varphi_2$ [1]	-0,0276			0,0416				0,3016	



Obr. 47 Diagram mezních přetvoření získaný 2. vlastní metodou

## 4 Diskuze výsledků

V této kapitole je popsáno porovnání všech metod určených pomocí časové změny deformace s metodou řezu danou normou ISO/DIS 12004 – 2, která byla zvolena jako výchozí porovnávací „etalon“. Pro metodiky založené na časové změně velikosti deformace (gradientu deformace) se např. v literatuře [28, 29] udává, že by měly méně snižovat výsledné hodnoty mezních deformací  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$ . Z toho plyne, že výsledné hodnoty  $\varphi_1$  by se měly podle tohoto tvrzení nacházet většinou těsně nad křivkou mezních přetvoření, která byla určena normou ISO/DIS 12004 – 2. To znamená, že podle FLD by pak materiál nešel lisovat, což ve skutečnosti nemusí být pravda. Např. v literatuře [28, 29] se tento fakt udává hlavně pro krajní vzorky – tedy  $b = 30$  mm a  $b = 210$  mm, u kterých by měl být tento vliv největší. Právě kvůli tomuto tvrzení, kdy do této problematiky vstupuje spekulace, zda při normované metodě řezu (ISO/DIS 12004 – 2) nedochází ke zbytečnému snižování mezních deformací, přichází v úvahu použití metod založených na časové změně velikosti deformace. Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, tak metoda řezu byla zvolena jako porovnávací „etalon“, což znamená, že veškeré následující výsledky jsou srovnávány právě s touto metodou. Na následujících obrázcích 48 a 49 jsou pak tedy hodnoty  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$  z této metody brány jako referenční (100 %). V tab. 10 a 11 jsou pak spočítány odchylky jednotlivých použitých metod právě od normované metody ISO/DIS 12004 – 2.

### 1) ISO/DIS 12004 – 2 vs. Metoda GOM Correlate

Dle předešlých tvrzení by se měly hodnoty  $\varphi_1$  určené metodikami založenými na časové změně velikosti deformace, nacházet většinou těsně nad křivkou mezních přetvoření určenou normou ISO/DIS 12004 – 2. Z naměřených a vypočtených průměrných mezních hodnot deformací (obr. 45) je možné vidět, že u vzorků 90, 105 a 120 lze tento trend skutečně pozorovat. Zde se hodnoty mezní deformace  $\varphi_1$  opravdu nachází nad křivkou mezních přetvoření, získanou normovanou metodou. Pro krajní vzorky (30 a HBT), u kterých byl měl být daný vliv snižování hodnot  $\varphi_1$  největší, se však tento fakt nepotvrzuje. Pro porovnání byla vytvořena i tabulka procentuálních odchylek jednotlivých vzorků – viz tab. 10. Z uvedených hodnot je patrné, že odchylky od etalonu nejsou úplně zanedbatelné. Nejhůře vycházejí hodnoty vzorků HBT (210 mm), u kterých je odchylka skoro 22 %. Navíc se tato hodnota nachází hluboko pod křivkou mezních deformací určenou metodou řezu. Naproti tomu výsledek u geometrie 30 je sice pod křivkou FLC určenou normovanou metodou, ale dosažená odchylka od etalonu je pouze 2 %.

