ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

KREJSA

PAVEL

2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Krejsa** Jméno: **Pavel** Osobní číslo: **440667**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**

Studijní program: **Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Stanovení křivek mezní tvářitelnosti pomocí zkoušky tahem a systému ARAMIS

Název diplomové práce anglicky:

Determination of forming limit curves according to tensile test and Aramis system

Pokyny pro vypracování:

1) Úvod a seznámení s problematikou tváření a tvářitelnost
2) Návrh postupu a realizace experimentu – kalibrace systému, charakteristika podmínek zkoušky, příprava zkušebních vzorků
3) Realizace experimentu a vyhodnocení naměřených dat
4) Shrnutí výsledků a závěrečné zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

Sheet Metal Forming Processes and Die Design, Vukota Bojanovic
ASM Handbook Volume 14B: Metalworking: Sheet Forming
Metal Forming Handbook, SCHULER GmbH
ČSN EN ISO 6892-1
Další literatura na doporučení vedoucího práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. František Tatíček, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS

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

Ing. Vít Novák, ústav strojírenské technologie FS

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

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2020**

Ing. František Tatíček, Ph.D.	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.	prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis vedoucí(ho) práce	podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

17. 6. 2020
Datum převzetí zadání

Podpis studenta

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma Stanovení křivek mezní tvářitelnosti pomocí zkoušky tahem a systému ARAMIS vypracoval samostatně a veškeré literární prameny a zdroje informací, které jsem použil, cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne . . . .

Bc. Pavel Krejsa

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu práce Ing. Františku Tatíčkovi, Ph.D., za vedení při vypracování diplomové práce, poskytnutí cenných rad, odborné literatury a ochotu konzultovat danou problematiku. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Vítu Novákovi za cenné rady a pomoc při realizaci experimentu. Poděkování patří také mé rodině za podporu po celou dobu studia.

Anotace

Vysoká škola: ČVUT v Praze, Fakulta strojní

Ústav: Ústav strojírenské technologie

Název diplomové práce: Stanovení křivek mezní tvářitelnosti pomocí zkoušky tahem a systému ARAMIS

Akademický rok: 2019/2020

Autor: Pavel Krejsa

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

Konzultant: Ing. Vít Novák

Abstrakt:

Tato diplomová práce je zaměřena na stanovení křivek mezních deformací pomocí tahové zkoušky a systému ARAMIS. Tyto křivky nám udávají zásobu plasticity a vymezují velikost deformace, kterou materiál vydrží, než dojde k porušení. Teoretická část práce se zabývá tvářením, zejména pak tvářitelností a činiteli, které ji ovlivňují. Dále je zde seznámení s tahovou zkouškou. Popsány jsou rovněž optické systémy pro snímání deformací, tvorba a význam FLD včetně činitelů, kteří ovlivňují polohu křivek mezních deformací. V experimentální části je práce zaměřena na zkoušku vzorků z oceli DX57D. Porovnává se vliv rychlosti zatěžování a směru válcování na polohu křivek mezních deformací. Snímání deformací bylo zajištěno optickými systémy ARAMIS a ARGUS. Výstupem je grafické porovnání těchto vlivů a porovnání obou systémů.

Klíčová slova:

Tváření, tvářitelnost, tahová zkouška, křivky mezních deformací, optické měřící systémy, systém ARAMIS, systém ARGUS, ocel DX57D

Rozsah práce a příloh:

Počet stran	84
Počet obrázků	73
Počet tabulek	9

Annotation

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

Department: Department of Manufacturing Technology

Title of work: Determination of forminglimit curvesaccordingto tensile test and Aramis system

Academic year: 2019/2020

Author: Pavel Krejsa

Supervisor: Ing. František Tatíček, Ph.D.

Consultant: Ing. Vít Novák

Abstract:

This thesis focuses on the determination of the curves of limit deformations using the tensile test and the ARAMIS system. These curves give us a supply of plasticity and define the size of the deformation that the material can withstand before the violation. The theoretical part of the thesis deals with forming, especially the formability and factors that influence it. There is also an introduction to the tensile test. Optical systems for sensing deformations, the formation and importance of FLD, including factors that affect the position of the curves of limit deformations, are also described. In the experimental part, the work is focused on the testing of samples made of DX57D steel. The effect of the load rate and the direction of rolling on the position of the curves of the limit deformations are compared. Deformation sense was provided by ARAMIS and ARGUS optical systems. The output is a graphical comparison of these influences and a comparison of the two systems.

Key words:

Forming, formability, tensile test, forming limit curves, optical measuring systems, Aramis system, Argus system, steel DX57D

Volume of work:

Number of pages	84
Number of pictures	73
Number of tables	9

Obsah

1 Úvod ..... - 11 -

2 Tváření a tvářitelnost ..... - 12 -

2.1 Činitelé ovlivňující tvářitelnost ..... - 12 -

2.1.1 Fyzikálně metalurgický charakter materiálu ..... - 13 -

2.1.2 Termomechaničtí činitelé ..... - 13 -

2.1.3 Stav napjatosti ..... - 17 -

2.1.4 Technologičtí činitelé ..... - 18 -

3 Způsoby vyhodnocování chování materiálu ..... - 19 -

3.1 Zkouška tahem ..... - 19 -

3.2 Hodnocení tvářitelnosti tenkých plechů ..... - 22 -

3.2.1 Zásoba plasticity ..... - 22 -

3.2.2 Poměr meze kluzu a meze pevnosti ..... - 22 -

3.2.3 Součinitel plastické anizotropie ..... - 23 -

3.2.4 Exponent deformačního zpevnění ..... - 25 -

3.2.5 Index tvářitelnosti ..... - 26 -

3.2.6 Limitní tvářecí diagramy ..... - 27 -

3.3 Počítačové simulace ..... - 27 -

3.3.1 Metoda konečných prvků ..... - 30 -

4 Limitní tvářecí diagramy (FLD) ..... - 32 -

4.1 Činitelé ovlivňující polohu křivek mezní tvářitelnosti ..... - 34 -

4.2 Získávání FLD a jejich význam ..... - 36 -

5 Optické měřící systémy ..... - 38 -

5.1 Digitální obrazová korelace (DIC) ..... - 38 -

5.1.1 Dvourozměrná korelace ..... - 39 -

5.1.2 Třírozměrná korelace ..... - 40 -

5.2 Systém ARAMIS ..... - 41 -

5.2.1 Princip měření ..... - 43 -

5.3 Systém ARGUS ..... - 44 -
5.3.1 Princip měření ..... - 44 -
6 Návrh experimentu ..... - 46 -
6.1 Návrh zkušebních vzorků ..... - 46 -
6.1.1 Materiál zkušebních vzorků ..... - 46 -
6.1.2 Způsob přípravy zkušebních vzorků ..... - 47 -
6.1.3 Tvar zkušebních vzorků ..... - 48 -
6.1.4 Vytváření měrných sítí ..... - 49 -
6.2 Experimentální zařízení ..... - 53 -
6.2.1 Stroj pro zkoušku tahem ..... - 53 -
6.2.2 Systém ARAMIS 4M ..... - 55 -
6.3 Kalibrace systému ARAMIS 4M ..... - 56 -
6.3.1 Systém ARGUS ..... - 57 -
7 Experiment a vyhodnocení naměřených dat ..... - 58 -
7.1 Průběh zkoušky ..... - 58 -
7.2 Vyhodnocování naměřených dat systémem ARAMIS ..... - 60 -
7.3 Vyhodnocování naměřených dat systémem ARGUS ..... - 63 -
7.4 Naměřená data systémem ARAMIS ..... - 64 -
7.4.1 Naměřená data pro rychlost zatěžování 10 mm/min ..... - 65 -
7.4.2 Naměřená data pro rychlost zatěžování 100 mm/min ..... - 66 -
8 Diskuze a porovnání výsledků ..... - 68 -
9 Závěr ..... - 73 -
Použitá literatura ..... - 76 -
Seznam obrázků ..... - 80 -
Seznam tabulek ..... - 83 -
Příloha 1 – Tvar zkušebních vzorků ..... - 84 -

Použité veličiny a jednotky

Značka	Jednotka	Veličina
A	%	Tažnost
b	mm	Šířka vzorku
C	-	Materiálová konstanta
F	N	Působící síla
$F_e, F_{p0,2}$	N	Síly na mezi kluzu
F_m	N	Maximální síla při přetržení
IT	-	Index tvářitelnosti
k	-	Materiálová konstanta
L_0	mm	Počáteční délka zkušební tyče
L_u	mm	Konečná délka zkušební tyče po přetržení
ΔL	mm	Prodloužení délky vzorku
n	-	Exponent deformačního zpevnění
$\bar{n}$	-	Střední hodnota exponentu deformačního zpevnění
n_0, n_{45}, n_{90}	-	Hodnoty exponentu deformačního zpevnění v různých směrech
R	MPa	Smluvní napětí
R_e	MPa	Mez kluzu
R_m	MPa	Mez pevnosti v tahu
$R_{p0,2}$	MPa	Smluvní mez kluzu
r_α	-	Směrová hodnota normálové anizotropie
$\bar{r}$	-	Střední hodnota normálové anizotropie
r_0, r_{45}, r_{90}	-	Hodnoty normálových anizotropií v různých směrech
Δr	-	Stupeň plošné anizotropie
S_0	mm^2	Počáteční plocha příčného průřezu zkušební tyče
S_u	mm^2	Nejmenší plocha příčného průřezu po přetržení
s	mm	Tloušťka vzorku
v	$m \cdot s^{-1}$	Rychlost pohybu nástroje
Z	%	Kontrakce
ZP	MPa	Zásoba plasticity
ε	-	Poměrné prodloužení
ε_{max}	-	Maximální hodnota poměrného prodloužení
ν	-	Ukazatel stavu napjatosti
σ	MPa	Normálové napětí
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	MPa	Hlavní normálová napětí
φ	-	Stupeň deformace
$\dot{\varphi}$	m^{-1}	Rychlost deformace
φ_1	-	Hlavní deformace
φ_2	-	Vedlejší deformace

Značka	Jednotka	Veličina
CAD		Computer-aided design (počítačem podporované projektování)
CAE		computer-aided engineering (počítačem podporované inženýrství)
CAM		Computer-aided manufacturing (počítačová podpora obrábění)
CCD		Charged Coupled Device (zařízení s vázanými náboji)
DIC		Digital Image Correlation (digitální korelace obrazu)
FLC		Forming Limit Diagram (diagram mezních přetvoření)
FLD		Forming Limir Curve (křivka mezních přetvoření)

1 Úvod

V posledních letech dochází k vývoji nových materiálů určených k tváření. Tyto materiály vykazují výborné deformační charakteristiky se zachováním vysoké pevnosti. Pro úspěšnou výrobu je nutné popsat chování materiálu co nejpřesněji. Z tohoto důvodu provádíme materiálové zkoušky, ze kterých získáváme informace o vlastnostech materiálu. Mechanické vlastnosti vyjadřují chování materiálu s ohledem na působení určitého druhu namáhání. Mezním stavem je stav, kdy dochází u součásti ke ztrátě schopnosti plnit svou funkci, nejčastěji to bývá porušení materiálu. Při tváření je součást často deformována až na samotnou hranici tvářitelnosti, proto je nutné stanovit hranici, aby nedocházelo k porušování celistvosti tvářených dílů.

Pro vymezení přípustné deformace nám slouží křivky mezních deformací označované také jako FLC. Tyto křivky udávají zásobu plasticity, vymezují tím velikost deformace, kterou materiál snese před vznikem trhliny. Vyhodnocování zásoby plasticity je možné provádět celou řadou mechanických i technologických zkoušek. Mezi nejzákladnější patří zkouška tahem. Tato zkouška, která je definována normou ČSN EN ISO 6892-1 je jedna z nejpoužívanějších destruktivních metod zkoušení materiálů.

Máme mnoho možností, jak měřit deformace. Trendem poslední doby jsou optické měřící systémy. Tyto bezkontaktní měřicí systémy jsou používány pro měření reálných deformací ve 3D prostoru za použití metod digitální obrazové korelace. Tyto systémy mají propracované metody vyhodnocování za použití vysoce efektivních CCD snímačů. Výhodou těchto systémů je bezkontaktnost v kombinaci s velkou přesností.

Cílem této práce je stanovení křivek mezních deformací pomocí zkoušky tahem a systémem ARAMIS. Při zkoušce tahem nedochází ke tření mezi materiálem a nástrojem. Cílem je sledovat deformace na zkušebním stroji pro zkoušku tahem pomocí systému ARAMIS. Použité vzorky jsou podobné jako při zkoušce tahem. Na polohu křivek mezních deformací má vliv velké množství faktorů. V tomto případě došlo k porovnání dvou faktorů, a to rychlosti zatěžování a směru válcování. Vyhodnocení bylo provedeno na vzorcích z oceli DX57D. Součástí práce byla správná příprava povrchu vzorků a kalibrace systému ARAMIS 4M, kterým byly zaznamenávány deformace z tahové zkoušky.

2 Tváření a tvářitelnost

Tváření kovů je proces, při kterém dochází k deformaci materiálu působením vnějších sil. Cílem tváření je tedy udělit příslušnému tělesu požadovaný tvar a rozměry. Pokud se těleso nevratně deformuje, jedná se o plastickou deformaci, tuto deformaci jsme schopni dosáhnout jen tehdy, když překročíme určité mezní napětí (v nejjednodušším případě tzv. mez kluzu). Pokud by tato podmínka nebyla splněna, byla by dosažena pouze elastická deformace a po jejím ukončení by se těleso vrátilo ke svému původnímu tvaru. Plastická deformace tedy probíhá od meze kluzu až po porušení materiálu. Ve většině případů tvářecích procesů se snažíme zabránit porušení materiálu nebo iniciaci trhlin. Existují ovšem výrobní technologie, kde naopak chceme dosáhnout porušení materiálu, příkladem může být například technologie stříhání. Procesem tváření a doprovodnými procesy lze optimalizovat strukturu materiálů, tím můžeme dosáhnout určitých mechanických vlastností materiálu (pevnost, vrubová houževnatost...) [1], [5]

Každý materiál se při tváření bude chovat rozdílně, je to způsobeno zejména vlastnostmi materiálu, které určují vhodnost materiálu pro různé druhy zpracování. Na vlastnosti daného materiálu má nejvyšší vliv především jeho chemické složení, tepelné zpracování a způsob výroby polotovaru. Mezi nejčastější materiálové charakteristiky, které sledujeme patří mez kluzu R_e, mez pevnosti R_m, tažnost A, kontrakce Z, součinitel plastické anizotropie r a exponent deformačního zpevnění n. Díky těmto vlastnostem materiálu, jejich chemickému složení a struktuře můžeme posoudit tvářitelnost daného materiálu. Tvářitelnost se kvalifikuje ve čtyřech stupních jako zaručená, velmi dobrá, dobrá a omezená. [3], [5]

Tvářitelnost neboli plasticita materiálu, udává schopnost materiálu, být tvářen a dosáhnout plastické deformace, aniž by došlo k porušení materiálu. Zásoba plasticity nám udává, do jaké míry můžeme materiál deformovat, aniž by došlo ke vzniku trhliny. Čím větší zásoba plasticity, tím lepší tvářitelnost. [1]

2.1 Činitelé ovlivňující tvářitelnost

Tvářitelnost je ovlivňována celou řadou aspektů vstupujících do tvářecího procesu. Tyto činitele můžeme rozdělit do několika skupin. Touto skupinou je například

fyzikálně-metalurgický charakter materiálu, termomechaničtí činitelé, napěťový stav materiálu a technologičtí činitelé. [1]

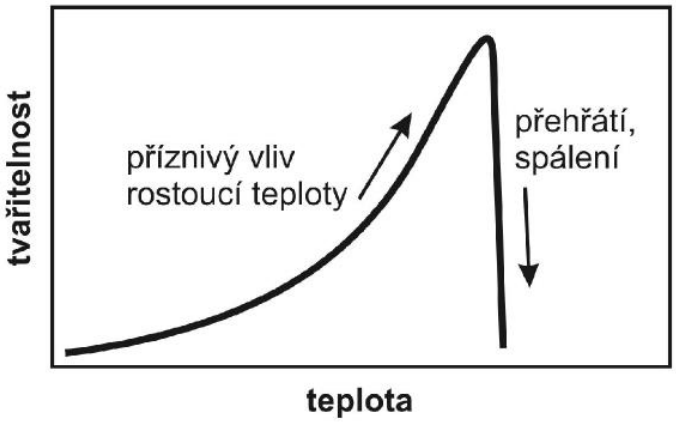
2.1.1 Fyzikálně metalurgický charakter materiálu

Tímto činitelem jsou myšleny všechny vlastnosti a procesy, týkající se materiálové stránky tváření. Základním faktorem je chemické složení, neboť nám výrazně ovlivňuje téměř všechny materiálové vlastnosti. Chemické složení je dáno typem materiálu a postupem výroby. Tyto faktory nám rozhodují o strukturním stavu a charakteru zrn. Strukturu rozdělujeme podle počtu strukturních složek. Z hlediska tvářitelnosti je lepší struktura jednofázová, neboť dojde k vyššímu zpevnění porušením základní mřížky kovu intersticiálně nebo substitucí atomů dalších prvků. U vícefázové struktury dochází k výraznému snížení tvářitelnosti vlivem rozdílných vlastností složek a vzniku sraženin v mezifázovém rozhraní. U charakteru zrn se zaměřujeme především na velikost, tvar, orientaci a čistotu hranic zrn. Tyto vlastnosti souvisí především se způsobem zpracování materiálu. Litá struktura může obsahovat množství vad, například vměstky, dutiny, póry a z hlediska tvářitelnosti je méně vhodná než struktura již dříve protvářená. Protvářená struktura je vhodnější, neboť obsahuje méně nehomogenit a je jemnější. [1], [3]

2.1.2 Termomechaničtí činitelé

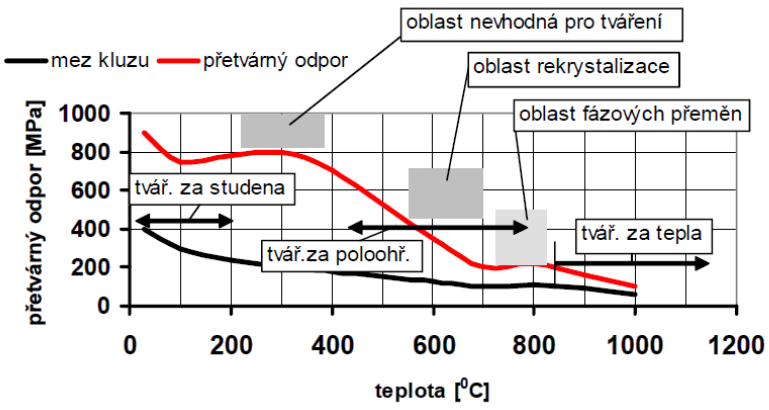
Mezi termomechanické činitele řadíme teplotu, deformační rychlost a deformační historii.

Velmi důležitou rolí při tváření je teplota. Každý materiál má jiný rozsah intervalu tvářecích teplot. Při ohřívání dochází ke zvýšení pohyblivosti atomů a dislokací a zrychluje se difúze. Zvyšující se teplota zlepšuje tvářitelnost, neboť dochází k poklesu deformačního odporu. Toto zlepšení se ovšem neděje stále, po překročení určité hodnoty dojde výraznému zhoršení tvářitelnosti. Tuto skutečnost můžeme vidět na obrázku 1. Po překročení této teploty dojde k přehřátí, případně spálení. Při přehřátí dochází k velkému hrubnutí zrna a materiál je velmi náchylný k interkrystalickému lomu. Takto zhrublé zrno jde zjemnit opakovanou rekrystalizací, které docílíme opatrným tvářením za tepla. Při stále zvyšující se teplotě může dojít ke spálení materiálu, jedná se o natavení hranic zrn. Při pokusu o tváření spáleného materiálu dojde k rozdrobení materiálu, protože takovýto materiál má nulovou plasticitu. Spálení je nevratný proces a materiál musí být znovu přetaven. [1], [3]



Obrázek 1: Vliv teploty na tvářitelnost [1]

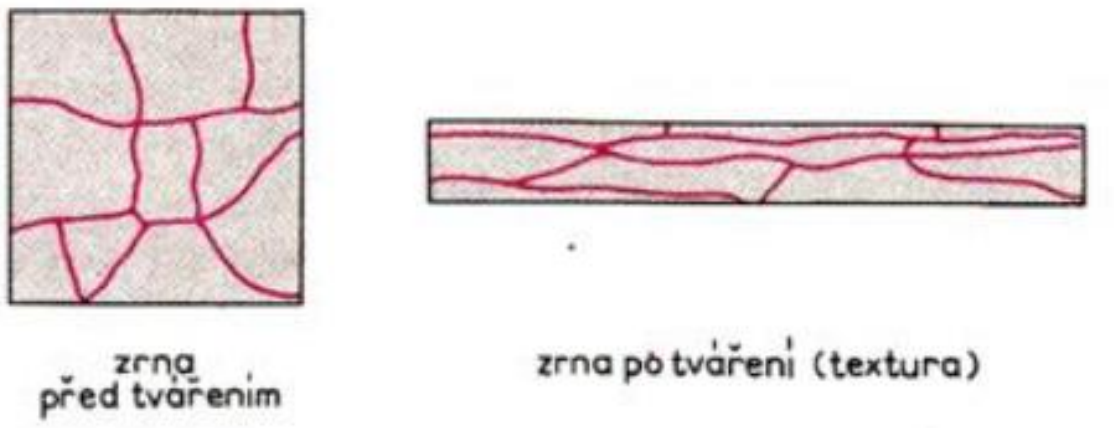
Podle teplot můžeme tváření rozdělit na tváření za studena a za tepla. Za hranici mezi těmito teplotami považujeme teplotu rekrystalizace. Teplota rekrystalizace je teplota, při které se deformovaná zrna vzniklá tvářením za studena regenerují bez změny krystalové mřížky. Teplota rekrystalizace je cca 0,4 hodnoty teploty tání kovu v Kelvinech. Graf zobrazující tvářecí teploty tváření pro ocel můžeme vidět na Obrázek 2. Tento graf nám rovněž zachycuje změnu přetvárného odporu a meze kluzu se zvyšující se teplotou. Důsledkem snižujícího se přetvárného odporu je lepší tvářitelnost při vyšších teplotách. [1], [2], [5]



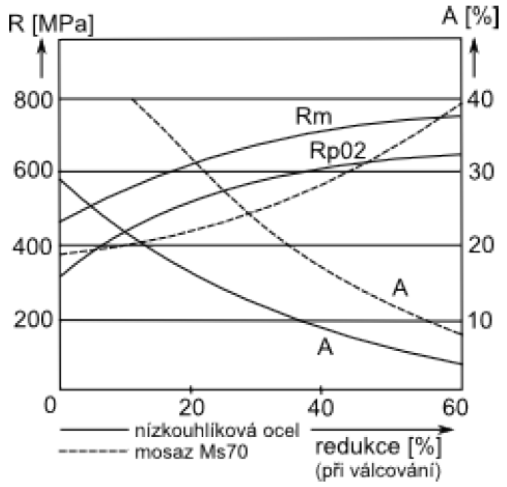
Obrázek 2: Závislost přetvárného odporu na teplotě a oblasti tváření [6]

Tváření za studena je pro nás tváření, které se realizuje pod rekrystalizační teplotou. Díky tomu dochází k deformaci zrn ve směru tváření a zpevňování materiálu. Z materiálového hlediska je zpevňování odpor proti pohybu dislokací v krystalografické mřížce. Stav, kdy dislokace jsou překážkou proti pohybu dalších dislokací, nazýváme

deformační zpevnění. Zpevňováním materiálu dochází ke zvyšování nárůstu odporu k dalšímu tváření, až do doby, než dojde k vyčerpání plastičnosti materiálu. Při tomto stavu již nejsou žádné další dislokace schopny projít mřížkou. Deformační schopnost lze znovu obnovit zahřátím. Při tváření za studena vzniká textura a dochází k anizotropii mechanických vlastností, protože zrno se deformuje ve směru tváření. Tuto změnu zrn je dobře vidět na Obrázek 3. O tom, jak nám tváření za studena ovlivňuje mechanické vlastnosti vypovídá Obrázek 4. S rostoucí deformací dochází ke zpevnění materiálu, což se projeví na mezi kluzu a mezi pevnosti, jejichž hodnoty se zvyšují, ale klesá tažnost. Pokud by došlo k úplnému vyčerpání plastičnosti a tažnost by byla rovna nule, mez kluzu i mez pevnosti by byli totožné. Výhodou tváření za studena jsou již zmíněná zlepšení mechanických vlastností, ale také velmi dobrá rozměrová přesnost s kvalitním povrchem. Z tohoto důvodu se tváření za studena často používá jako závěrečná operace. Nevýhodami jsou omezená tvárnost materiálu, nerovnoměrné zpevnění a nutnost velkých tvářecích sil. [2], [3]



Obrázek 3: Změna tvaru zrn v důsledku tváření za studena [3]



Obrázek 4: Změna mechanických vlastností při válcování [8]

Tváření za tepla probíhá nad rekrystalizační teplotou. Teplota tváření je běžně nad hodnotou 0,6 až 0,7 teploty tavení daného materiálu. Při tváření za tepla probíhají dva základní procesy, jedním z nich je zpevňování, které je popsáno výše. Dalším procesem je proces uzdravování, který probíhá v průběhu tváření nebo bezprostředně po něm. Vlivem uzdravovacích procesů mizí zpevnění způsobené tvářením. To, jak bude uzdravování probíhat, závisí na termomechanických vlastnostech (teploty, velikost a rychlost deformace), ale i na strukturním stavu a chemickém složení materiálu. K tváření za tepla jsou potřeba daleko menší síly, neboť nedochází k intenzivnímu zpevňování materiálu. Velký vliv na průběh tváření má deformační rychlost. Pokud je deformační rychlost vysoká, nestihne dojít k úplné rekrystalizaci a roste deformační odpor. Výhodou tváření za tepla je zachování plastických vlastností po dobu tváření, díky tomu může dojít k velkým stupňům deformací. Nedochází však ke změnám fyzikálních a mechanických vlastností. Výsledný povrch není tak kvalitní, vlivem okujení, navíc může vzniknout hrubé zrno. [1], [2], [3]

Rychlost deformace $\dot{\varphi}$ [s^{-1}] je jednou ze základních veličin charakterizující tvářecí proces. V dnešní době dochází k redukci tvářecích časů, díky tomu se zvyšuje rychlosti deformace. Rychlost deformace souvisí také se zvolením způsobu tváření a výběrem tvářecího stroje. U tvářecího stroje je jedním z hlavních parametrů rychlost pohybu nástroje v [$m \cdot s^{-1}$]. Přehled parametrů rychlosti pohybu nástroje a deformační rychlosti pro různé tvářecí stroje můžeme vidět v tabulce 1. Dle rychlosti deformace můžeme rozdělit tvářecí proces na kvazistatický a dynamický. [1]

Tabulka 1: Parametry tvářecích strojů

Tvářecí stroj	$v\ [m \cdot s^{-1}]$	$\dot{\varphi}\ [s^{-1}]$	Tvářecí proces
Hydraulické stroje	0,02-0,25	0,01-10	Kvazistatický
Klikové a vřetenové lisy	0,3-06	4-25	Dynamický
Buchary	5-8	40-60	
Vysokorychlostní buchary	20-40	200-1000	

Dalším činitelem vstupujícím do procesu tváření je deformační historie. V praxi probíhá tváření tak, že dochází k opakování menších úběrů a v čase mezi úběry dochází k uzdravovacím procesům deformačně zpevněného materiálu a tím se obnovují plastické vlastnosti. Deformační historii tedy tvoří posloupnost úběrů v kombinaci s teplotou. Tyto faktory dokážou ovlivnit tvářitelnost, ale i vlastnosti a výslednou strukturu, proto je potřeba dbát na správné provádění tvářecích procesů. Z hlediska tvářitelnosti i struktury je optimální, když po každém úběru dojde k úplné rekrystalizaci. [1]

2.1.3 Stav napjatosti

Napětím je myšlena veličina, která udává podíl síly na plochu. Představu o přítomnosti, velikosti a smyslu hlavních napětí v tvářeném tělese nám poskytuje stav napjatosti. Pro analýzu se používají schémata napjatosti. Napjatost můžeme rozdělit na tři základní případy, a to napjatost jednoosou (přímkovou), dvouosou a trojosou. Pokud výslednice sil směřuje do tělesa, hovoříme o tlakové napjatosti, v opačném případě o tahové. Pokud známe napětí, která působí na těleso, jsme schopni určit bezrozměrný ukazatel stavu napjatosti podle vzorce: [1]

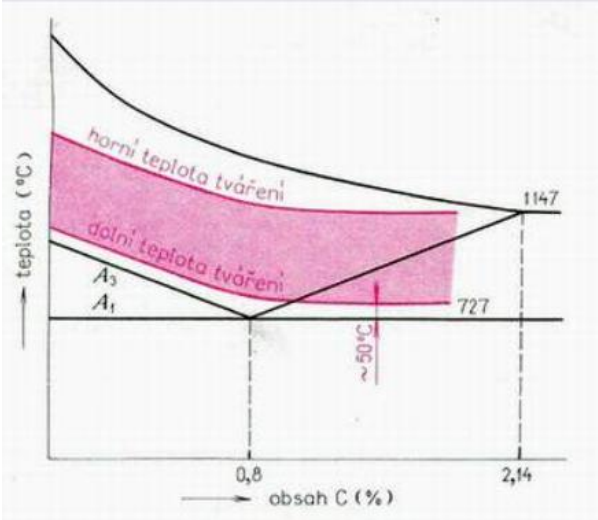
$$\nu = \frac{3 \cdot \sigma_8}{S_\sigma} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}} \tag{1.1}$$

Kde: σ_1, σ_2 a σ_3 jsou hlavní normálová napětí

Ukazatel stavu napjatosti nám určuje převažující složky napětí v tělese. Stav napjatosti má významný vliv na tvářitelnost a deformační odpor. Tlaková napjatost má pozitivní vliv na tvářitelnost. Tahová napětí zvyšují pravděpodobnost křehkého lomu. Z těchto důvodů lze zvýšit tvářitelnost vhodnou volbou napjatosti. [2]

2.1.4 Technologičtí činitelé

Mezi tyto činitele řadíme vliv jednotlivých prvků, které přímo ovlivňují tvářecí proces. Například volba tvářecí technologie, která nám ovlivňuje kvalitu a přesnost výrobků. Na volbu technologie nám navazují další důležitá rozhodnutí, jako je volba tvářecího stroje a nástrojů. Při volbě stroje je nutné znát jeho parametry a kinematiku pohybu nástroje. S pohybem nástroje souvisí věda zvaná tribologie. Je to věda zabývající se vzájemným pohybem materiálů, zejména pak procesy tření, opotřebení a mazání. Právě mazání je z technologického hlediska velmi důležitou součástí tvářecího procesu. Mazání obecně snižuje tření a tím zvyšuje kvalitu povrchu. Na volbě tvářecí technologie je závislá i volba materiálu. U materiálu je nutné znát jeho složení a vlastnosti, aby bylo možné stanovit teplotu a způsob ohřevu. Nejčastěji se pro tváření používá ocel, oblast tvářecích teplot můžeme vidět na Obrázek 5. [3]



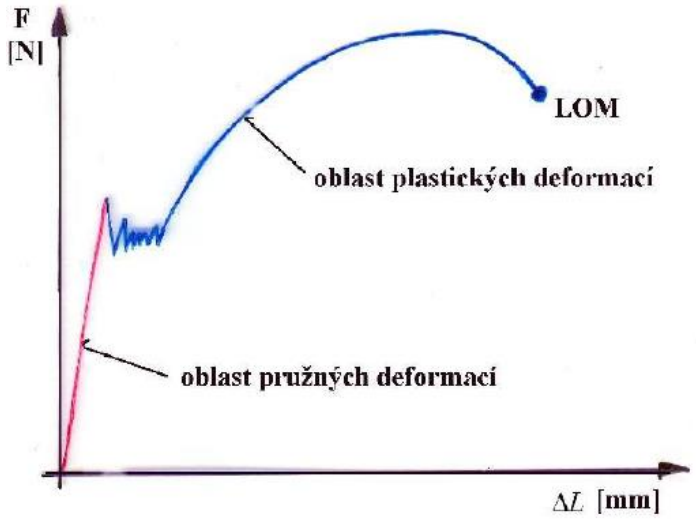
Obrázek 5: Oblast tvářecích teplot [3]

3 Způsoby vyhodnocování chování materiálu

Při přesné výrobě tvarově komplikovaných výrobků se neobejdeme bez predikce a zhodnocení vlastností materiálu použitého při výrobě. K tomu, abychom dokázali odhadnout chování materiálu provádíme různé zkoušky. Mezi základní zkoušky pro určování materiálových vlastností řadíme například tahovou, tlakovou, ohybovou nebo krutovou zkoušku. Další skupinou jsou technologické zkoušky, ty svým průběhem napodobují tvářecí operace a dokážeme pomocí nich odhadnou, jak se bude materiál chovat. Mezi technologické zkoušky patří například zkouška hloubením dle Erichsena, zkouška rozšiřováním otvoru, Fukuiho zkouška, zkouška Nakajima a další. K vyhodnocování chování materiálů také neodmyslitelně patří počítačové simulace, které se v poslední době staly standardem. Tyto simulace nám mohou dát velmi dobrou představu, je ovšem nutné realizovat je správně a se správnými daty a nastavením. [1], [2], [13]

3.1 Zkouška tahem

Tato zkouška patří mezi nejzákladnější mechanické zkoušky materiálů. Norma ČSN EN ISO 6892–1 nám udává podmínky zkoušení kovových materiálů tahem za pokojové teploty. Materiál je při tahové zkoušce zatěžován staticky jednoosým tahem. Zkoušení se provádí na vzorcích normalizovaných rozměrů a může se provádět na prakticky všech materiálech. Pro naše účely bude zkušební vzorek z plechu o tloušťce 0,7 mm a jeho rozměry i příprava bude popsána v jedné z následujících kapitol. Samotná zkouška probíhá tak, že vzorek s počátečním průřezem S_o a počáteční délkou l_o zatěžujeme plynule silou F, čímž vzniká v materiálu napětí. Se vzrůstajícím napětím dochází k deformaci tělesa, které končí přetržením vzorku. Z průběhu zatěžování získáváme závislost síly na prodloužení vzorku. Tento diagram se nazývá pracovní a jeho podobu můžeme vidět na Obrázek 6. [2], [10], [11]



Obrázek 6: Pracovní diagram měkké oceli [9]

Tento pracovní diagram je podkladem pro vyhodnocení mechanických vlastností. Stanovují se smluvní vlastnosti zaznamenané ve smluvním diagramu. Tento typ diagramu pro hlubokotažnou ocel můžeme vidět na Obrázek 7. Smluvní vlastnosti jsou vztaženy k rozměrům zkušebního tělesa před zkouškou. Přehled vlastností a vztahy pro jejich výpočet jsou vyjádřeny takto: [11]

Mez kluzu	$R_e = \frac{F_e}{S_0}$	[MPa]	(2.1)
Smluvní mez kluzu	$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0}$	[MPa]	(2.2)
Mez pevnosti v tahu	$R_m = \frac{F_m}{S_0}$	[MPa]	(2.3)
Tažnost	$A = \frac{(L_u - L_0)}{L_o} \cdot 100$	[%]	(2.4)
Kontrakce	$Z = \frac{(L_u - L_0)}{L_o} \cdot 100$	[%]	(2.5)

Kde: F_e a $F_{p0,2}$ [N] jsou síly na mezi kluzu

F_m [N] je maximální síla při přetržení

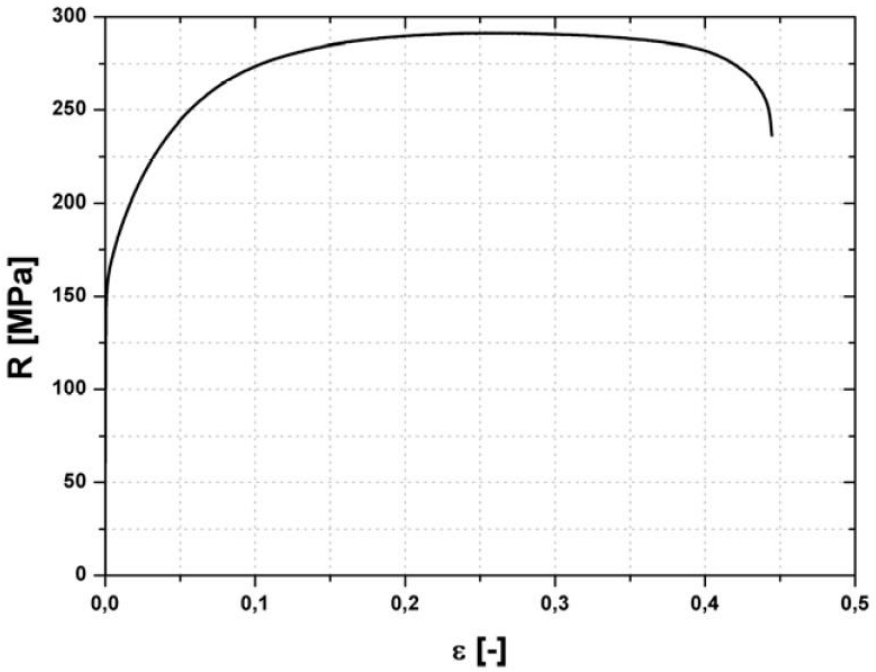
S_0 [mm^2] je počáteční plocha příčného průřezu zkušební tyče

S_u [mm^2] je nejmenší plocha příčného průřezu po přetržení

L_0 [mm] je počáteční délka zkušební tyče

L_u [mm] je konečná délka zkušební tyče po přetržení

Všechny výše uvedené vlastnosti jsou pro nás základním výstupem z tahové zkoušky. Na mezi kluzu R_e se materiál přestává chovat elasticky a dochází k první plastické deformaci. Výrazná mez kluzu je dobře patrná na obrázku 6. Jedná se o oblast na začátku modré křivky. Pokud materiál nevykazuje výraznou mez kluzu, určuje se smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$. Určuje se jako napětí při dosažení předepsaného prodloužení, nejčastěji to bývá 0,2 % plastické deformace. Mez pevnosti v tahu R_m je největší dosažené napětí před přetržením. Důležitou vlastností z hlediska tvářecího procesu bývá tažnost A, tažnost nám udává prodloužení zkušebního vzorku a je vyjádřená v procentech počáteční měrné délky. Obzvláště u technologie hlubokého tažení je žádoucí, aby měl materiál dobrou tažnost v kombinaci s dobrými mechanickými vlastnostmi. Kontrakce Z je změna plochy příčného průřezu vyjádřená v procentech počáteční plochy. [10], [13]



Obrázek 7: Smluvní tahový diagram [12]

Na obrázku 7 můžeme vidět smluvní tahový diagram hlubokotažného materiálu vhodného k tváření. Pokud tento diagram porovnáme s diagramem na Obrázek 6 je patrné, že zde není výrazná mez kluzu. Na ose y v tomto diagramu máme smluvní napětí a na ose x je relativní (poměrné) prodloužení. Tyto veličiny můžeme vypočítat pomocí vztahů: [11]

$$R = \frac{F}{S_0} \text{ [MPa]} \tag{2.6}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \text{ [-]} \tag{2.7}$$