### 2) ISO/DIS 12004 – 2 vs. 1. vlastní metoda

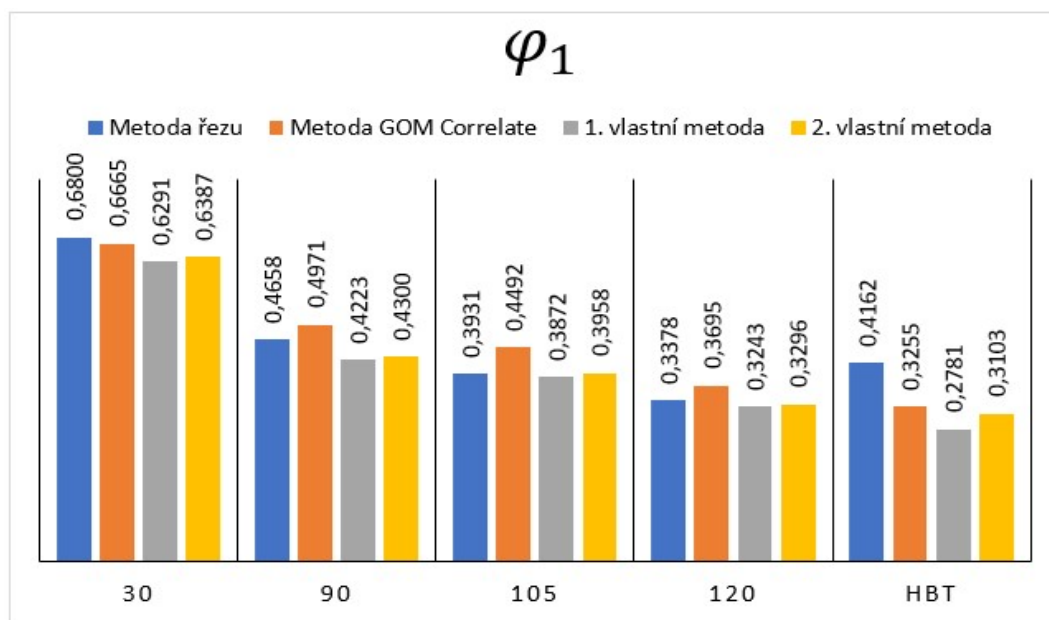
Jak je možné pozorovat v grafu na obr. 48, zde se všechny průměrné hodnoty mezních deformací  $\varphi_1$  nacházejí pod křivkou danou etalonem. Dále je možné pozorovat, že u vzorku HBT je dosahováno poměrně velkých rozdílů vůči referenčním hodnotám určených metodou řezu. Odchyłka u těchto vzorků (HBT) přesahovala hodnotu 33 %. U ostatních vzorků nejsou odchylky od etalonu zase až tak velké. Nejmenší rozdíl je pozorován u vzorku 105, kde odchylka od referenčního „etalonu“ je pouze cca 1,5 %.

### 3) ISO/DIS 12004 – 2 vs. 2. vlastní metoda

Výsledky této metody vyšly podobně jako u 1. vlastní metody. Všechny určené průměrné hodnoty, kromě hodnoty pro vzorek 105, se nacházejí pod referenční křivkou určenou metodou ISO/DIS 12004 – 2. Pro vzorek 105 byla naměřena nejnižší odchylka od referenční hodnoty, a to pouze cca 0,7 %. Lze tedy říct, že pro vzorek 105 byly určeny stejné hodnoty jako při použití metody řezu. Opět ale tato metoda dosahuje velkých rozdílů u vzorků HBT, kde se hodnoty  $\varphi_1$  nacházejí pod referenční hodnotou, a to s odchylkou více jak 25 %.

Tab. 10 Procentuální odchylka časových metod od porovnávacího etalonu pro  $\varphi_1$  (porovnávací etalon brán jako 100 %)

$\Delta\varphi_1$ [%]	30	90	105	120	HBT
Metoda GOM Correlate	-2,0	6,7	14,3	9,4	-21,8
1. vlastní metoda	-7,5	-9,3	-1,5	-4,0	-33,2
2. vlastní metoda	-6,1	-7,7	0,7	-2,4	-25,4



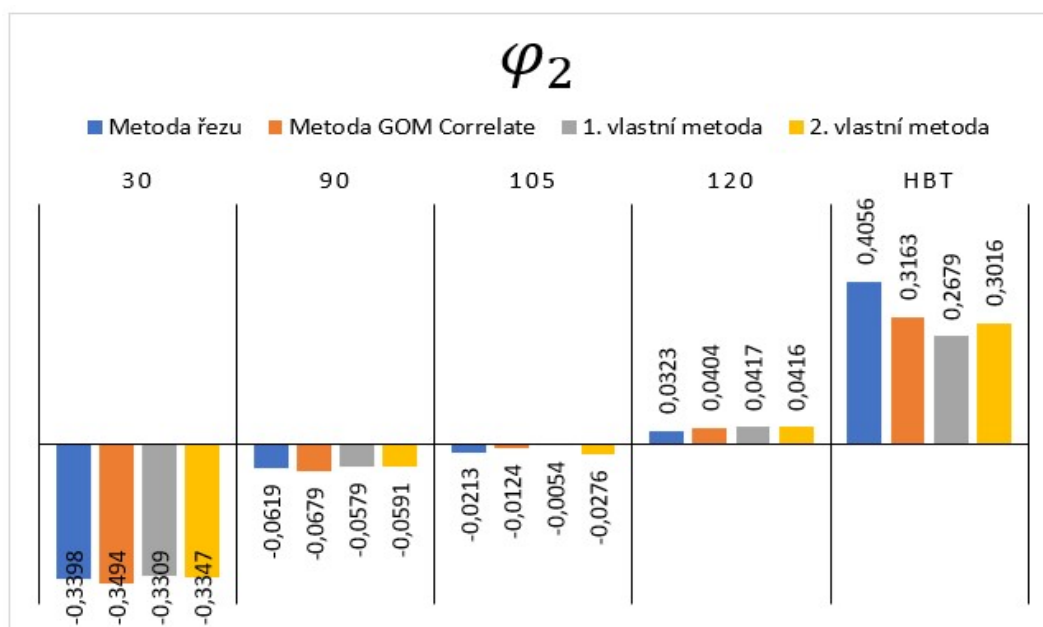
Obr. 48 Průměrné hodnoty mezní deformace  $\varphi_1$  porovnávacích vzorků



Co se týče hodnot  $\varphi_2$ , které určují vzdálenost na ose Y v FLD, tak lze opět u vzorků HBT pozorovat dosažení velkých rozdílů od porovnávacího „etalonu“. Zároveň, jak je možné pozorovat v tab. 10, všechny metody dosahují velkých procentuálních odchylek od referenčních hodnot také u vzorků 105 a 120. Z grafu (viz obr. 49) je však patrné, že u obou těchto vzorků jsou průměrné hodnoty  $\varphi_2$  velmi malé a blízké nule. Pokud jsou tedy porovnány s ostatními hodnotami, tak ve výsledku je možné takto vysoké procentuální odchylky u tak malých hodnot blízkých nule zanedbat. U vzorků 30 a 90 pro hodnoty  $\varphi_2$  lze konstatovat podobné tvrzení jako u již popsaných hodnot  $\varphi_1$ .

Tab. 11 Procentuální odchylka časových metod od etalonu pro  $\varphi_2$  (porovnávací etalon brán jako 100 %)

$\Delta\varphi_2$ [%]	30	90	105	120	HBT
Metoda GOM Correlate	2,8	9,8	-41,7	25,2	-22,0
1. vlastní metoda	-2,6	-6,5	-74,6	29,1	-33,9
2. vlastní metoda	-1,5	-4,5	29,8	28,8	-25,6



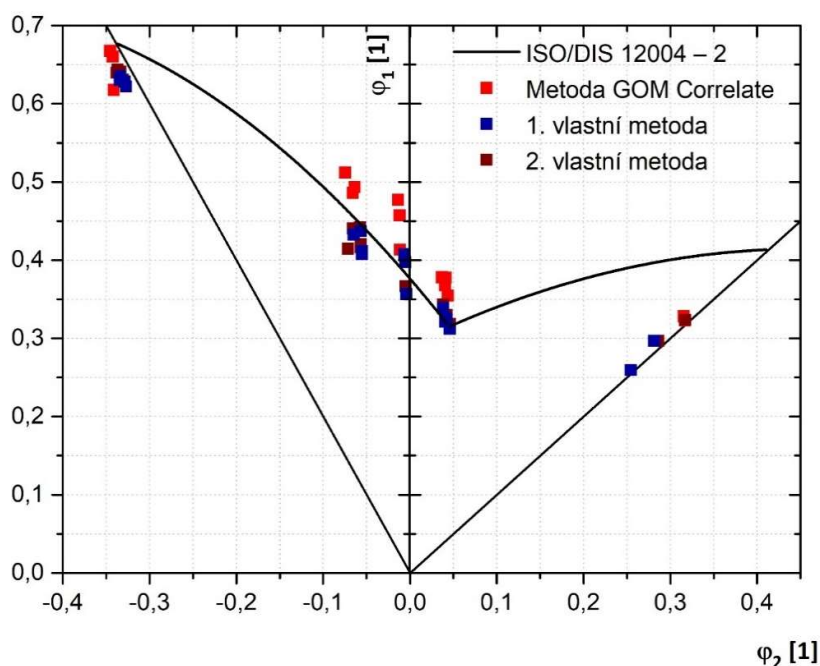
Obr. 49 Průměrné hodnoty mezní deformace  $\varphi_2$  porovnávacích vzorků