Kde: F [N] je působící síla

S_0 [mm^2] je počáteční plocha příčného průřezu zkušebního vzorku

$\Delta L = L_u - L_o$ [mm] je prodloužení délky vzorku

3.2 Hodnocení tvářitelnosti tenkých plechů

3.2.1 Zásoba plasticity

Tato materiálová vlastnost nám udává, do jaké míry můžeme materiál tvářet, aniž by došlo k iniciaci trhliny. Čím vyšší zásoba plasticity, tím je plastická deformace větší. Zásoba plasticity je ovlivněna výše uvedenými činiteli, zejména metalurgickými, technologickými a termomechanickými. Z tahové zkoušky získáme veličiny, pomocí kterých pak můžeme zásobu plasticity určit ze vzorce: [2]

$$ZP = k \cdot (R_m - R_e) \cdot \varepsilon_{max} \ [MPa] \tag{2.8}$$

Kde: k je konstanta a $k = 2/3$ pro materiály s nevýraznou mezí kluzu

$k = 3/4$ pro materiály s výraznou mezí kluzu

R_m je mez pevnosti

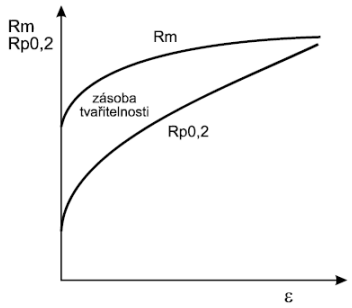
R_e je mez kluzu

ε_{max} je maximální hodnota poměrného prodloužení

3.2.2 Poměr meze kluzu a meze pevnosti

Dalším faktorem, jehož hodnoty můžeme získat rovněž z tahové zkoušky je poměr meze kluzu a meze pevnosti. Pro dobrou tvářitelnost je žádoucí, aby mez

kluzu byla co nejmenší. Při tomto stavu dojde nejdříve k plastické deformaci a je zapotřebí nižší síla. Poměr meze kluzu a meze pevnosti nám určuje zásobu tvářitelnosti, jak můžeme vidět na obrázku 8. Pokud se nám rovná mez kluzu a mez pevnosti, nachází se materiál ve stavu, kdy jej už není možné tvářet bez vzniku trhlin. Takovýto materiál musí projít uzdravovacími procesy k obnovení schopnosti být dále tvářen. [2]



Obrázek 8: Poměr meze kluzu a meze pevnosti jako ukazatele tvářitelnosti [2]

Pokud tento faktor vyjádříme číselně, tak platí, že čím nižší hodnota, tím je tvářitelnost lepší. V praxi pracujeme s těmito hodnotami: [17]

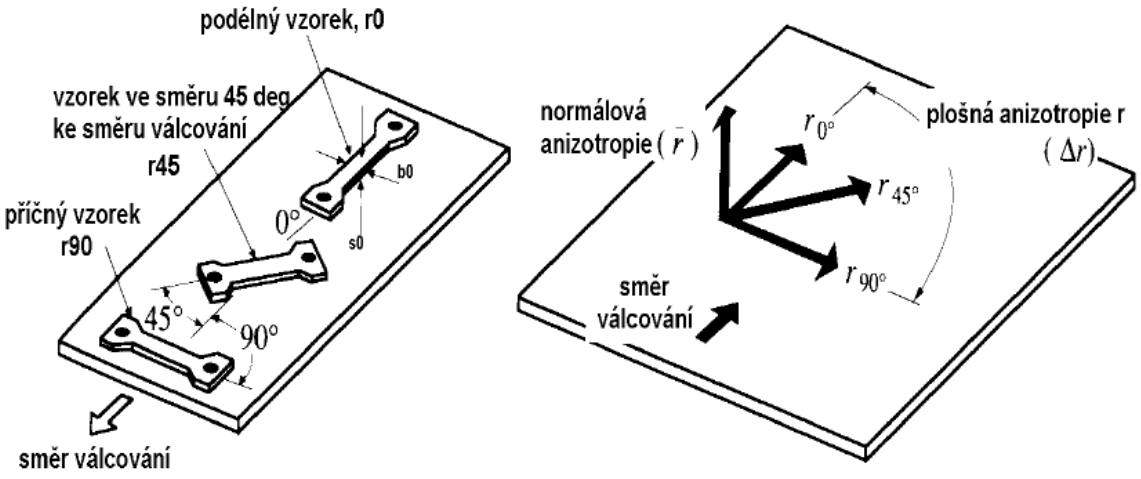
$\frac{R_{p0,2}}{R_m} = 0{,}55 \div 0{,}65$ vynikající tvářitelnost materiálu

$\frac{R_{p0,2}}{R_m} = 0{,}65 \div 0{,}75$ nižší tvářitelnost materiálu

$\frac{R_{p0,2}}{R_m} > 0{,}75$ obtížná tvářitelnost materiálu

3.2.3 Součinitel plastické anizotropie

Anizotropií mechanických vlastností rozumíme nestejnoměrné vlastnosti válcovaného materiálu v různých směrech souřadného systému. Vlivem válcování dochází u plechu válcovaných za studena k deformaci zrn především v jednom směru. Tato deformace má za následek různé pevnostní a plastické závislosti vztažené ke směru odebírání vzorku. Materiál, který je namáhán stejně, jako bylo provedeno válcování je označen 0°. V praxi používáme pro vyhodnocení materiál odebíraný ve třech různých směrech: r_0 pro směr válcování, r_{45} pro materiál odebíraný pod úhlem 45° od směru válcování a r_{90} pro materiál odebíraný pod úhlem 90° od směru válcování. Lepší přehled můžeme vidět na obrázku 9, kde jsou znázorněny všechny tři směry odebíraných vzorků pro tahovou zkoušku. [2], [14], [15]



Obrázek 9: Princip odebírání vzorků s ohledem na směr válcování [2]

Součinitel plastické anizotropie je poměr skutečné plastické deformace šířky a skutečné plastické deformace tloušťky při zkoušce jednoosým tahem: [2]

$$r_\alpha = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_s} = \frac{ln\left(\frac{b_0}{b_k}\right)}{ln\left(\frac{s_0}{s_k}\right)} = \frac{ln\left(\frac{b_0}{b_k}\right)}{ln\left(\frac{l_k \cdot b_k}{l_0 \cdot b_0}\right)} \quad [-] \tag{2.9}$$

Kde: r_α [-] je směrová hodnota r

b [mm] je šířka vzorku

s [mm] je tloušťka vzorku

Velikost součinitele plastické anizotropie nám udává odolnost materiálu proti ztenčení při tažení. Čím je tato hodnota vyšší, tím je materiál vhodnější k hlubokému tažení. Hodnota r závisí na směru působící síly vzhledem ke směru válcování. Při hodnocení tvářitelnosti se používá střední hodnota normálové anizotropie: [14]

$$\bar{r} = \frac{(r_0 + 2 \cdot r_{45} + r_{90})}{4} \quad [-] \tag{2.10}$$

Kde: $\bar{r}$ [-] je střední hodnota normálové anizotropie

r_0, r_{45} ar_{090} [-] jsou hodnoty normálových anizotropií v různých směrech

Plošná anizotropie nám vyjadřuje nebezpečí vzniku cípů a je vyjádřena pomocí stupně plošné anizotropie následujícím vzorcem: [14]

$$\Delta r = \frac{r_0 - 2 \cdot r_{45} + r_{90}}{2} \quad [-] \tag{2.11}$$

Kde: Δr [-] je stupeň plošné anizotropie

r_0, r_{45} a r_{90} [-] jsou hodnoty normálových anizotropií v různých směrech

Pokud je $\Delta r > 0$ dochází ke tvorbě cípů ve směrech 0° a 90° ke směru válcování plechu

Pokud je $\Delta r = 0$ nedochází ke tvorbě cípů

Pokud je $\Delta r > 0$ dochází ke tvorbě cípů ve směrech +45° a -45° ke směru válcování plechu

Čím vyšší je hodnota normálové anizotropie $\bar{r}$ a nižší absolutní hodnota stupně plošné anizotropie Δr, tím menší je míra ztenčování stěny v průběhu tažení, proto jsou takovéto plechy vhodné k hlubokému tažení. [2], [14], [15]

3.2.4 Exponent deformačního zpevnění

Exponent deformačního zpevnění n je dalším důležitým ukazatelem technologické tvářitelnosti a jeho stanovení je definováno normou ČSN EN ISO 10275. Vyjadřuje schopnost materiálu rovnoměrně se plasticky deformovat. Při této deformaci dochází ke zpevňování materiálu za studena. Exponent deformačního zpevnění můžeme získat ze vztahu závislosti mezi skutečným napětím a skutečnou plastickou deformací: [2], [16]

$$\sigma = C \cdot \varphi^n \qquad [N \cdot mm^{-2}] \tag{2.12}$$

Kde: C [-] je materiálová konstanta

φ [-] je stupeň deformace

n [-] je exponent deformačního zpevnění

n následně určíme ze vztahu:

$$n = \frac{\log(\sigma) - \log(C)}{\log(\varphi)} \quad [-] \tag{2.13}$$

Stejně jako anizotropie závisí exponent deformačního zpevnění na směru válcování. Také se posuzuje nejčastěji ve třech směrech a to r_0 pro směr válcování, r_{45} pro materiál odebíraný pod úhlem 45° od směru válcování a r_{90} pro materiál odebíraný pod úhlem 90° od směru válcování. Vážený průměr hodnot pro tyto směry nám stanový výslednou hodnotu exponentu deformačního zpevnění: [2], [17]

$$\bar{n} = \frac{n_0 - 2 \cdot n_{45} + n_{90}}{2} \quad [-] \tag{2.14}$$

Kde: $\bar{n}$ [-] je střední hodnota exponentu deformačního zpevnění

n_0, n_{45} a n_{90} [-] jsou hodnoty exponentu deformačního zpevnění v různých směrech

Vliv hodnoty exponentu deformačního zpevnění na hodnocení tvářitelnosti: [16]

$\bar{n} < 0{,}215$ nízká tažnost

$\bar{n} = 0{,}215 \div 0{,}25$ dobrá tažnost

$\bar{n} > 0{,}25$ vynikající tažnost

S rostoucí hodnotou exponentu deformačního zpevnění roste deformace při maximálním zatížení. Také křivka získaná ze zkoušky tahem je strmější. Zvětšuje se rovněž rozdíl mezi mezí pevností a mezí kluzu. Proto čím vyšší hodnota exponentu zpevnění, tím vhodnější ocel k tváření. [17]

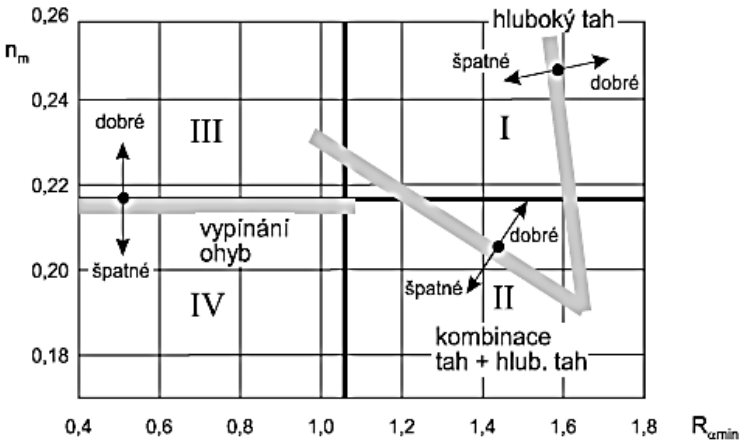
3.2.5 Index tvářitelnosti

Jedním z ukazatelů tvářitelnosti je rovněž index tvářitelnosti IT. Z charakteristik získaných z tahové zkoušky, kterými jsou součinitel plastické deformace r a exponent deformačního zpevnění n jsme schopni vyhodnotit vhodnost plechu k tvářecím operacím. Pro vyjádření se používá vztah dle Lankorda a Lieta: [2]

$$IT = \bar{r} \cdot \bar{n} \cdot 1000 \quad [-] \tag{2.15}$$

U obou parametrů platí, že čím vyšší je jeho hodnota, tím lepší je jeho tvářitelnost. Materiály s velmi dobrou plastičností mají IT>300.

Dle vlivu součinitele plastické deformace *r a* exponentu deformačního zpevnění *n* rozdělujeme oceli do čtyřech skupin. Tyto skupiny znázorňuje diagram tvářitelnosti dle Lieta na obrázku 10. [2]



Obrázek 10: Diagram tvářitelnosti podle Lieta [2]

Diagram je rozdělen do 4 oblastí:

Oblast I – značí plechy vhodné pro nejsložitější tažné operace

Oblast II – značí plechy pro převažující tlaková deformace

Oblast III – značí plechy vhodné pro převažující tahovou deformaci

Oblast IV – značí plechy nevhodné pro hluboké tažení

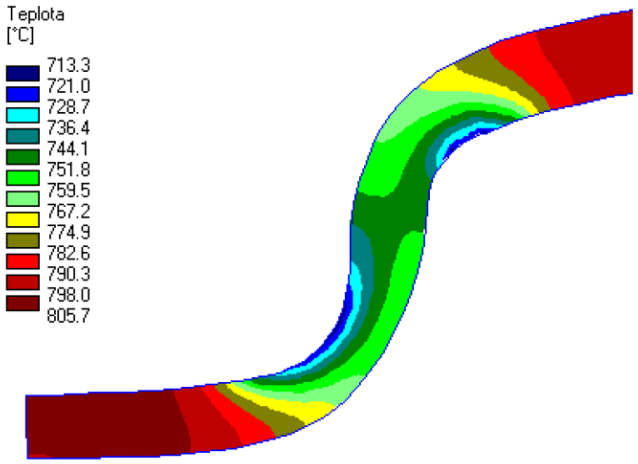
3.2.6 Limitní tvářecí diagramy

Tyto diagramy, jinak také nazývané FLD (forming limit diagrams) jsou grafy, které zobrazují zásobu plasticity materiálu. Dokážou nám poskytnout informace o chování materiálu při plastické deformaci a dávají mám možnost předejít potencionálním problémům při tváření. Vzhledem k charakteru této práce bude problematice týkající se těchto diagramů věnována celá následující kapitola.

3.3 Počítačové simulace

Počítačové simulace jsou v technické praxi stále více využívanou součástí pro řešení problémů v oblasti tváření. Díky zapojení počítačové podpory do praxe lze docílit k maximálnímu zefektivnění a zkvalitnění výroby. Tyto nové technologie jsou odrazem světových trendů a pomáhají k udržení konkurenceschopnosti českého průmyslu. Teoreticky získávané modely pomocí počítače se využívají ve výrobě. Simulace by měly co nejblíže napodobovat proces nebo objekt a jsou založeny na principu experimentování s matematickým modelem. Pomocí modelu, na kterém můžeme provádět různé analýzy, dokážeme popsat reálný systém a následně získat

potřebné parametry pro výrobu. Neboť teoretický model je pouze zjednodušením reálného systému. Musíme počítat s odlišností mezi skutečností a výsledky získané z teoretického modelu. Míra zjednodušení výrazně ovlivňuje stupeň přesnosti výstupu dané simulace. Obecně lze říct, čím přesnější teoretický model a přesnější data budeme mít na vstupu do simulace, tím blíže se budou výstupy ze simulací blížit reálným výsledkům. [18], [19]



Obrázek 11: průběh teplotního pole po tažné operaci [21]

Vyhodnocování simulací může být velmi užitečným nástrojem. Ze simulací můžeme získat celou řadu vlastností. Na obrázku 11 například můžeme vidět průběh teplotního pole po tažné operaci získané softwarem FormFEM. Teplotní analýza je jedním z mnoha ukazatelů, které můžeme díky simulacím sledovat. Díky simulacím můžeme provádět celou řadu analýz jako například: [19]

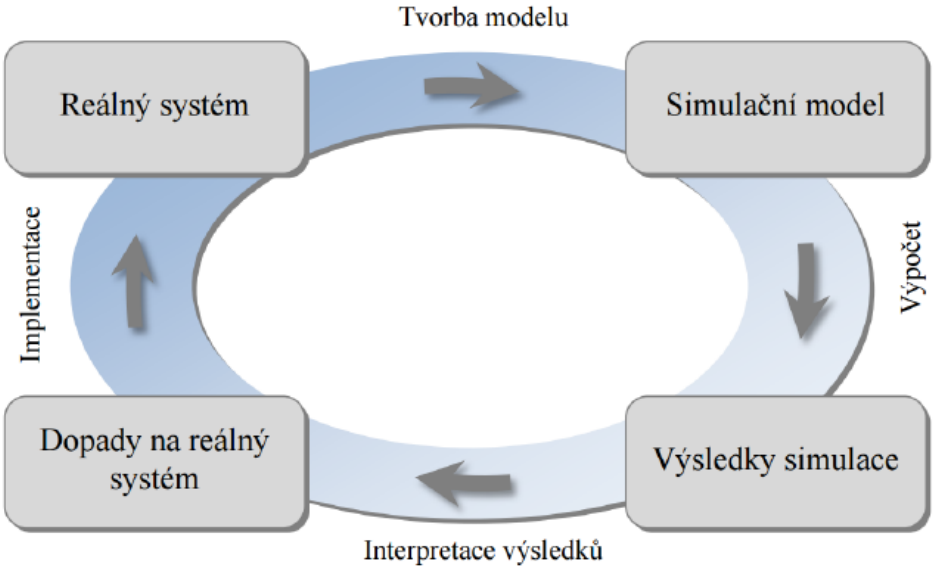
- Simulaci výrobních procesů
- Napěťově – deformační analýzu statických a dynamických dějů
- Průběh deformací, přetvárného odporu, teploty…
- Rozbor tvářecí síly a přetvárné práce
- Průběh zatížení tvářecích nástrojů
- Kritéria porušení – kritické hodnoty přetvoření a napjatosti

K dosažení požadovaných výsledků se většinou používá kombinace zjištěných analýz. Analýza tváření se provádí za účelem popisu plastické deformace. Pro dobré výsledky simulací je nutné mít všechny potřebné informace (tvářecí zařízení, tvářecí

nástroje, materiál včetně práce s materiálem apod.) Cílem analýz jsou pak zejména tyto informace: [20]

- Informace o limitech tvářitelnosti, aniž by došlo k povrchovým nebo vnitřním defektům (trhliny, přeložky)
- Informace o maximálních tvářecích silách, napětích a potřebné energii k uskutečnění tvářecího procesu (velmi užitečné pro návrh tvářecích nástrojů a výrobních zařízení)
- Informace o kinematických vazbách (tvar, deformace, rychlost, deformační rychlost) mezi nedeformovanými částmi a polotovarem, zejména informace o toku kovu včetně teploty a přestupu tepla.

Při aplikaci simulací se dnes používají počítačové systémy k podpoře, jde o systémy CAD/CAE/CAM. Zapojení těchto systémů je již běžnou součástí a jsou potřeba při integraci se simulačními programy. Samotný proces pak probíhá následovně, je vytvořen konstrukční návrh, který se případně analyzuje a optimalizuje, následně je provedena simulace. Tato simulace slouží k predikci výrobního systému, pomocí kterého se vyrobí reálná součást. Tato součást je následně testována. Pokud jsou shledány nedostatky, je upraven CAD návrh a postup se opakuje. Celý proces nám přibližuje obrázek 12.