Výsledky 1. a 2. vlastní metody s určitou odchylkou kopírují tvar křivky mezních přetvoření, kromě již zmíněných vzorků HBT. Pokud mezi sebou porovnáme obě zvolené metody z hlediska odchylek, vychází o trochu lépe ve všech naměřených vzorkách metoda označená jako 2. vlastní metoda. Avšak celkové odchylky mezi těmito dvěma metodami nejsou velké. Při porovnání metody GOM Correlate s 2. vlastní metodou vychází najevo, že z hlediska absolutních odchylek je pro oblast vzorků 30 – 90 pravděpodobně lepší metoda GOM Correlate a v oblasti 105 – 120 vychází lépe 2. vlastní metoda. Tím pádem nelze říct, která metoda je z těchto tří metod nejlepší.

## 5 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo provést zjištění diagramu mezních přetvoření pomocí bezkontaktního měřicího systému GOM Correlate Pro u hlubokotažného materiálu. Úkolem bylo určit FLD nejenom běžnou normovanou metodou ISO/DIS 12004 – 2, ale také pomocí tří metod založených na časové změně velikosti deformace. Tyto diagramy byly určeny k následnému porovnání mezi sebou. Jako materiál byla použita hlubokotažná ocel s označením DC05 + ZE 75/75 BP, která nachází velké uplatnění v automobilovém průmyslu, kde jsou plechy z tohoto materiálu používány na výlisky částí karosérií automobilů (např. bočnice a blatníky). Z hlediska využitých metod bylo jako první způsob vyhodnocení provedeno klasické normované vyhodnocení metodou řezu. Tento způsob vyhodnocení je nejběžnější metodou používanou v technické praxi a je dán normou ISO/DIS 12004 – 2.

Vlivem technického rozvoje však dochází k vývoji a zkoumání nových metod, které by mohly být v následujících letech normovány a tím pádem i používány v technické praxi. Pro diagramy mezních přetvoření se jedná o metody, u kterých je vyhodnocení založené na časové změně velikostí deformace. Z tohoto důvodu byly v této práci provedeny další tři možné způsoby vyhodnocení diagramu mezních přetvoření, které jsou založeny na tomto principu vyhodnocování. Prvním z vyhodnocení v této oblasti byla použita metoda přímo nabízená v softwaru GOM Software 2021. Další dvě metody byly navrženy řešitelem DP a byly označeny jako 1. a 2. vlastní metoda. Výsledné hodnoty sloužící pro porovnání výsledků mezi sebou jsou zobrazeny na obr. 50.



Obr. 50 Porovnání všech metod vyhodnocení FLD



Z výsledků vyplývá (viz obr. 50), že pro většinu referenčních vzorků jsou odchylky od normy ISO/DIS 12004 – 2 v celkem přijatelné oblasti a to  $\pm 10$  %. Výjimkou jsou vzorky HBT, kde jsou u všech metod odchylky opravdu vysoké, a to více jak 21 % od etalonu. Metoda GOM Correlate se částečně nachází nad FLC určenou metodou řezu, a to u vzorků 90, 105, a 120. Tato metoda v tomto úseku tedy dovoluje vyšší deformaci, než dojde k porušení materiálu. Metody navrhované touto diplomovou prací však nikoliv. Toto tvrzení je možné pozorovat v grafu (viz obr. 50), kde výsledné určené hodnoty jak 1. vlastní metodou tak i 2. vlastní metodou se nacházejí těsně pod FLC určenou metodou řezu. Všechny vypracované metody založené na časové změně velikosti deformace však vykazují velké odchylky u vzorku HBT vůči porovnávacímu etalonu.