Obrázek 12: Schéma principu aplikace simulací [22]

V oblasti tváření existuje celá řada softwarů, pomocí kterých jsme schopni provádět simulace. Zde je přehled často využívaných simulačních softwarů:

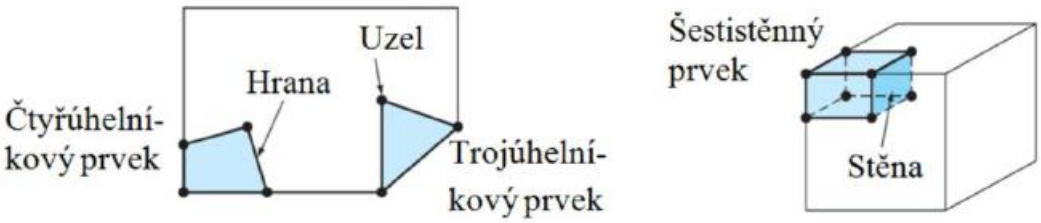
- AutoForm
- PAM-STAMP
- Q Form
- ANSYS
- DEFORM
- FormFEM

Tyto softwary jsou schopny najít řešení pomocí numerických metod. Tyto metody se používají převážně proto, že analytický přístup vede většinou k řešení diferenciálních rovnic, které je velmi složité. Numerické metody řeší těleso „po částech“ a jsme tak pomocí nich schopni spočítat prakticky všechny úlohy. V praxi se používá různých typů metod: [22]

- Metoda konečných prvků (MKP)
- Metoda konečných diferencí (MKD)
- Metoda konečných objemů (MKO)
- Metoda oddělených prvků (MOP)
- Metoda hraničních prvků (MHP)

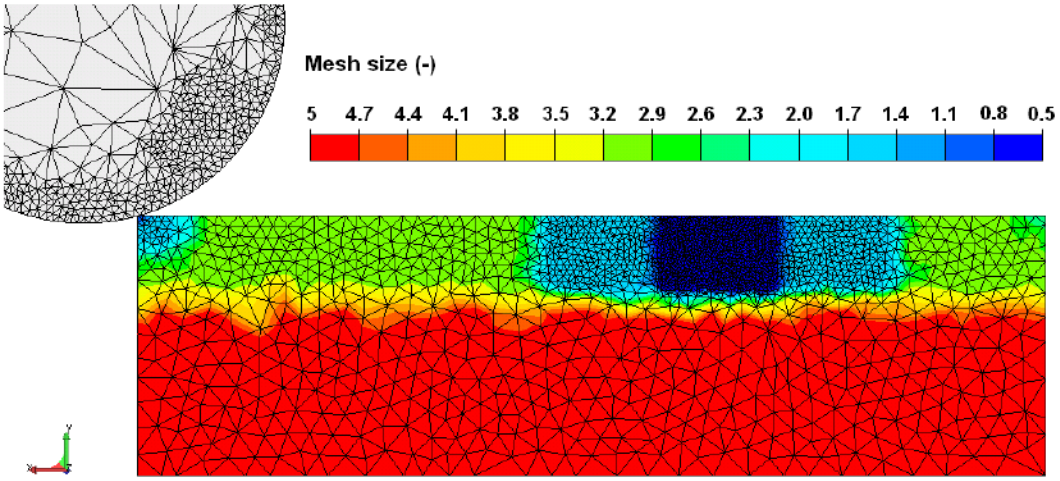
3.3.1 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků je nejrozšířenější a nejefektivnější metodou pro řešení problémů popsaných diferenciálními nebo integrálními rovnicemi. Tato metoda se může použít pro numerické řešení deformace, napjatosti teplotních polí atd. Jak napovídá název, tato metoda pracuje s určitým počtem konečných prvků. Součást je rozdělena na jednotlivé prvky, které jsou spojeny konečným počtem uzlů. Typy prvků se liší pro rovinné a prostorové oblasti. Základní typy prvků můžeme vidět na obrázku 13. [18], [19]



Obrázek 13: Základní typy prvků [22]

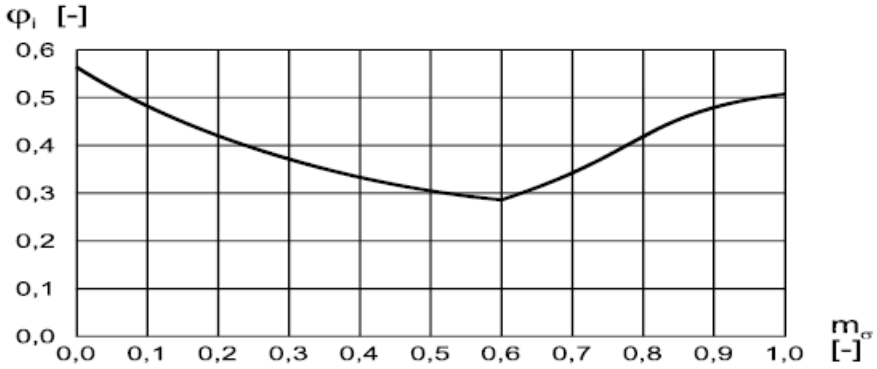
Počet uzlů prvku nám udává stupeň polynomu, kterým je popsán. Polynomem bývá soustava aproximačních funkcí s konstantními parametry. Požadavkem, který musí být splněn je spojitost na hranici. Označení pro toto rozdělení je diskretizace a tvoří měrnou síť konečných prvků. Tato síť, zejména její hustota je velmi důležitá pro výpočet. Existují automatické generátory, nicméně takto generovaná síť se dá upravit podle požadavků řešitele. Řešitel s technickými zkušenostmi dokáže odhadnout místa s největšími změnami a dokáže upravit velikost sítě, pro co nejlepší výsledek, tak jako na obrázku 14. [18], [19], [21]



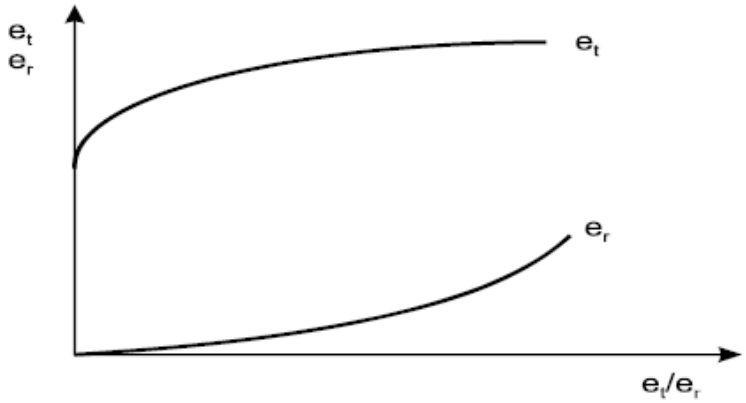
Obrázek 14: Nasíťování bramy při simulaci vertikálního válcování [19]

4 Limitní tvářecí diagramy (FLD)

Limitní tvářecí diagramy jsou diagramy, které nám na základě výsledků experimentálních zkoušek nebo teoretických výpočtů a simulací zobrazují zásobu plasticity. Jak již bylo uvedeno v předcházející kapitole, tak zásoba plasticity je jednou z klíčových vlastností pro tváření. Zásoba plasticity materiálu udává množství plastické deformace, které nevede k iniciaci trhliny. S rostoucí zásobou plasticity roste i tvářitelnost materiálu. Existuje několik typů limitních tvářecích diagramů. Například diagram mezního stupně přetvoření nebo diagram mezní plastičnosti. V našem případě se budeme zabývat diagramy Keeler – Goodwinova typu. V 60. letech minulého století započal návrh hodnocení tvářitelnosti pomocí limitních diagramů. Práce probíhala odděleně na několika pracovištích a výsledkem byli první diagramy, které můžeme vidět na obrázcích 15 a 16. [2], [23], [24]

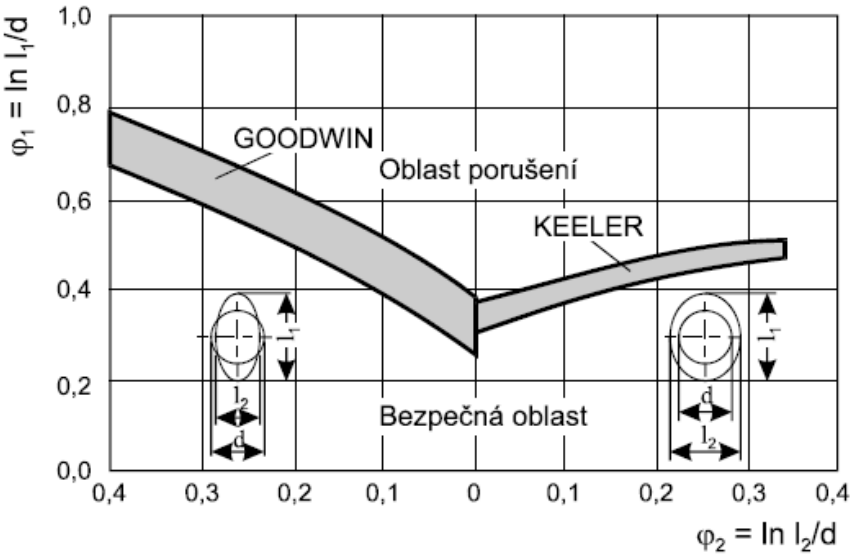


Obrázek 15: Diagram mezních deformací podle Tomlenova [2]



Obrázek 16: Původní Keelerův diagram [2]

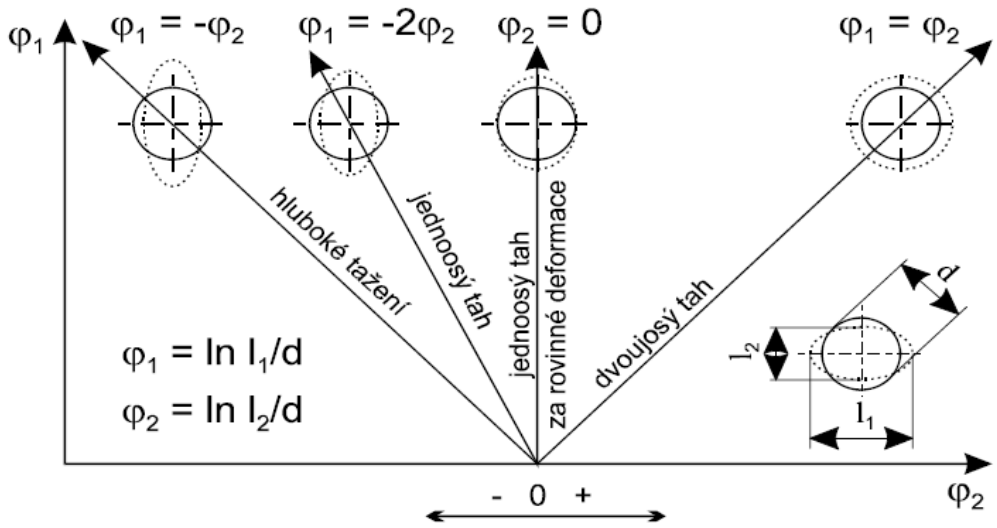
Keeler objevil závislost materiálových vlastností na rozložení napětí v plechu během dvouosého namáhání. Přišel na to, že s rostoucím exponentem zpevnění bude rozložení napětí homogennější. Vytvořil graf, kde pomocí křivek hlavních napětí oddělil bezpečnou oblast od oblasti porušení. Na jeho práci navázal Goodwin, který rozšířil původní Keelerovu práci o situaci, kdy vedlejší přetvoření může být záporné. Tento diagram nazývaný Keeler–Goodwinův je zachycený na obrázku 17 a je dnes nejpoužívanějším diagramem pro zobrazení plasticity. Pomocí tohoto diagramu můžeme určit míru deformace materiálu, aniž by došlo k porušení. Hranice mezi bezpečnou oblastí a oblastí porušení je definována pomocí křivek mezní tvářitelnosti (FLC – forming limit curves). Mezi těmito dvěma oblastmi je oblast, ve které může, ale také nemusí dojít k porušení. Tato oblast je v diagramu vyznačena šedou barvou. [2], [23]



Obrázek 17: Keeler – Goodwinův diagram ve skutečných deformacích [2]

Diagram zobrazuje závislost skutečné deformace (φ_1 na svislé ose) a k ní kolmou skutečnou deformaci (φ_2 na vodorovné ose). Skutečná deformace φ_2 může nabývat kladných i záporných hodnot, záleží na typu deformace. Jednotlivé deformační stopy jsou vyobrazeny na obrázku 18. Přepokládáme-li jako element kruh o průměru d, pak velikost deformace určíme z deformace tohoto elementu. Deformace φ_1 je vázána na nejdelší poloosu zdeformovaného elementu a deformace φ_2 je vázána na poloosu kolmou na nejdelší poloosu. Velikost deformace získáme zlogaritmováním podílu délky příslušné poloosy a původního rozměru elementu. Tuto skutečnost

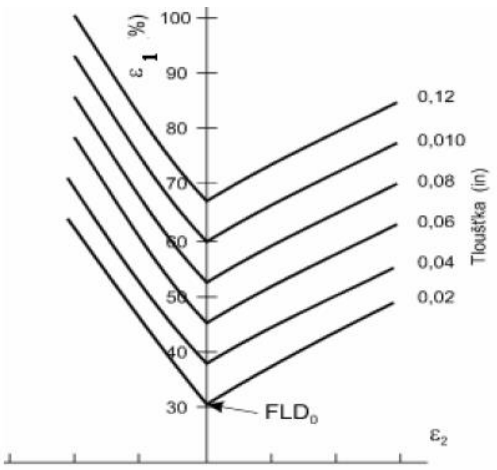
i s deformací elementu nám zachycuje obrázek 17. Poměry mezi hlavní a vedlejší deformací můžou být různé. Je to zapříčiněno různými stavy napjatostí. O tom, jaký stav deformace nastane rozhoduje použitá tvářecí operace. [2], [24]



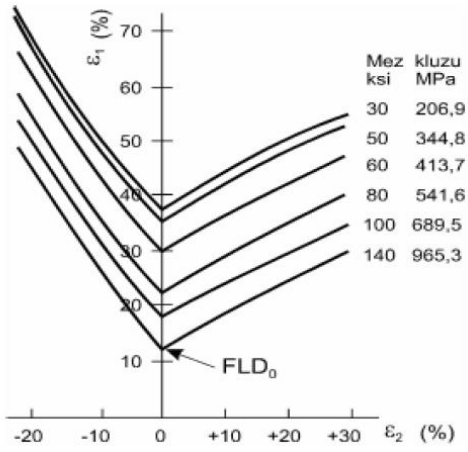
Obrázek 18: Typické deformační stopy při plošném tváření [2]

4.1 Činitelé ovlivňující polohu křivek mezní tvářitelnosti

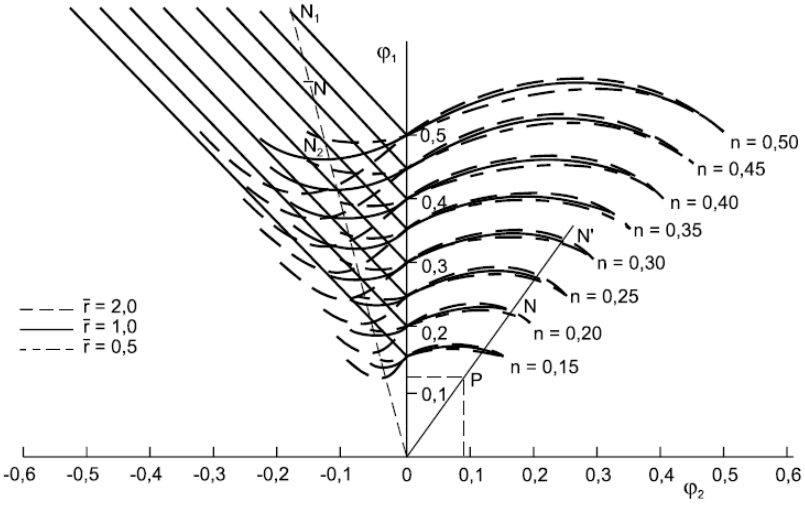
Zajímavé je, že přibližné tvary FLC křivek se shodují pro téměř všechny plechové produkty. Rozdíl způsobený činiteli nastává v poloze těchto křivek vzhledem k osám hlavního a vedlejšího napětí. Činiteli ovlivňujícími tuto polohu jsou zejména jakost plechu, která je závislá převážně na chemickém složení, metalurgii, tepelným a technologickým zpracováním. Těmito činiteli je ovlivněn exponent deformačního zpevnění a normálová anizotropie. Polohu ovlivňuje rovněž tloušťka plechu. Se vzrůstající tloušťkou a hodnotou exponentu deformačního zpevnění n je křivka položená výše a bezpečná oblast se zvyšuje. Opačný efekt má mez kluzu R_e, která s vyšší hodnotou bezpečnou oblast zmenšuje. Normálová anizotropie $\bar{r}$ se projeví především v oblasti záporných hodnot φ_2. S rostoucími hodnotami $\bar{r}$ se posouvají křivky FLC výše a zvětšují bezpečnou oblast. Všechny tyto vlivy jsou přehledně znázorněny v grafech na obrázcích 19 až 21. [2], [24]



Obrázek 19: Vliv tloušťky materiálu na polohu FLC křivek [2]



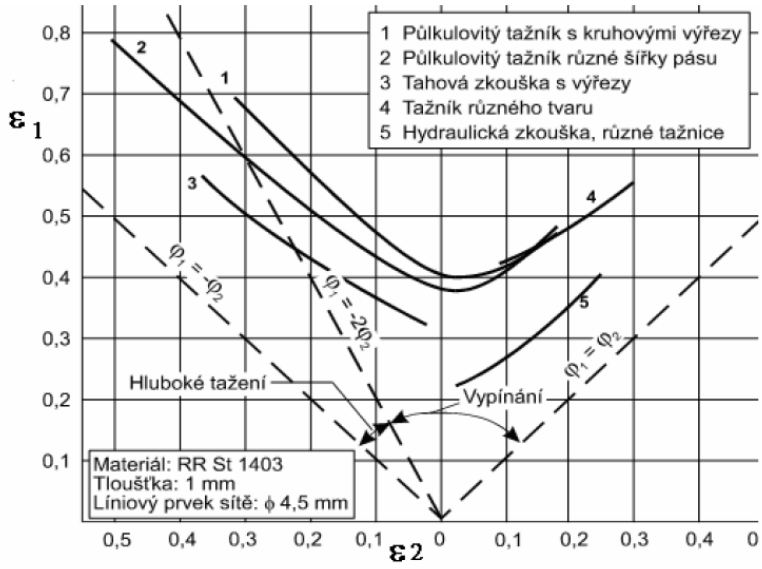
Obrázek 20: Vliv velikosti meze kluzu na polohu FLC křivek [2]



Obrázek 21: Vliv exponentu deformačního zpevnění a normálové anizotropie na polohu FLC křivek [2]

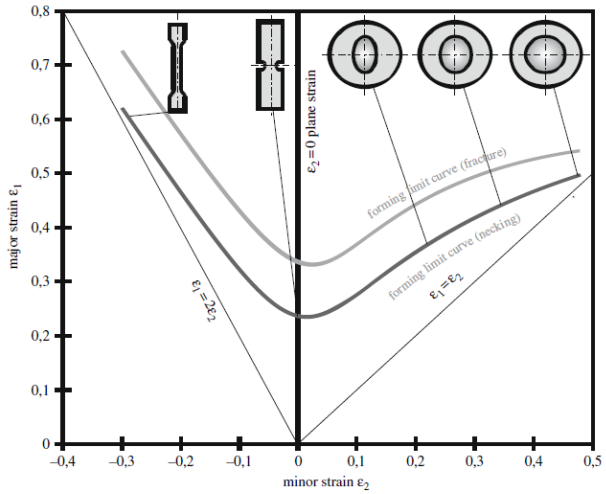
4.2 Získávání FLD a jejich význam

V praxi používáme ke stanovení limitních diagramů několik principů. Jedním z nich je experimentální zjišťování křivek mezní tvářitelnosti. Experimenty jsou založeny na zkouškách materiálu, tyto zkoušky mohou být základní nebo technologické. Mezi základní zkoušky řadíme zkoušky, pomocí kterých získáváme základní vlastnosti materiálu, například tahová zkouška. Technologické zkoušky napodobují tvářecí operace. Jedná se například o Tomlenovu zkoušku, Fukuiho zkoušku nebo zkoušku Nakajima. Obrázek 22 nám zachycuje graf, kde jsou křivky mezních deformací získané pomocí různých experimentálních technik. [2], [26]



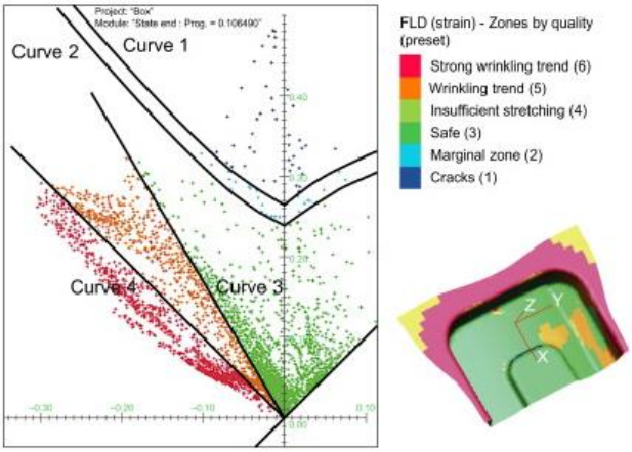
Obrázek 22: FLD zjištěné pomocí experimentálních technik [2]

Experimentální metody získávání FLD jsou velmi přesné a poskytují informace o tvářecích charakteristikách. Na obrázku 23 můžeme vidět experimentálně získané křivky mezní tvářitelnosti pro hliníkový plech. V diagramu jsou i použité tvary vzorků.



Obrázek 23: Experimentálně zjištěný FLD pro hliníkový plech [26]

Vzhledem k vysokým finančním a časovým nárokům se dnes stále více využívá výpočtových metod. Pomocí výpočtů za použití zjednodušených modelů lze stanovit hodnoty deformací v kterémkoli bodě. Dalším způsobem je využití simulačních softwarů, které nejčastěji využívají metodu konečných prvků. Příklad analýzy deformace v simulačním softwaru Pam – Stamp je na obrázku 24. [25]



Obrázek 24: Analýza deformace v softwaru Pam – Stamp [25]

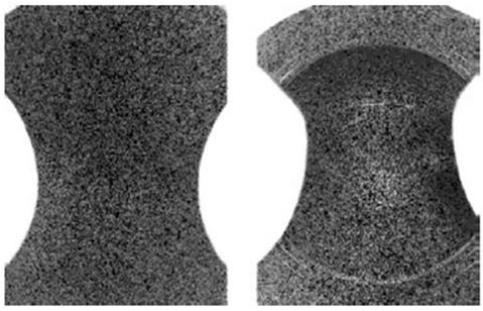
Diagramy mezní tvářitelnosti jsou velmi užitečným nástrojem při hodnocení zásoby plasticity a tvářitelnosti tenkých plechových dílů. Zejména se jedná o automobilový průmysl, kde se pomocí těchto diagramů hodnotí části karoserie vyrobené technologií hlubokého tažení nebo ohýbáním. Pomocí těchto diagramů dokážeme odhalit případné nedostatky a upravit technologický návrh výrobku. Jsme tak schopni předejít porušení materiálu v důsledku dosažení kritické velikosti hlavních a vedlejších deformací. [23], [24], [25]

5 Optické měřící systémy

V současnosti zaujímají optické měřící systémy důležitou roli ve strojírenství. Slouží k digitalizaci nasnímaných součástí. Díky těmto systémům můžeme rovněž vyhodnocovat deformační chování materiálů. Jedná se o moderní způsoby měření, které vynikají zejména svou rychlostí a přesností, které nám klasické ruční měření nemůže poskytnout. Jednou z největších firem v tomto oboru je firma GOM, která vyvinula několik těchto systémů, například ARAMIS, ARGUS, PONTOS a ATOS. Systémy ARAMIS a ARGUS budou popsány podrobněji, protože byly využity při realizaci experimentů prováděných v rámci řešení diplomové práce. [28]

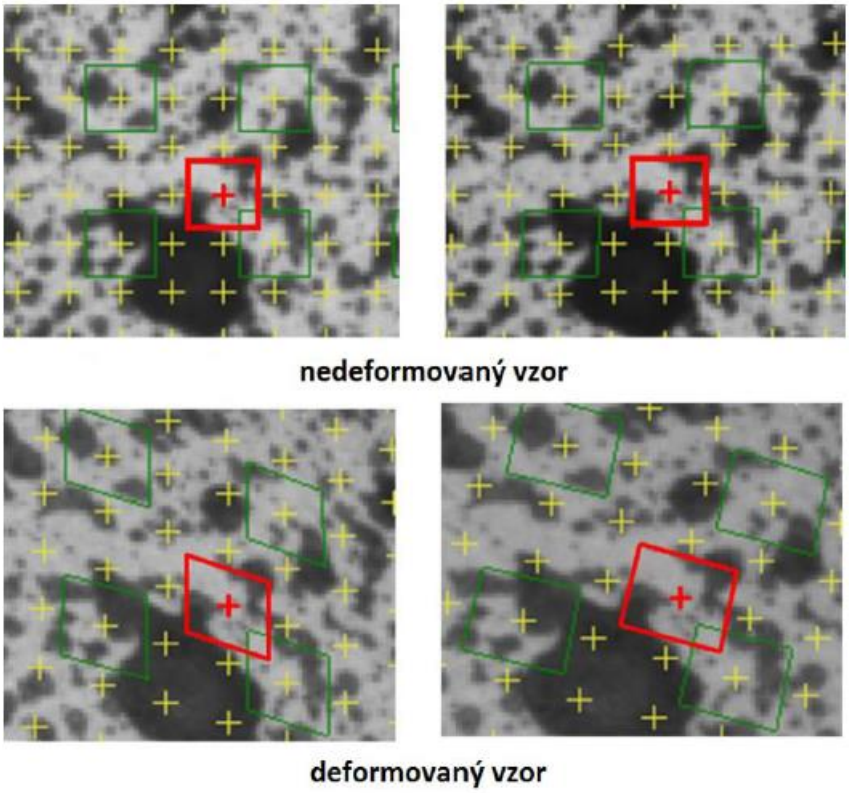
5.1 Digitální obrazová korelace (DIC)

Digitální obrazová korelace (Digital Image Correlation = DIC) je komplexní metoda používaná pro vyhodnocování deformace. Princip této metody spočívá v záznamu zkoušky jednou (pro 2D měření deformací) nebo dvěma kamerami (pro 3D měření deformací). Během průběhu zkoušky jsou nasnímány snímky s vysokým rozlišením, které následně systém vyhodnocuje. U případu 3D měření dvěma kamerami jsou tyto kamery zkalibrovány a nastaveny tak, že jsou zaměřeny na stejný bod, každá z jiného úhlu a tím vznikne 3D obraz testovaného objektu. Digitální obraz se skládá z pixelů, což je nejmenší stavební jednotka digitálního obrazu. Systém ARAMIS dokáže rozpoznávat jednotlivé pixely na dvou časově rozdílných snímcích. Aby systém dokázal, takto vyhodnocovat polohu jednotlivých pixelů musíme před měřením na povrch testované součásti nanést kontrastní vzor tzv. patternem. Tento pattern nám zajišťuje, aby povrch snímané součásti byl neopakující se (náhodný), izotropní a dostatečně kontrastní. Může být použit například nástřik černé a bílé barvy jako je tomu na obrázku 24. [27], [29], [31], [34]



Obrázek 25: příklad náhodného patternu [32]

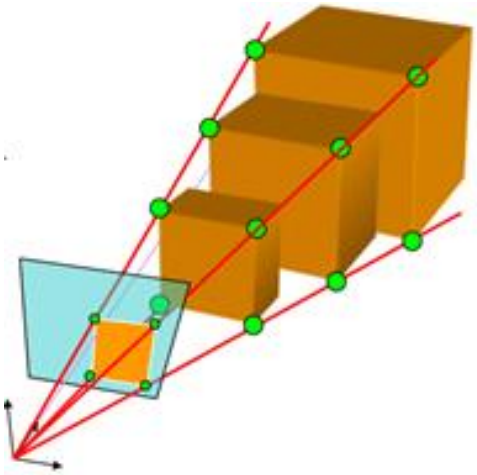
Poměr černých a bílých oblastí by měl být takový, aby nedocházelo k větším spojitým oblastem stejné barvy. Aby byla zajištěna jedinečnost každého bodu při sledování, je brána oblast obsahující několik pixelů kolem daného bodu. Bod se svým okolím nazýváme fazeta. Při procesu tváření se deformace vyhodnocují na základě posuvu a transformace jednotlivých fazet. Tento proces znázorňuje obrázek 26. Pomocí různých korelačních algoritmů se porovnávají stupně šedi a díky synchronizovaným kamerám a snímkům jsme schopni vyhodnotit průběh deformace. [27], [29], [30]



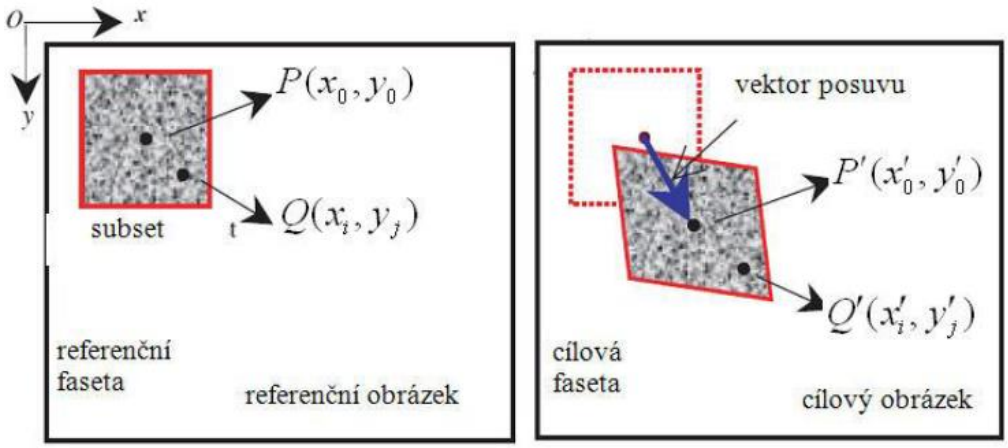
Obrázek 26: průběh transformace fazet [33]

5.1.1 Dvourozměrná korelace

Při dvourozměrné korelaci snímáme součást jednou kamerou. Je to dostatečné ke snímání rovinné plochy rovnoběžné k rovině. Princip snímání a sledování zvoleného bodu, respektive fazety je zřejmý z obrázků 27 a 28. [29], [34]



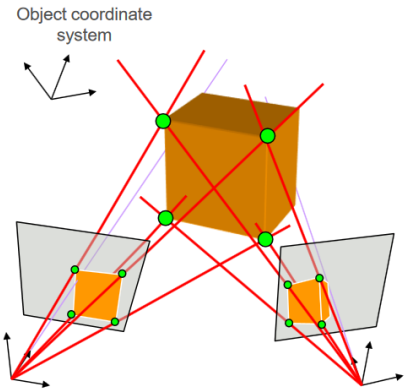
Obrázek 27: Princip dvourozměrné korelace [29]



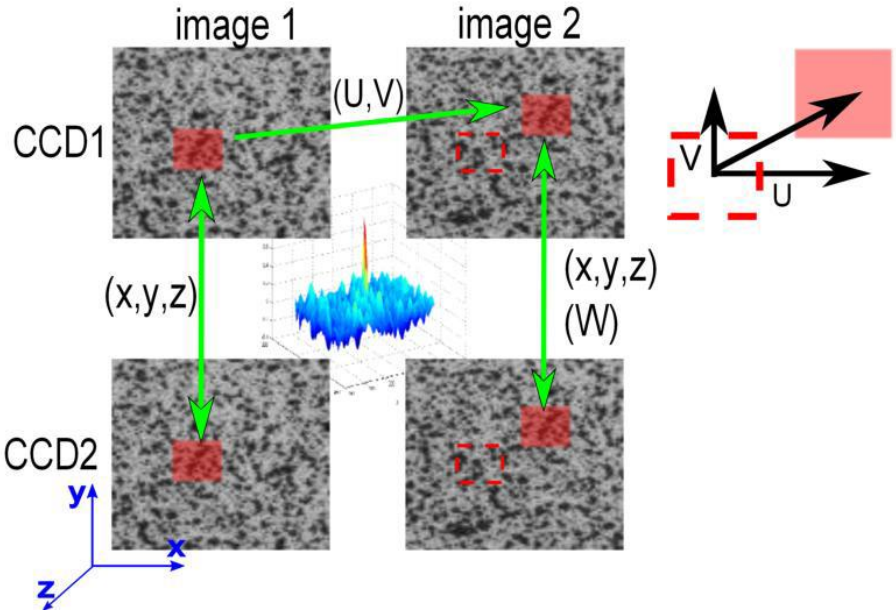
Obrázek 28: Fazeta před a po deformaci [34]

5.1.2 Třírozměrná korelace

Pro snímání součástí je zapotřebí dvou kamer. Tyto kamery je nutné nastavit a zkalibrovat, aby byly schopny snímat stejnou oblast a vytvořit tím třírozměrný obraz měřené součásti. Princip snímání je opět ve vyhodnocení posunutí a transformace sledované oblasti, ale ve 3D prostoru. Princip znázorňují obrázky 29 a 30. [29]



Obrázek 29: princip třírozměrné korelace [29]



Obrázek 30: Posunutí měřené oblasti při snímání dvěma kamerami [27]

5.2 Systém ARAMIS

ARAMIS je obchodní název pro bezkontaktní měřící systém vyvinutý německou společností GOM. Pomocí tohoto systému můžeme provádět analýzu deformačního chování materiálů a tím hodnotit jejich vhodnost pro tvářecí operace. Systém je možné použít pro statické i dynamické zatěžování. Systém se skládá ze dvou digitálních CCD kamer a dvou led diodových světel. Dvě kamery nám zajišťují dva úhly pohledu a můžeme vytvářet 3D obraz snímaného objektu. ARAMIS pracuje na principu digitální korelace obrazu (DIC), která je popsána výše. Světla i kamery je možné seřídit dle potřeb měření, rozložení kamer a světel zachycuje obrázek 31. [35]

Obrázek 31: Uspořádání systému ARAMIS [35]

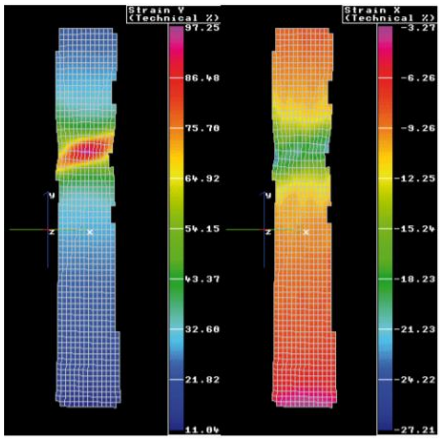
Mezi výhody systému patří jeho přesnost a možnost použití pro statické i dynamické zatěžování. ARAMIS disponuje velkým rozsahem měření, ten se pohybuje od 1 mm do 100 m. Rozsah měření deformace je od 0,05 % do stovek %. Přesnost měření deformací je 0,01 %. Tento rozsah a přesnost je umožněn vysokou hustotou měřených bodů. Kamery jsou schopny pracovat s vysokou frekvencí a rozlišením. Systém ARAMIS je vyráběn v několika konfiguracích, ty se liší především snímkovací frekvencí a rozlišením. Přehled dostupných konfigurací můžeme vidět v tabulce 2. Jak můžeme vidět, při menších rozlišeních bývají používány vyšší snímkovací frekvence. V tabulce jsou pouze vybrané hodnoty z uživatelské příručky, tato příručka obsahuje mnoho doporučených hodnot pro několik variant rozlišení a snímkovací frekvence. Technické specifikace jednotlivých konfigurací předurčují možnosti jejich použití. ARAMIS 2M je vhodný pro měření menších nebo středně velkých objektů s nižšími nároky na přesnost. Konfigurace 4M nám umožňuje snímání středně rychlých dějů při vysokém rozlišení a používá se pro měření deformací. Konfigurace 5M je vhodná pro měření velkých objektů nebo pro měření s vyšším rozlišením. ARAMIS 12M má největší rozlišení a je vhodný pro měření s vysokou přesností. Konfigurace HS je speciálně přizpůsobena pro měření rychlých dynamických jevů. Vzhledem k experimentu, jímž je tahová zkouška byl použit dostupný systém ARAMIS 4M. [30], [35], [37]

Tabulka 2: Vybrané hodnoty snímkovacích frekvencí a rozlišení pro jednotlivé konfigurace [37]

Konfigurace	Snímkovací frekvence [Hz]	Rozlišení [pixely]
2M	až 29	1624 x 1236
4M	168 při rozlišení 2400 x 1728 1334 při rozlišení 2400 x 168	2400 x 1728
5M	až 29	2448 x 2050
12M	58 při rozlišení 4000 x 3000 464 při rozlišení 4000 x 370	4000 x 3000
HS	500 při rozlišení 1280 x 1024 4000 při rozlišení 400 x 304	1280 x 1024

5.2.1 Princip měření

Podmínkou pro samotný proces měření je vytvoření stochastické sítě na povrchu vzorku. Tato síť se realizuje nejčastěji za pomoci nástřiku bílé a černé barvy na povrch vzorku tak, aby vznikl nepravidelný vzor tzv. pattern, ten je možné vidět na obrázku 26. Takto připravené vzorky jsou nasnímány pomocí dvou CCD kamer. Obraz je rozdělen na pixely a následně se určí sektory, v nichž se vyhodnotí stupeň šedi, který je pro každou oblast jedinečný. Nastavení kamer, osvětlení, záznam dat a nastavení měření nám zajišťuje řídící jednotka. Součástí systému je také software, který zajišťuje zpracování naměřených dat. Při zatěžování dochází k deformaci patternu zároveň se vzorkem. Vyhodnocení probíhá na principu digitální obrazové korelace, kdy systém z jednotlivých snímků dokáže vyhodnotit posuvy a transformace jednotlivých předem určených bodů. Díky tomu může být určena míra deformace. Pomocí softwaru jsou následně výsledky přehledně zpracovány, jako například na obrázku 32, kde je vyhodnocení zkoušky tahem. [30], [36], [37]



Obrázek 32: Vyhodnocení deformace při tahové zkoušce pomocí systému ARAMIS [36]

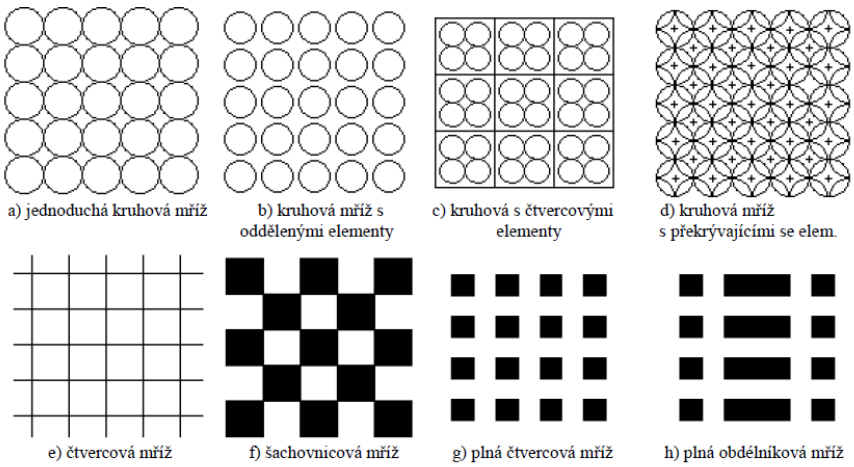
5.3 Systém ARGUS

Systém ARGUS patří stejně jako systém ARAMIS do skupiny optických bezkontaktních měřících přístrojů. Pomocí systému ARGUS můžeme provádět analýzu deformací při tvářecích procesech. V porovnání se systémem ARAMIS se liší především ve způsobu použití. Systém ARGUS využívá k snímání zkoumaného vzorku digitální fotoaparát. Snímky jsou provedeny před a po provedení zkoušky. Z tohoto důvodu je systém ARGUS vhodný i pro aplikace, kde není možné sledovat průběh zatěžování po celou dobu. Prostorový obraz vzniká skládáním více snímků z různých poloh. Celý systém se skládá z kalibračních kamenů a kamerového systému viz Obrázek 33. [28]

Obrázek 33: Souprava pro měření systémem ARGUS

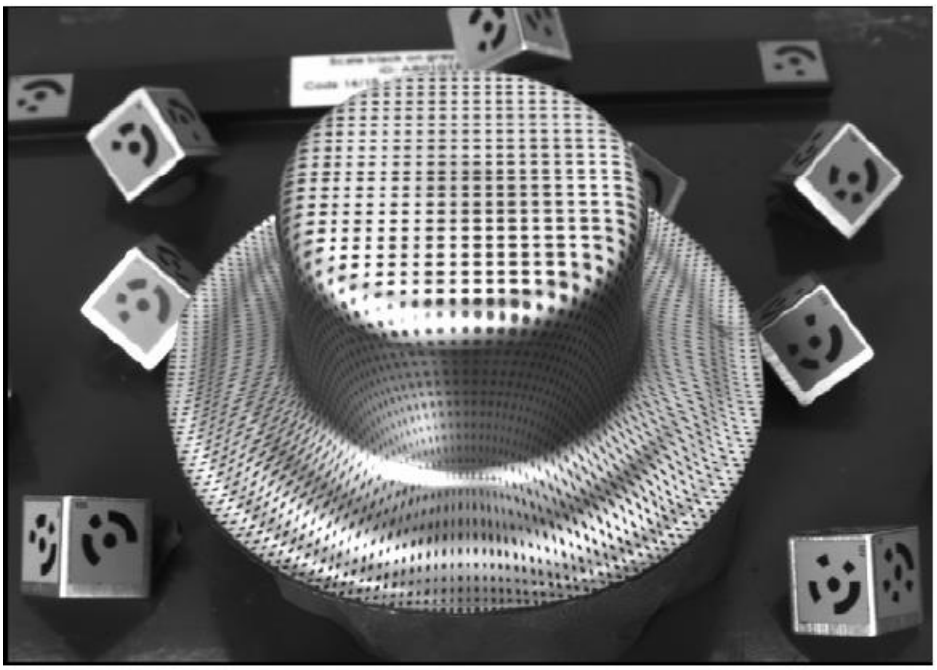
5.3.1 Princip měření

Stejně jako u systému ARAMIS je nutné před samotným měřením provést přípravu povrchu zkušebních vzorků, zejména je nutné dbát na důkladné očištění a odmaštění vzorků. Následně je na povrch nanesena měrná síť. Existuje mnoho druhů měrných sítí, které se liší velikostí a tvarem elementů. Přehled možných variant zachycuje obrázek 34. Nanášení takovéto sítě je možné realizovat několika postupy, například pomocí laseru, fotochemickým leptáním, sítotiskem, rytím nebo elektrochemickým leptáním. Způsob nanášení rozhoduje o kvalitě a odolnosti proti opotřebení.