Vyhodnocení založené na časové změně velikosti deformace (neboli gradientu deformace) je v dnešní době zkoumáno především z důvodu určitých výhrad vůči normované metodě, zejména zbytečného snižování velikosti mezních deformací. Toto tvrzení by se mělo v největší míře projevovat u krajních vzorků – tedy u vzorků 30 a HBT. Tuto teorii však tato diplomová práce nepotvrzuje. Naopak tyto dva krajní vzorky u všech tří zkoumaných metod vycházejí vždy pod křivkou mezních přetvoření určenou běžně používanou normovanou metodou. Nicméně pokles u vzorků 30 není tak výrazný. Pro všechny metody u této geometrie (30) je dosahována odchylka maximálně 7,5 % od normované metody ISO/DIS 12004 – 2. Oproti tomu u vzorků HBT se tyto metody nezdají být spolehlivé, protože určené hodnoty mezních přetvoření se nacházejí hluboko pod křivkou mezních přetvoření určenou etalonem. Celkově odchylka u všech těchto metod pro tento vzorek (HBT) dosahuje hodnot přes 20 % od metody řezu, což by představovalo poměrně velké snížení oblasti bezpečného lisování při reálném využití v provozu. Dalším zjištěním u time-dependend metod je, že tyto metody nevykazují problém u vzorků 30 i přestože u nich dochází k difuznímu ztenčení materiálu. Naopak problém nastává u vzorků HBT, u kterých dochází pouze k lokálnímu ztenčení materiálu a neuvažuje se u nich možné špatné určení mezních hodnot deformací vlivem difuzního ztenčení materiálu. Výsledkem tedy je, že z důvodu velkých nepřesností u krajního vzorku HBT nelze zatím pro materiál zkoumaný touto DP doporučit použití ani jedné ze tří možných time-dependend metod. Pro tento vzorek byly naměřeny velké odchylky, které jsou pro technickou praxi nepřijatelné. Jako následné doporučení v této oblasti by bylo např. vhodné provést naměření mezních hodnot deformací pro další možné geometrie (45, 60 atd.), nebo provést zjišťování FLD na jiných materiálech např. na vysokopevnostních ocelích nebo slitinách hliníku. Dalším doporučením by mohla být také snaha nalézt vlastní matematickou metodu určování FLD v rámci time-dependend metod, která zde nebyla použita.

## Literatura

- [1] DAVIES, Geoff. *Materials for automobile bodies*. second edition. Amsterdam: Elsevier, 2012. ISBN 978-0-08-096979-4.
- [2] ASHBY, M. F. *Materials selection in mechanical design*. 3rd ed. Amsterdam ; Boston: Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 978-0-7506-6168-3.
- [3] MORO, Chirarg. *Different materials used in the making of our cars!* [online]. 2021 [cit. 23.5.2023]. Dostupné z: <https://www.team-bhp.com/news/different-materials-used-making-our-cars>
- [4] DSOUZA, Franky. Introduction to BiW and Fixtures Challenge [online]. 2021 [cit. 23.5.2023]. Dostupné z: <https://skill-lync.com/student-projects/week-1-introduction-to-biw-and-fixtures-challenge-22>
- [5] LIU, Ming, Yang GUO, Jeff WANG a Mark YERGIN. Corrosion avoidance in lightweight materials for automotive applications. *npj Materials Degradation* [online]. 2018, [cit. 23.5.2023] ISSN 2397-2106. Dostupné z: <https://www.nature.com/articles/s41529-018-0045-2>
- [6] SOLFRONK, Pavel. *Materiály pro stavbu karoserie automobilu*. Liberec: Technická univerzita v Liberci [online]. [cit. 23.5.2023] Dostupné z: <https://elearning.tul.cz/mod/resource/view.php?id=329829>
- [7] *Rozdělení ocelí pro automobilový průmysl*. In Workswell [online]. 2023 [cit. 23.5.2023] Dostupné z: <https://workswell.cz/rozdeleni-oceli-pro-automobilovy-prumysl/>
- [8] MORAVEC, Jaromír. *Vysoce pevnostní oceli* [online]. Dostupné z: [https://elearning.tul.cz/pluginfile.php/535364/mod\\_folder/content/0/06\\_Jemnozrnn%C3%A9%20a%20vysokopevn%C3%A9%20oceli.pdf?forcedownload=1](https://elearning.tul.cz/pluginfile.php/535364/mod_folder/content/0/06_Jemnozrnn%C3%A9%20a%20vysokopevn%C3%A9%20oceli.pdf?forcedownload=1)
- [9] *Svařitelnost ocelí pro automobilové karoserie*. In MM Průmyslové spektrum. [www.mmspektrum.com](http://www.mmspektrum.com) [online]. 2023 [cit. 23.5.2023] Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/svaritelnost-oceli-pro-automobilove-karoserie>

- [10] PETRUŽELKA, Jiří a Jiří HRUBÝ. *Strojírenské tváření I*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Strojní fakulta, 2001. ISBN 978-80-7078-878-3.
- [11] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. Brno: CERM, 2003. ISBN 978-80-7204-283-8.
- [12] ČSN EN ISO 6892-1 (420310) *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. B.m.: Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2021
- [13] PETRUŽELKA, Jiří, Richard BŘEZINA, VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, a STROJNÍ FAKULTA. *Úvod do tváření I*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2001. ISBN 978-80-7078-877-6.
- [14] MAZÁČOVÁ, Veronika. Zkouška tahem. *MATCA* [online]. 2023 [cit. 23.5.2023] Dostupné z: <https://matca.cz/technologie/analyticke-metody/zkouska-tahem/>
- [15] SOBOTKA, Jiří. *Hodnocení mechanických vlastností nových vysokopevnostních materiálů*. Technická Univerzita v Liberci, 2008. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/38965>
- [16] SOLFRONK, Pavel. *Diagram mezních přetvoření*. Liberec: Technická univerzita v Liberci [online]. Dostupné z: <https://elearning.tul.cz/mod/resource/view.php?id=372473>
- [17] ASM INTERNATIONAL, Howard KUHN, a ASM INTERNATIONAL, ed. *Mechanical testing and evaluation*. [11. ed.], 1. print. Materials Park, Ohio: ASM International, 2000. ASM handbook, prepared under the direction of the ASM International Handbook Committee; Vol. 8. ISBN 978-0-87170-389-7.
- [18] BUCHAR, Zdeněk. *Diagramy mezních přetvoření tenkých hlubokotažných plechů*. Technická Univerzita v Liberci, 1987 Dostupné z: [https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/38582/U\\_207S.pdf?sequence=1](https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/38582/U_207S.pdf?sequence=1)
- [19] ISO/DIS 12004-2. *Metallic materials -Sheet and strip — Determination of forming limit curves — Part 2: Determination of forming limit curves in laboratory*
- [20] MIZERA DAVID. *Relaxace napětí materiálu při provádění zkoušky hydrostatickým vypínáním*. Technická Univerzita v Liberci 2019. Dostupné z: [https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/159700/DP\\_David\\_Mizera\\_2019\\_2020.pdf](https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/159700/DP_David_Mizera_2019_2020.pdf)