Obrázek 34: Příklady různých typů měrných sítí [39]

Vzorek je vystaven zvolenému druhu zatěžování, při kterém dojde k deformaci vzorku i měrné sítě. Deformovaný vzorek je snímán několika snímky z více úhlů a směrů, které se následně vyhodnocují pomocí softwaru. Důvodem použití více snímků z různých směrů a úhlů je vytvoření kompletního obrazu deformací.



Obrázek 35: Příklad deformovaného vzorku připraveného pro snímání [2]

6 Návrh experimentu

Následující kapitoly se zabývají experimentální částí této diplomové práce. První kapitola pojednává o přípravě zkušebních vzorků, seznámení s použitými strojními zařízeními a kalibrací systému ARAMIS. Přípravě je nutné věnovat náležitou pozornost, neboť špatná příprava vzorků nebo systémů by mohla negativně ovlivnit výsledky měření. Naopak pečlivá a správná příprava je základním předpokladem k získání hodnotných a důvěryhodných výsledků.

6.1 Návrh zkušebních vzorků

Geometrie zkušebních vzorků je vhodná pro měření křivek mezních tvářitelností pomocí tahové zkoušky. Jediná odchylka byla ve způsobu přípravy zkušebních vzorků. Z tohoto důvodu bude tato metoda rozvedena níže.

6.1.1 Materiál zkušebních vzorků

Použitý materiál byl DX57D+Z100-M-C-O (Z = žárový zinek, Z100 = 100 g na 1 m2, M = malý zinkový květ, C = chemická pasivace, O = olejováno) s jakostí CR5GI40/40-U-O. Pro zjednodušení bude dále uváděn jako DX57D. Jedná se o ocel vhodnou k hlubokému tažení. Svými vlastnostmi je vhodná například pro automobilový průmysl. V tomto odvětví dochází v posledních letech k výrazné inovaci v materiálové oblasti a jsou vyvíjeny nové typy ocelí s vysokými nároky na mechanické vlastnosti. Z těchto důvodů jsou limitovány obsahy jednotlivých prvků v daných materiálech. Chemické složení použitého materiálu je možné vidět v tabulce 3.

Tabulka 3: Chemické složení použitého materiálu dle normy ČSN EN 10346 [40]

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Al [%]	Ti [%]
≤ 0,02	≤ 0,50	≤ 0,30	≤ 0,020	≤ 0,020	≥ 0,010	≤ 0,30

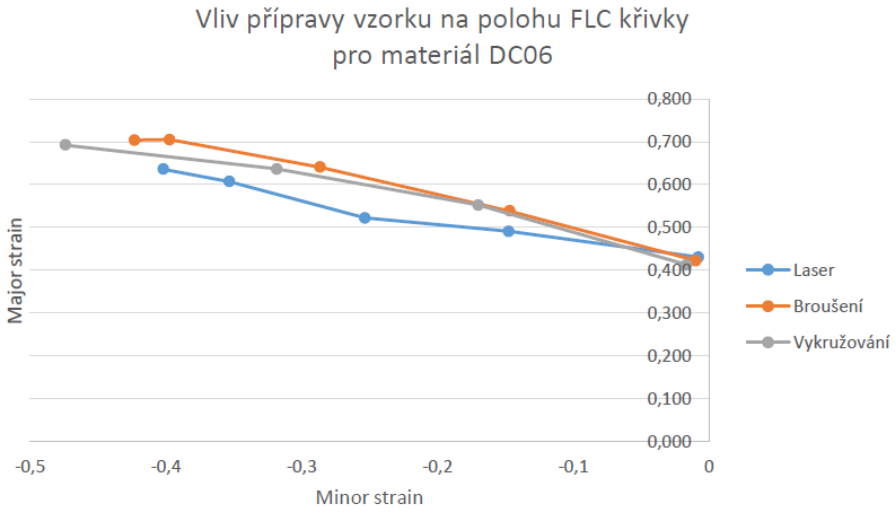
Chemické složení určuje vlastnosti a chování materiálu. Pro tento materiál je to především vysoká tažnost. Všechny důležité vybrané vlastnosti nám přibližuje tabulka 4.

Tabulka 4: Mechanické vlastnosti materiálu DX57D dle normy ČSN EN 10346 [40]

Mez průtažnosti [MPa]	**Mez pevnosti v tahu [MPa]**	**Tažnost [%]**			**r [-]**		**$n_{10-20/Ag}$ [-]**
$R_{p0,2}$	R_m	A	$A_{50\ mm}$	$A_{80\ mm}$	$r_{90/20}$	$r_{m/20}$	
110–170	260–330	-	≥ 42	≥ 41	≥ 2,1	≥ 1,8	≥ 0,22

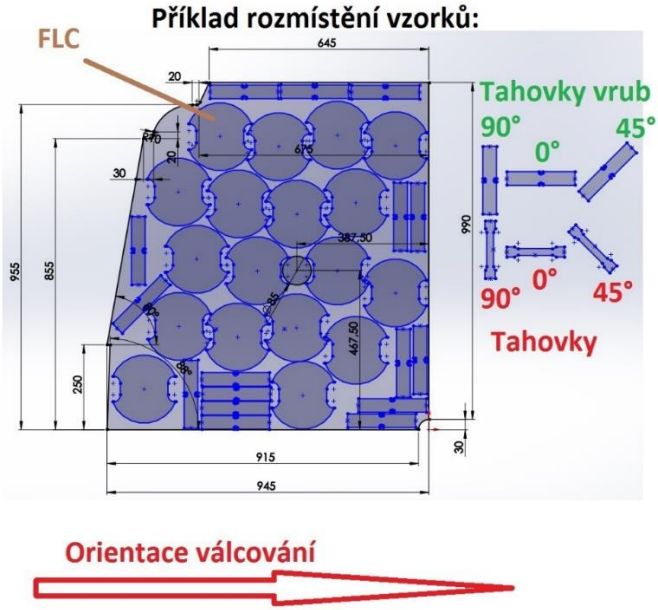
6.1.2 Způsob přípravy zkušebních vzorků

Smyslem správné přípravy je, aby nedocházelo u povrchu plechu například zpevněním, což je nežádoucí. Nejvýhodnější je odebírání vzorků obráběním. V našem případě, při použití plechu o tloušťce 0,7 mm by tato metoda byla velmi náročná s ohledem na stabilitu obráběcího procesu. Obrábění by muselo probíhat s velmi malými úběry materiálu, což prodlužuje čas přípravy vzorků a náklady na přípravu. Alternativou může být použití tvarového střižného nástroje nebo řezání vzorků laserem. Vzhledem k dostupnosti a ceně jsem zvolil řezání pomocí vláknového laseru v externí společnosti. V praxi se tato příprava velmi často používá, problematikou ovlivnění vzorků vlivem různé přípravy se věnovala jedna z bakalářských prací. [38] Z této práce víme, že rozdíl v polohách mezních křivek deformací bude pravděpodobně v řádu několika procent a křivka pro přípravu laserem bude položena níže. Pro účely této diplomové práce není toto ovlivnění klíčové. Srovnání různých metod zobrazuje obrázek 36. [38]



Obrázek 36: FLC křivky získané pomocí měření různě připravených vzorků [38]

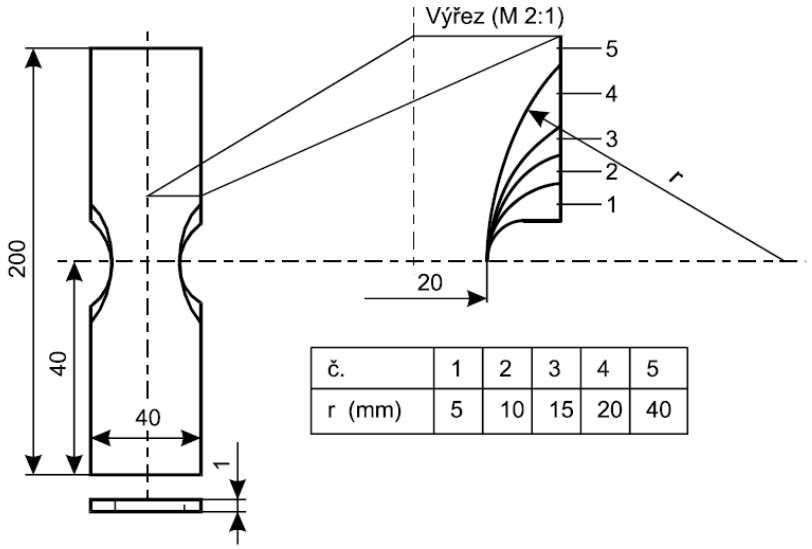
Vzorky byly řezány z plechu o tloušťce 0,7 mm tak, aby byly vytvořeny vzorky o různých směrech válcování. Vzorky byly připravovány společně s dalšími vzorky pro jiné zkoušky. Rozměry plechu a uspořádání vzorku můžeme vidět na obrázku 37.



Obrázek 37: Rozměry plechu a rozmístění vzorků

6.1.3 Tvar zkušebních vzorků

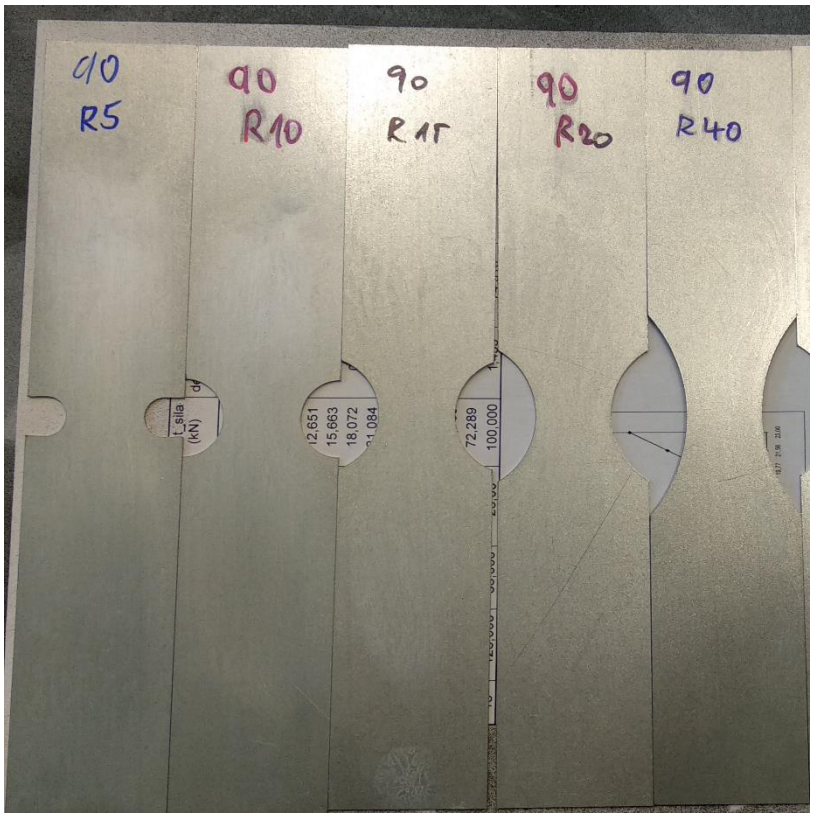
Při experimentální části, ve které byla provedena tahová zkouška, byly používány speciálně připravené vzorky, které jsou vhodné pro vyhodnocování tvářitelnosti. Tyto vzorky jsou připravené z tenkého plechu a předpokládá se jejich použití při vyhodnocování FLD. Jejich tvar je podobný, jako na obrázku 38. [2]



č.	1	2	3	4	5
r (mm)	5	10	15	20	40

Obrázek 38: Tahový vzorek z tenkého plechu [2]

Cílem této práce je vytvoření FLC křivek pomocí tahové zkoušky a systému ARAMIS. Samotné vzorky jsou navrženy tak, aby byly vhodné pro provedení tahové zkoušky. Byly vytvořeny série vzorků pro jednotlivé orientace válcování, aby bylo možné určit vliv anizotropie. Každá série měla 5 druhů vzorků pro tahovou zkoušku s vrubem, které se lišily rádiusem vrubu. Byly použity rádiusy 5, 10, 15, 20, 40 mm. Tvary všech použitých vzorků zobrazuje příloha 1. Nařezané vzorky seřazené podle velikosti vrubu zachycuje obrázek 39.



Obrázek 39: Vzorky připravené pomocí vláknového laseru

6.1.4 Vytváření měrných sítí

Aby bylo možné snímat povrch vzorku kamerovým systémem je nutná příprava takového povrchu. Příprava se liší podle použitého systému, u systému ARAMIS je to vytvoření stochastické sítě bodů, tzv. patternu a u systému ARGUS vytváříme měrnou síť bodů. Předpokladem pro kvalitní přípravu povrchu s dobrou adhezí, tak aby nedocházelo k porušení patternu, je důkladné očištění od nečistot a odmaštění. Zkušební vzorky jsem odmastil pomocí toluenu, technického benzínu a dalších organických rozpouštědel. Toto odmaštění se ukázalo jako nedostatečné, protože na vzorcích

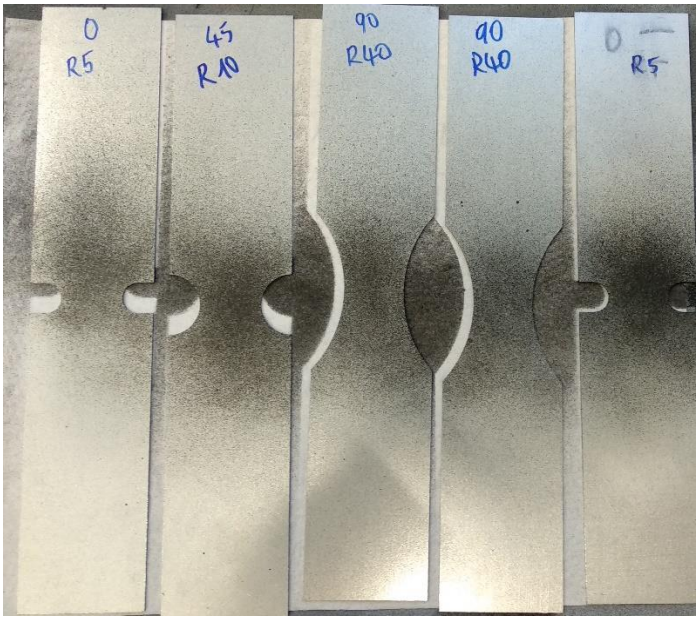
zůstávala stále vrstva nečistot viz. Obrázek 40. Špatné odmaštění může být důvodem špatné přilnavosti patternu a jeho znehodnocení během zatěžování. Tento negativní dopad vede k znehodnocení naměřených dat.

Obrázek 40: Vliv špatného odmaštění

Z výše uvedených důvodů jsem provedl důkladnější odmaštění. Použil jsem odmašťovací prostředek perchlor – ethylen a vodou ředitelný prostředek simple green viz. obrázek 41. Tyto přípravky se osvědčili a odmaštění bylo provedeno v požadované kvalitě pro dostatečnou přilnavost patternu. Klasický způsob nanášení patternu je nanesení základové bílé matové barvy a následné nanesení černého kontrastního vzoru. Bílý matný podklad zabraňuje odrazivosti materiálu, jehož lesk je poměrně vysoký. Z tohoto důvodu musí být použito více vrstev a čím větší je tloušťka patternu, tím větší je riziko znehodnocení při měření. Z tohoto důvodu jsem použil bezbarvou barvu s matným účinkem, kde stačí pouze jedna vrstva, což výrazně zvyšuje adhezi. Následně jsem černou barvou vytvořil nepravidelnou síť černých teček tzv. stochastickou měrnou síť. Použité barvy a výsledný pattern na zkušebních vzorcích můžeme vidět na obrázcích 42 a 43.

Obrázek 41: Prostředky pro odmaštění

Obrázek 42: Barvy používané k nanášení patternu



Obrázek 43: Zkušební vzorky s naneseným patternem

Pro měření pomocí systému ARGUS jsou na povrch nanášeny měrné sítě. Existuje mnoho způsobů nanášení, které ovlivňuje zejména kvalitu a odolnost proti otěru. V současnosti nejpoužívanější je metoda elektrochemického leptání, která byla použita i v tomto případě. Tato metoda je oblíbená především díky své rychlosti, jednoduchosti a cenové výhodnosti. Nedochází k porušení povrchu kovu a je odolná vůči opotřebení. Síť nanesenou na jednotlivých vzorcích zachycuje obrázek 45.

Obrázek 44: Nanášení měrných sítí

Obrázek 45: Vzorky s měrnou sítí po zatěžování

6.2 Experimentální zařízení

V této části jsou popsány konkrétní experimentální zařízení, která jsem použil pro provedení příslušných zkoušek. Jedná se o stroj pro provedení tahové zkoušky a 3D optické kamerové systémy pro měření deformace.

6.2.1 Stroj pro zkoušku tahem

Pro zkoušku tahem jsem použil stroj LabTest Model 5.100SP1 od firmy LaborTech viz obrázek 46. Podle výrobce může stroj vyvinout zatížení 100 kN a maximální zkušební rychlost 800 mm/min. Výška pracovního prostoru je 1130 mm a šířka 400 mm. Tyto hodnoty jsou dostatečné pro provádění zvoleného experimentu. Vybrané technické specifikace jsou uvedeny v tabulce 5. Zaznamenané hodnoty byly posílány do počítače, kde se zobrazuje v grafické podobě závislosti síly na poloze příčníku.