- [21] DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. Vyd. 5., V Akademickém nakladatelství CERM 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4747-9.
- [22] ČSN EN ISO 20482: *Kovové materiály - Plechy a pásy - Zkouška hloubením podle Erichsena*. B.m.: Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2014
- [23] VOLEK, Aleš. *Metodika ustavení souřadného systému pro optické měřicí zařízení Pontos* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství 2008 [cit. 23.5.2023]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/64019>
- [24] BARTUNĚK, Jiří. *Kinetika vzniku plastického lomu u ocelí používaných v automobilovém průmyslu*. Technická Univerzita v Liberci, 2009. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/2690>
- [25] LUHMANN, Thomas, Stuart ROBSON a Stephen KYLE, ed. *Close-range photogrammetry: principles, methods and applications*. Dunbeath: Whittles, 2006. ISBN 978-1-870325-50-9.
- [26] ARGUS. In *MCAE* [online]. 2023 [cit. 23.5.2023]  
Dostupné z: <https://www.mcae.cz/produkty/argus/>
- [27] ARAMIS. In *MCAE* [online]. 2023 [cit. 23.5.2023]  
Dostupné z: <https://www.mcae.cz/produkty/aramis/>
- [28] HOTZ, WALTER, ET AL. Time dependent FLC determination comparison of different algorithms to detect the onset of unstable necking before fracture. In: *Key Engineering Materials*. 2013, Trans Tech Publications Ltd.
- [29] VOLK, WOLFRAM; HORA, PAVEL. New algorithm for a robust user-independent evaluation of beginning instability for the experimental FLC determination. *International journal of material forming*. 2011.

## **Seznam příloh**

**Příloha 1:** Statická zkouška tahem – směr odebrání vzorku 0 °

**Příloha 2:** Statická zkouška tahem – směr odebrání vzorku 45 °

**Příloha 3:** Statická zkouška tahem – směr odebrání vzorku 90 °

## Příloha 1:

# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

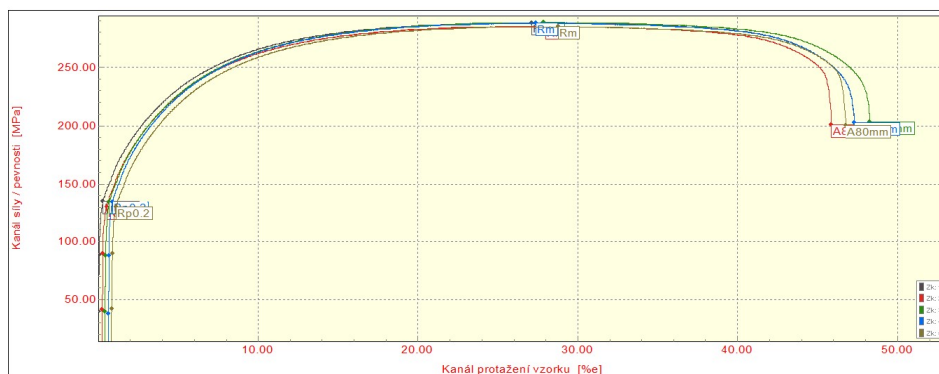
## VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : DC05 ZE 75/75 BP  
Rozměry vzorku : [0,7 x 20] mm  
Směr odebrání vzorku : 0°  
Teplota : RT  
Rychlost posuvu : 0,5 [15] mm/min.  
Vypracoval : Bc. Jakub Kameník  
Datum provedení testu : 18.1.2023  
Pozn. :

## VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	a0 mm	b0 mm	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
1	0.70	20.10	135.2	288.3	26.92	47.15
2	0.70	20.10	130.6	285.2	27.55	45.52
3	0.70	20.08	134.8	288.6	27.26	47.75
4	0.70	20.13	135.0	287.9	26.59	46.57
5	0.70	20.12	130.3	284.9	27.72	45.80

Statistika	a0 mm	b0 mm	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
Počet zkoušek	5	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	0.70	20.11	133.2	287.0	27.21	46.56
Směrodatná odchylka	0.00	0.02	2.5	1.8	0.46	0.93
Minimální hodnota	0.70	20.08	130.3	284.9	26.59	45.52
Maximální hodnota	0.70	20.13	135.2	288.6	27.72	47.75



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

## Příloha 2:

# STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

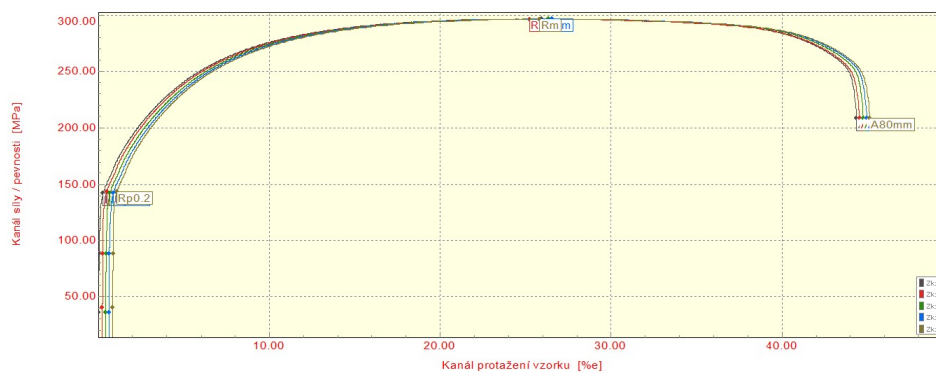
## VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : DC05 ZE 75/75 BP  
Rozměry vzorku : [0,7 x 20] mm  
Směr odebrání vzorku : 45°  
Teplota : RT  
Rychlost posuvu : 0,5 [15] mm/min.  
Vypracoval : Bc. Jakub Kameník  
Datum provedení testu : 18.1.2023  
Pozn. :

## VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	a0 mm	b0 mm	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
1	0.70	20.10	142.5	296.4	25.78	44.26
2	0.70	20.10	143.4	296.2	24.88	44.24
3	0.70	20.10	142.5	296.4	25.78	44.26
4	0.70	20.10	142.5	296.4	25.78	44.26
5	0.70	20.10	143.4	296.2	24.88	44.24

Statistika	a0 mm	b0 mm	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
Počet zkoušek	5	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	0.70	20.10	142.8	296.3	25.42	44.25
Směrodatná odchylka	0.00	0.00	0.5	0.1	0.49	0.01
Minimální hodnota	0.70	20.10	142.5	296.2	24.88	44.24
Maximální hodnota	0.70	20.10	143.4	296.4	25.78	44.26



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

### Příloha 3:

## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

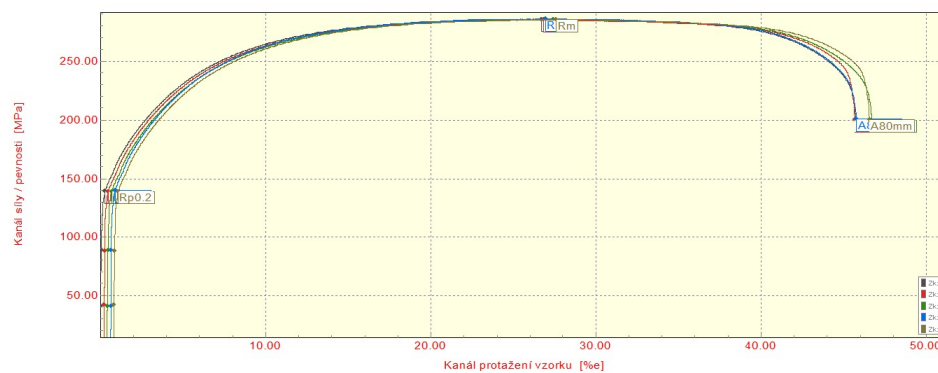
### VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : DC05 ZE 75/75 BP  
Rozměry vzorku : [0,7 x 20] mm  
Směr odebrání vzorku : 90°  
Teplota : RT  
Rychlost posuvu : 0,5 [15] mm/min.  
Vypracoval : Bc. Jakub Kameník  
Datum provedení testu : 18.1.2023  
Pozn. :

### VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	a0 mm	b0 mm	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
1	0.70	20.10	139.7	285.6	26.50	45.61
2	0.70	20.14	139.3	285.1	26.45	45.36
3	0.70	20.12	139.3	285.3	26.84	46.18
4	0.70	20.07	140.0	286.0	26.17	45.04
5	0.70	20.13	139.2	285.3	26.62	45.65

Statistika	a0 mm	b0 mm	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A80mm %
Počet zkoušek	5	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota	0.70	20.11	139.5	285.5	26.52	45.57
Směrodatná odchylka	0.00	0.03	0.3	0.3	0.24	0.42
Minimální hodnota	0.70	20.07	139.2	285.1	26.17	45.04
Maximální hodnota	0.70	20.14	140.0	286.0	26.84	46.18



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