Obrázek 46: Zkušební stroj LabTest 5.100SP1

Obrázek 47: Štítek zkušebního zařízení

Tabulka 5: Vybraná technická data stroje pro tahovou zkoušku

Technická data	5.100SP1
Jmenovité zatížení [kN]	100
Max. zkušební rychlost [mm/min]	800
Přesnost řízení rychlosti [%]	±0,5
Rozlišení příčníku [μm]	1
Tuhost rámu [mm/N]	1,6x 10-6
Rozpětí sil [kN]	500-600
Přesnost měření síly [%]	±0,3 z hodnoty v rozsahu
Přesnost dráhy [μm]	1 - ČSN EN ř513
Přesnost měření napětí [%]	±0,5 průtahoměru

6.2.2 Systém ARAMIS 4M

Pro snímání deformací jsem použil systém ARAMIS 4M, princip byl popsán v kapitole 4.2. Jedná se o bezkontaktní měření deformace pomocí obrazové digitální korelace. Konfigurace 4M je schopna snímat frekvencí 168 Hz při rozlišení 2400 x 1728 pixelů. Výhodou je to především při snímání větších deformačních ploch. Redukcí rozlišení lze dosáhnou frekvence až 1334 Hz. Tato snímkovací frekvence zaznamenává deformaci velmi přesně a je vhodná především pro větší deformační rychlosti. Při experimentu byla použita snímkovací frekvence 5 Hz pro posuv 10 mm/min a 50 Hz pro posuv 100 mm/min. Tato snímkovací frekvence je dostatečná pro vyhodnocení experimentu a byla volena s ohledem na dostatečný počet vytvořených snímků a velikost přenosových dat. Kompletní sada pro konfiguraci 4M zahrnuje systém kamer se stativem, příslušenství a počítač se softwarem pro řízení a vyhodnocování výsledků. Výhodou tohoto zařízení je jeho mobilita, která umožňuje kooperaci měření s jinými zařízeními. Toho jsem využil i v tomto případě, kdy byla soustava kamer umístěna na stativ ve vertikální poloze a byly snímány vzorky ve stroji pro zkoušku tahem viz obrázek 48.

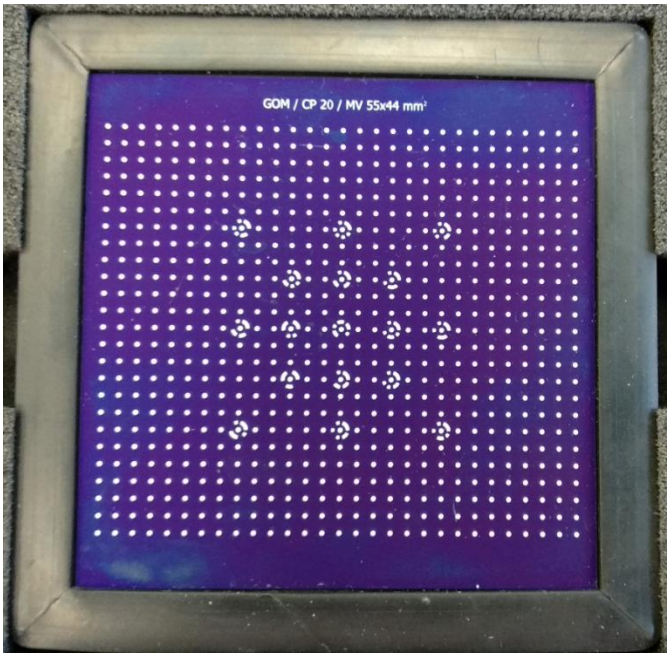
Obrázek 48: Uspořádání systému ARAMIS a stroje pro tahovou zkoušku

6.3 Kalibrace systému ARAMIS 4M

Možnost analýzy 3D deformací je zaručena použitím dvou kamer, jejichž poloha musí být vzájemně definovaná. Obě kamery jsou umístěné na společné ose, po které lze kamery posouvat a měnit úhel snímání. Vzdálenost stativu a pozice kamer se nastavuje podle velikosti měřené oblasti. Dobrou viditelnost a ostrost obrazu zajišťuje dvojice LED světel. Světla se mohou libovolně polohovat tak, aby byla nasvícená požadovaná oblast. V případě měření tahové zkoušky je snímána oblast s dominancí vertikální vzdálenosti, z tohoto důvodu byla uzpůsobena i pozice kamer a světel na stativu. Vertikální uspořádání zobrazuje obrázek 49. V první řadě bylo potřeba přemístit systém a nastavit ho tak, aby kamery a světla směřovali do oblasti, kde bude probíhat měření deformace. Cílem je zjistit ohniskovou vzdálenost a zaostřit kamery na požadovanou vzdálenost v závislosti na osvětlení.

Obrázek 49: Vertikální uspořádání snímacího systému ARAMIS

Samotná kalibrace probíhá dle pokynů výrobce uvedených v pracovním manuálu. Kalibrace se provádí z důvodu, aby si snímané body odpovídaly svojí polohou a orientací ve 3D souřadnicovém systému. Kalibraci jsem provedl pomocí speciální kalibrační destičky viz obr. 50, která byla vybrána na základě velikosti zkoušeného vzorku. Kalibrace probíhá dle pokynů výrobce v součinnosti se softwarem. Jedná se o posloupnost jednotlivých kroků, mezi které patří například přibližování, oddalování, natáčení pro levou či pravou kameru. Správná kalibrace nám umožňuje, dosáhnout přesnějšího měření.



Obrázek 50: Kalibrační destička

6.3.1 Systém ARGUS

Systém ARGUS jsem použil jako alternativu systému ARAMIS pro vyhodnocení deformací. Na rozdíl od systému ARAMIS nedochází ke snímání povrchu vzorku po celou dobu zatěžování, ale pouze před a po zatěžování. Z tohoto důvodu jsem použil stejné vzorky jako u systému ARAMIS, kdy měrná síť pro systém ARGUS byla nanesena z druhé strany. Pro provedení měření nám stačí použít jedné kamery, v tomto případě jsem použil fotoaparát Nikon D500 s příslušenstvím, kterým byly pořízeny snímky. Při pořizování snímků se na povrch vzorku umístí kalibrované měrky a kódované značky tzv. kameny, které slouží jako záchytné body při sestavování snímků na 3D obraz.

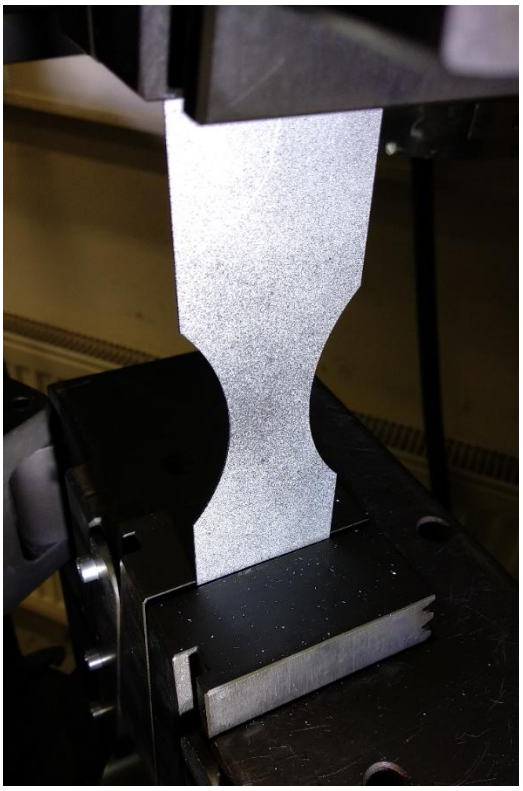
Obrázek 51: Kalibrované měrky s kameny

7 Experiment a vyhodnocení naměřených dat

Tato kapitola popisuje postup při experimentální části včetně použitých parametrů měření. Je zde také popsáno vyhodnocování systémem ARAMIS a následná úprava naměřených dat.

7.1 Průběh zkoušky

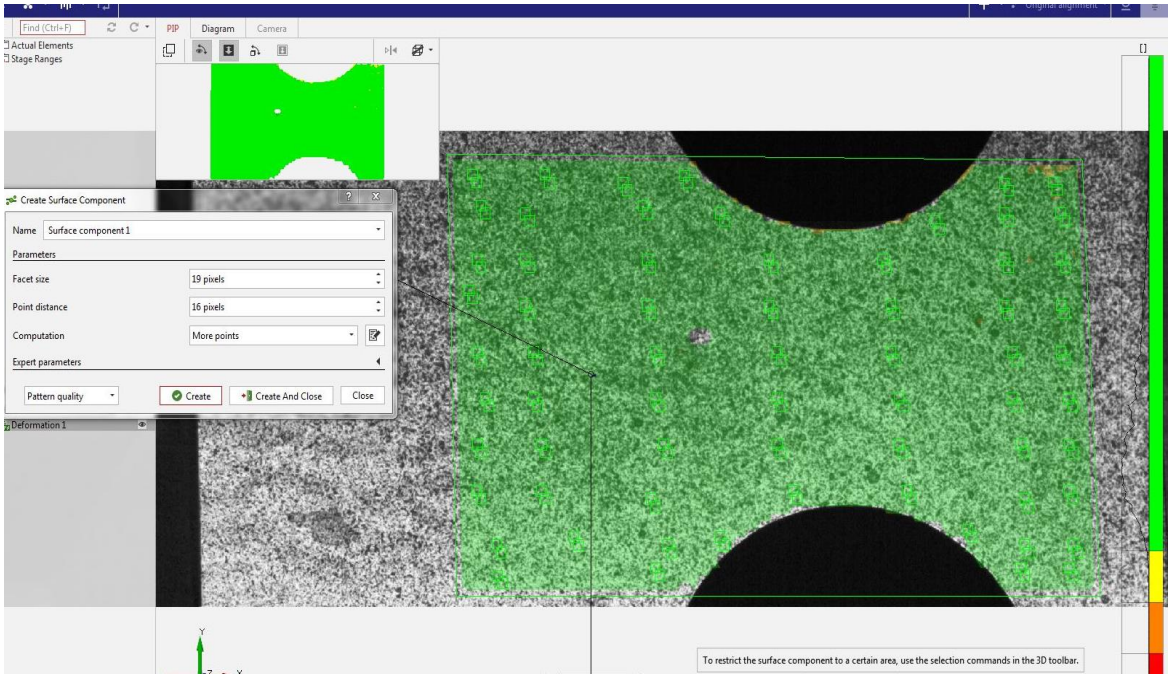
Po správně provedené kalibraci kontrolované systémem bylo možné přistoupit k realizaci experimentu. Zkušební vzorek se stochastickou sítí jsem vložil mezi čelisti zkušebního zařízení pro tahovou zkoušku. Důležité bylo, aby vzorek v průběhu zkoušky neprokluzoval a jeho pozice vůči čelistem zůstávala neměnná. Podélná osa zkušebního vzorku byla rovnoběžná se směrem zatěžování. Pozice stativu byla uzpůsobena tak, aby kamery směřovaly na plochu zkušebního vzorku a mohly snímat průběh deformace viz obrázek 53. Z tohoto důvodu bylo použito vertikální uspořádání kamer. Vzorky pro následné měření systémem ARGUS byly totožné, neboť měrná síť byla nanesena na povrchu z druhé strany vzorku. Tím byly sníženy náklady a byla zajištěna totožnost způsobu měření pro obě metody.



Obrázek 52: Vzorek upnutý mezi čelisti zařízení pro tahovou zkoušku

Obrázek 53: Uspořádání měřícího systému ARAMIS a zařízení pro tahovou zkoušku

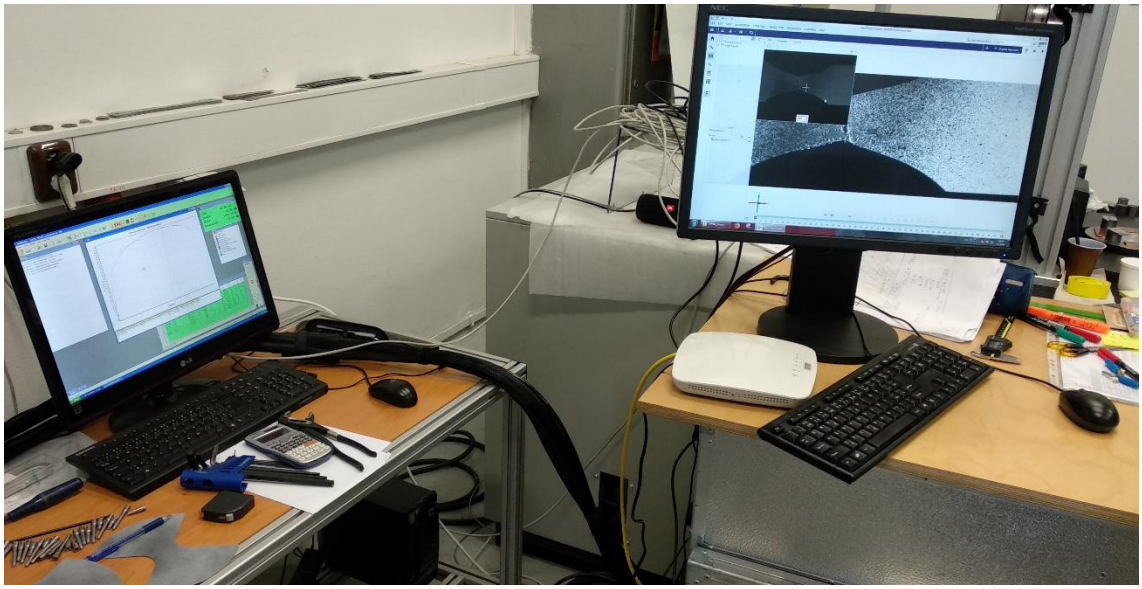
Vzorky byly při tahové zkoušce zatěžovány dvěma rychlostmi pohybu čelistí a to $10\,mm \cdot min^{-1}$ a $100\,mm \cdot min^{-1}$. Na základě této rychlosti jsem zvolil snímkovací frekvence, která ovlivňuje počet snímků vytvořených v průběhu měření. Pro dostatečný počet snímků jsem zvolil frekvence 5 Hz pro rychlost $10\,mm \cdot min^{-1}$ a 50 Hz pro rychlost $100\,mm \cdot min^{-1}$. Snímkovací frekvence bývá volena s ohledem na velikost naměřených dat s ohledem na předchozí zkušenosti a doporučení výrobce. Před začátkem měření je systém schopen nasnímat a zkontrolovat kvalitu nanesené stochastické měrné sítě. Pokud software zaznamená problémy například s odleskem nebo nepřiměřenou velikost a hustotu černé barvy na povrchu vzorku není vhodné provádět měření takového vzorku. Na vhodně připraveném povrchu vzorku viz obrázek 54 systém určí oblasti tzv. fazety, které mají danou velikost a jsou od sebe vzdáleny definovanou vzdáleností. Velikost fazet a jejich vzdálenost od sebe lze upravit v systému rovněž manuálně. Díky stochastické měrné síti je každá fazeta unikátní a systém vyhodnocuje deformace těchto fazet na jednotlivých snímcích. Po kontrole patternu došlo k samotnému měření. Za současného spuštění zařízení pro tahovou zkoušku a optického systému ARAMIS byly pomocí CCD kamer při zvolené frekvenci nasnímány změny na zkušebním vzorku během zatěžování. Měřením byly zjištěny deformace v kritické oblasti zkušebního vzorku, až do překročení mezního stavu, tj. iniciaci trhliny vlivem jednoosého zatěžování.



Obrázek 54: Vyhodnocení kvality stochastické měrné sítě a určení fazet

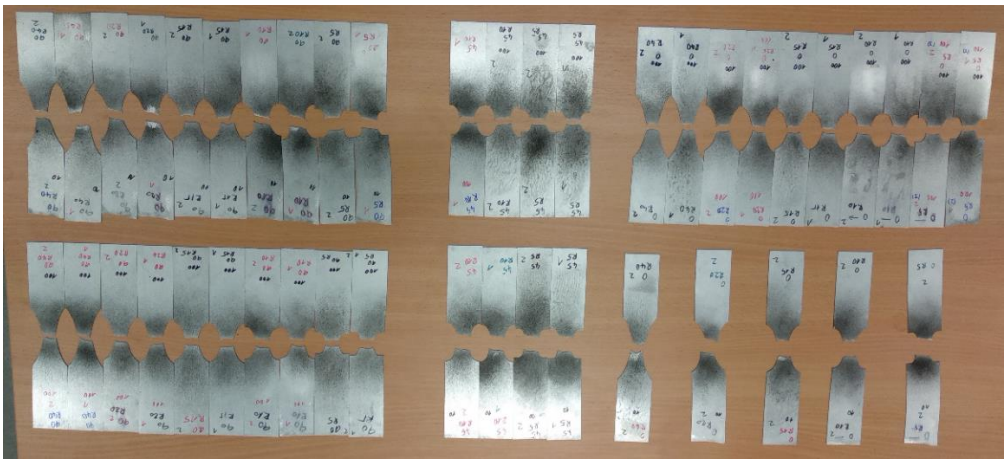
7.2 Vyhodnocování naměřených dat systémem ARAMIS

Po provedené tahové zkoušce je potřeba vyhodnotit záznamy naměřených dat. Tyto záznamy jsem získal z tahové zkoušky a systému ARAMIS nezávisle na sobě. Všechna data byla odesílána do počítače, kde došlo ke grafickému vyhodnocení. Z tahové zkoušky byly získávány závislosti zatěžovací síly na dráze čelistí. ARAMIS zaznamenává sekvence snímků dle použité snímkovací frekvence. Je důležité vyfiltrovat pouze snímky pořízené od začátku deformace do vzniku trhliny. Vyhodnocování bylo prováděno 1 až 5 snímků před vznikem trhliny. Ze snímků dokážeme analyzovat průběh maximálních a minimálních hodnot deformace. Získáme také přesný průběh deformace vzorku. Na obrázku 55 můžeme vidět vyhodnocovací pracoviště, vlevo byla zaznamenávána data ze zařízení pro tahovou zkoušku a vpravo probíhala analýza dat ze systému ARAMIS.

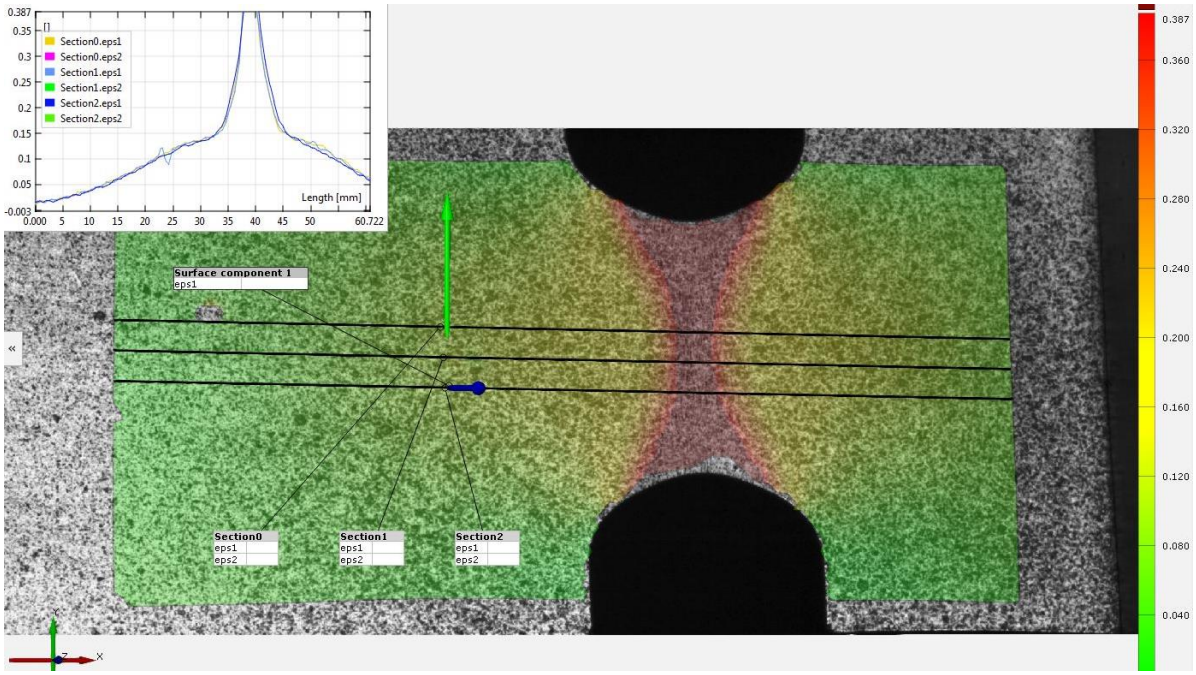


Obrázek 55: Pracoviště vyhodnocování naměřených dat

U každého měřeného vzorku jsou vytvořeny tři řezy. Tyto řezy jsou označeny jako „Section0“, „Section1“ a „Section3“. Jejich poloha je patrná z obrázku 57 a na každém z nich dochází k vyhodnocení hlavní a vedlejší deformace. Z každého vzorku jsou získány tři hodnoty pro hlavní deformaci a tomu odpovídají tři hodnoty vedlejší deformace. Pro každý vzorek jsem provedl dvě měření. Měřil jsem pro dvě rychlosti zatěžování a tři směry válcování. U vzorků pro směr válcování 45° bylo provedeno pouze měření pro geometrie R5 a R10, z tohoto důvodu jsem tyto měření nezařadil do vyhodnocení. Došlo také ke korekci některých dat, kde bylo zřejmé, že měření neproběhlo správně. Mohlo dojít například k prokluzu vzorku v čelistech nebo k porušení celistvosti stochastické měrné sítě.

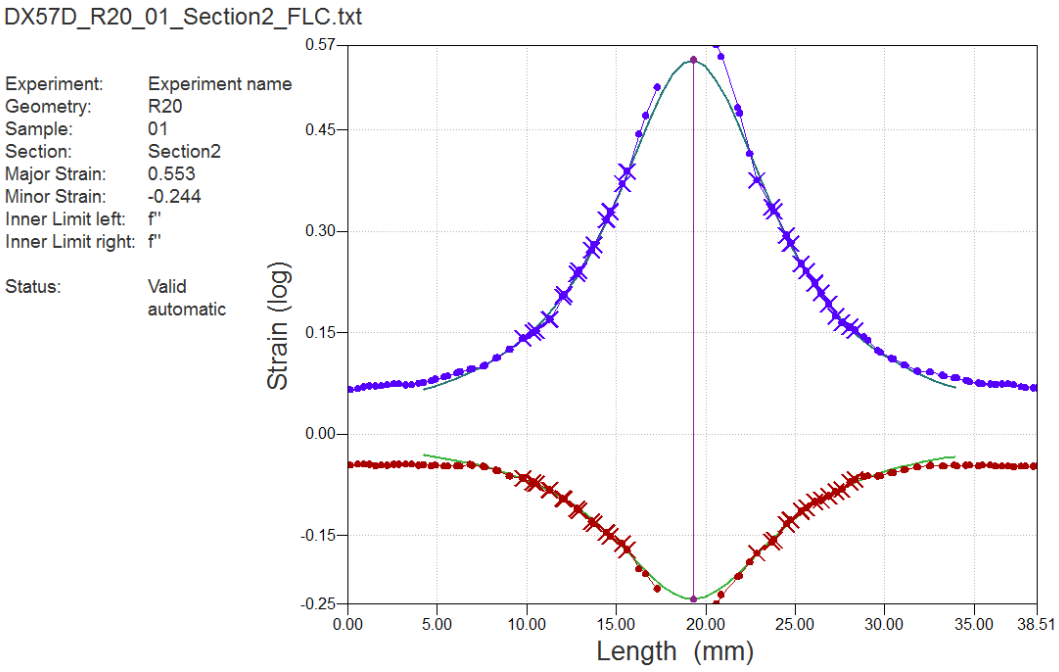


Obrázek 56: Všechny vzorky po provedení tahové zkoušky



Obrázek 57: Zobrazení metody řezů na zkušebním vzorku

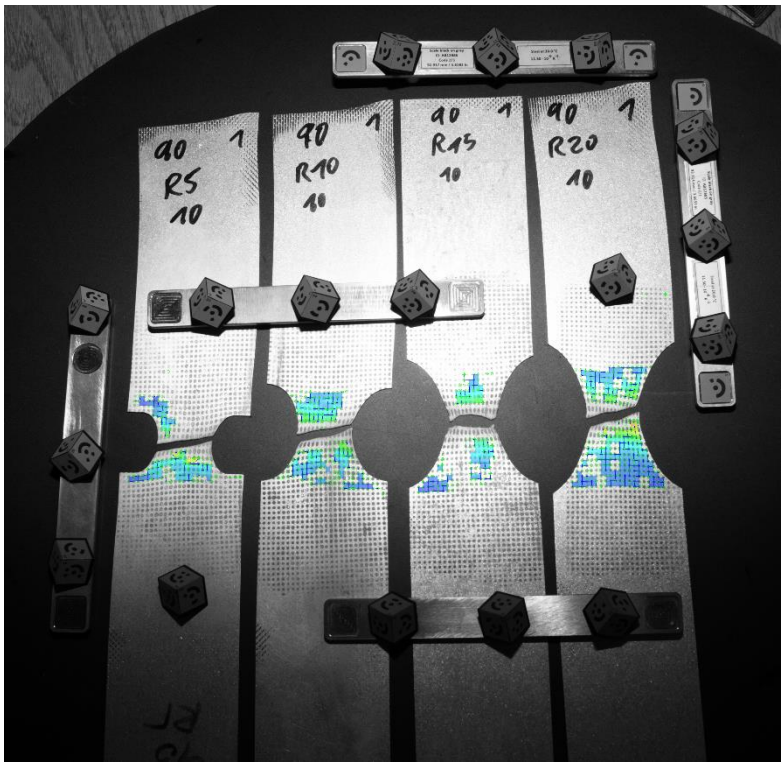
Vyhodnocované snímky, ze kterých se se určovala velikost hlavních a vedlejších deformací byly vytvořeny systémem ARAMIS. Jednalo se o závislost deformace na vzdálenosti viz obr 58.



Obrázek 58: Příklad snímku pro vyhodnocování deformací

7.3 Vyhodnocování naměřených dat systémem ARGUS

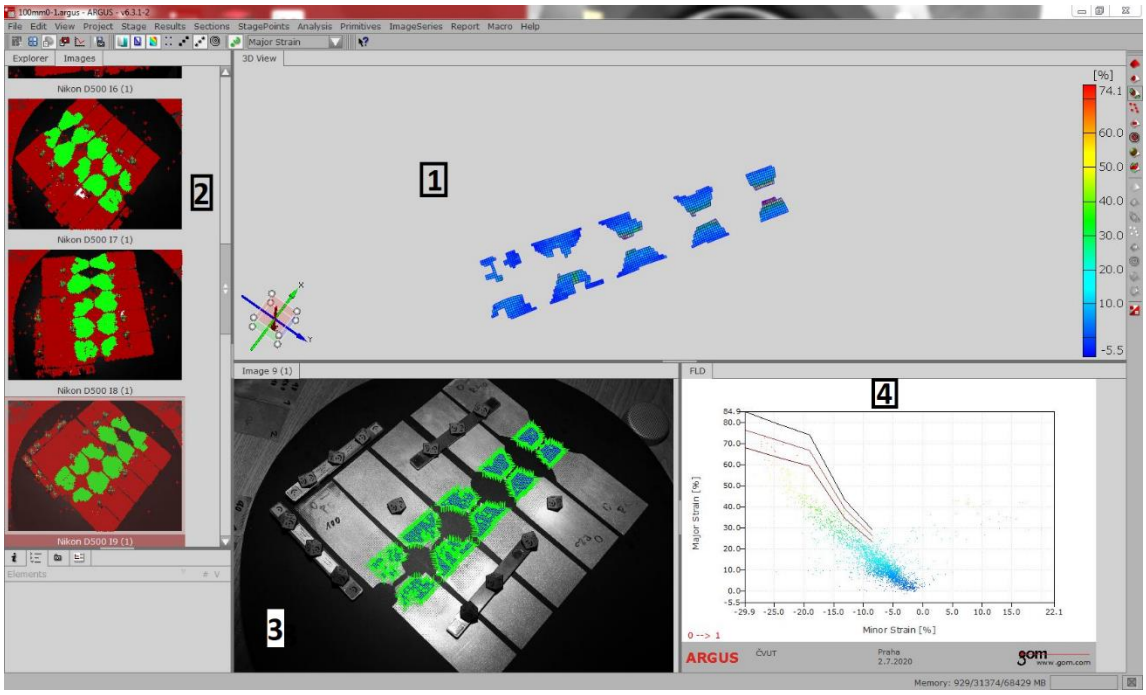
Po dokončení zkoušky tahem získáme deformované vzorky s deformovanou měrnou sítí. Tyto vzorky je potřeba nasnímat optickým systémem. K tomu slouží fotoaparát Nikon D500, pomocí kterého byla provedena série snímků z více úhlů, které společně vytvoří prostorový obraz snímaného vzorku. Snímky jsem umístil na otočnou magnetickou desku a jejich polohu jsem definoval pomocí kalibračních měrek a kamenů viz obrázek 59. Pro jeden úhel jsem pořídil minimálně šest snímků za současného otáčení otočné desky. Tento postup se opakoval pro jiný úhel fotoaparátu. Celkem jsem pořídil minimálně dvanáct snímků pro každou sérii vzorků. Více fotek nám umožňuje vytvoření kompletní deformační síť, jak je tomu v části 1 na obrázku 60. Obrázek 59 ukazuje jednu z částí pro vytvoření celkové oblasti pro vyhodnocování.



Obrázek 59: Jeden ze snímků pro následné vyhodnocování

Nafocené snímky, které obsahují vzorky s kalibračními měrkami a kameny byly nahrány do softwaru, ve kterém došlo k vyhodnocení, Systém ARGUS je schopný vyhodnotit velikost přetvoření a ztenčení plechu. Dále je možné získat údaje o velikosti hlavních a vedlejších deformací, ze kterých je možné vytvořit křivku mezních deformací. Při samotném vyhodnocení se postupuje tak, že nejprve jsou ze snímků vybrány oblasti měrné sítě, která je způsobilá vyhodnocování. Dále byla ve vybrané

oblasti vyhodnocena deformace, která byla vykreslena do grafické podoby. Každý bod měrné sítě odpovídá barevnému bodu v FLD diagramu. Tato škála bodů tvoří oblast kritických deformací. Obrázek 60 zachycuje vyhodnocování pomocí softwaru. Obrázek je rozdělen na 4 části označené čísly. Část označená číslem 1 zobrazuje vybrané oblasti měrné sítě a barevná škála udává velikost deformace, na části 3 jsou vidět vybrané oblasti měrných sítí na celkovém rozměru vzorku. Oblast 2 zachycuje všechny pořízené fotografie ze kterých je možno vybírat příslušné oblasti k vyhodnocení. Oblast 4 poskytuje vyhodnocení ve formě diagramu mezních deformací (FLD) a porovnání se systémem ARAMIS. Oblast deformace je zachycena ve formě barevných bodů pro každý bod deformační sítě.



Obrázek 60: Vyhodnocování v softwaru systému ARGUS

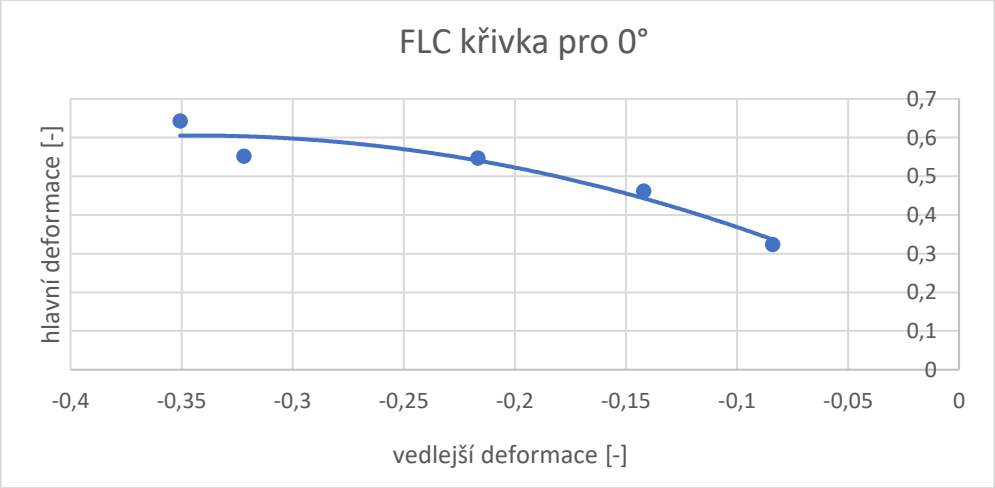
7.4 Naměřená data systémem ARAMIS

V této kapitole budou uvedeny naměřené hodnoty pro jednotlivá měření. Měření byla rozdělena dle zatěžovací rychlosti. Pro každou rychlost byly vyhodnoceny směry 0°a 90°. Kromě naměřených hodnot je zde i grafické znázornění FLD. U vytvořených křivek byly použity průměrné hodnoty deformací pro jednotlivé geometrie. Hlavní deformace je značena φ_1 a vedlejší φ_2.

7.4.1 Naměřená data pro rychlost zatěžování 10 mm/min

Tabulka 6: Naměřené hodnoty pro směr 0° a rychlost zatěžování 10 mm/min

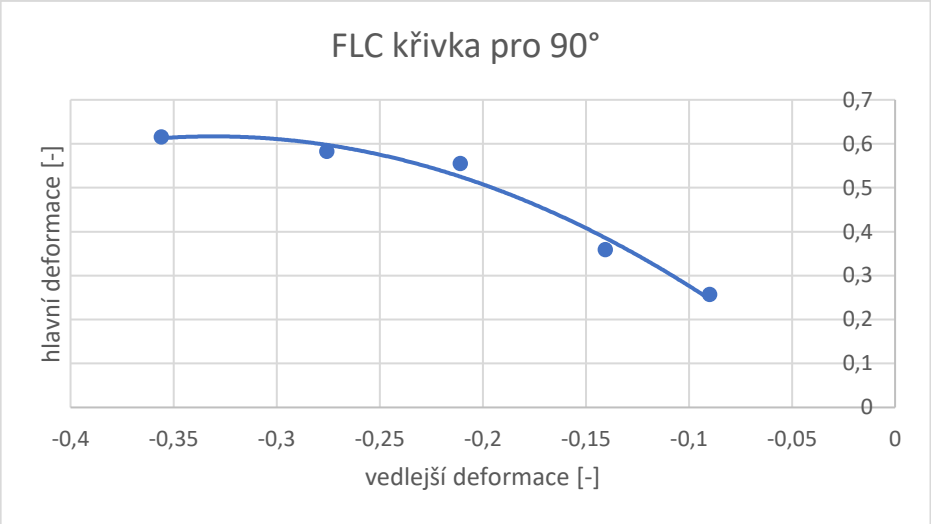
Číslo měření	Řez	Geometrie									
		R5		R10		R15		R20		R40	
		φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_1 [-]	φ_2 [-]
1	1	0,461	-0,111	0,505	-0,175	0,55	-0,21	-	-	0,646	-0,316
	2	0,261	-0,09	0,503	-0,137	-	-	0,515	-0,328	0,618	-0,33
	3	0,265	-0,07	0,415	-0,112	0,531	-0,179	-	-	0,653	-0,352
2	1	0,271	-0,065	0,503	-0,198	0,534	-0,18	0,585	-0,319	0,646	-0,33
	2	0,311	-0,078	0,381	-0,107	0,583	-0,247	0,557	-0,319	0,64	-0,345
	3	0,376	-0,09	0,463	-0,123	0,54	-0,267	-	-	0,658	-0,431
	průměr	0,324	-0,084	0,462	-0,142	0,549	-0,217	0,552	-0,322	0,644	-0,351



Obrázek 61: FLC křivka pro 0° z průměrných hodnot po korekci

Tabulka 7: Naměřené hodnoty pro směr 90° a rychlost zatěžování 10 mm/min

Číslo měření	Řez	Geometrie									
		R5		R10		R15		R20		R40	
		φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_1 [-]	φ_2 [-]
1	1	0,307	-0,08	0,213	-0,13	-	-	-	-	-	-
	2	0,314	-0,09	0,205	-0,15	-	-	0,659	-0,256	0,628	-0,374
	3	0,267	-0,08	0,269	-0,11	-	-	-	-	-	-
2	1	0,239	-,012	0,53	-0,184	0,495	-0,146	0,622	-0,234	-	-
	2	0,217	-0,07	0,515	-0,135	0,565	-0,212	0,553	-0,321	0,599	-0,341
	3	0,196	-0,1	0,423	-0,135	0,605	-0,275	0,495	-0,292	0,618	-0,315
	průměr	0,257	-0,09	0,359	-0,141	0,555	-0,211	0,582	-0,276	0,615	-0,356

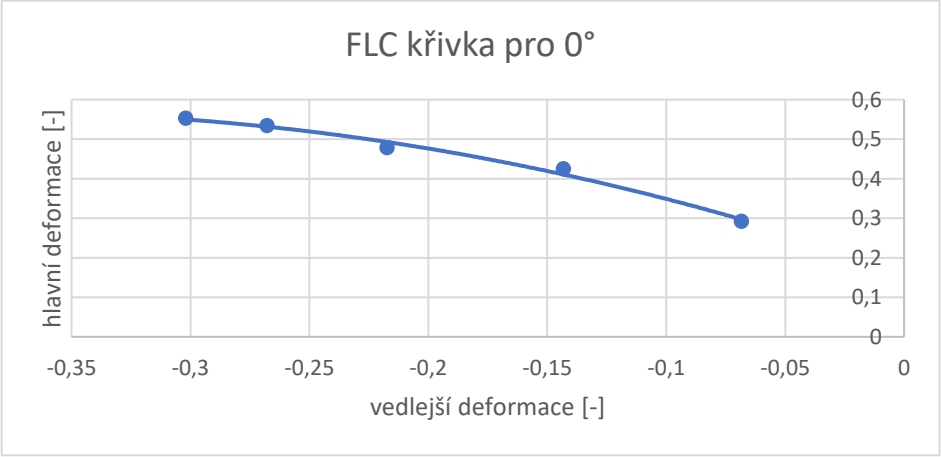


Obrázek 62: FLC křivka pro 90° z průměrných hodnot po korekci

7.4.2 Naměřená data pro rychlost zatěžování 100 mm/min

Tabulka 8: Naměřené hodnoty pro směr 0° a rychlost zatěžování 100 mm/min

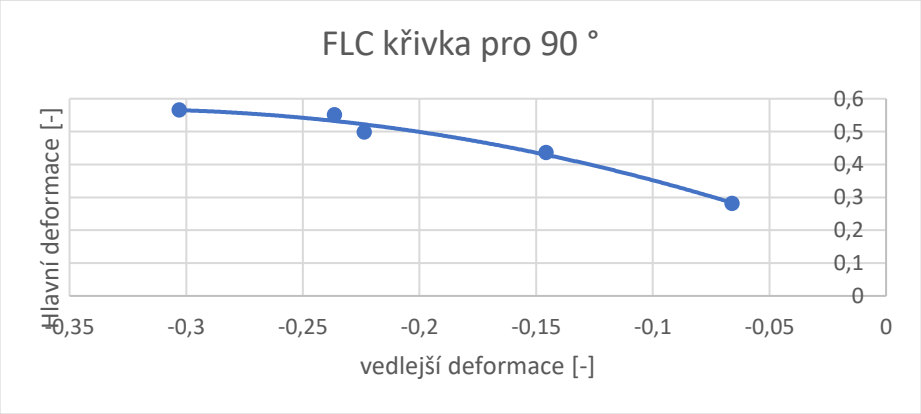
Číslo měření	Řez	Geometrie									
		R5		R10		R15		R20		R40	
		φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_1 [-]	φ_2 [-]
1	1	0,281	-0,07	0,414	-0,14	-	-	0,477	-0,27	0,725	-0,335
	2	0,262	-0,065	0,373	-0,15	0,417	-0,18	0,607	-0,319	-	-
	3	0,367	-0,08	0,46	-0,12	0,522	-0,21	0,53	-0,289	0,387	-0,317
2	1	0,253	-0,07	0,415	-0,16	0,425	-0,144	0,568	-0,194	-	-
	2	0,299	-0,065	0,473	-0,185	0,568	-0,29	-	-	-	-
	3	0,302	-0,06	0,414	-0,104	0,459	-0,27	0,488	-0,267	0,546	-0,254
	průměr	0,292	-0,068	0,425	-0,143	0,478	-0,217	0,534	-0,268	0,553	-0,302



Obrázek 63: FLC křivka pro 0° z průměrných hodnot po korekci

Tabulka 9: Naměřené hodnoty pro směr 90° a rychlost zatěžování 100 mm/min

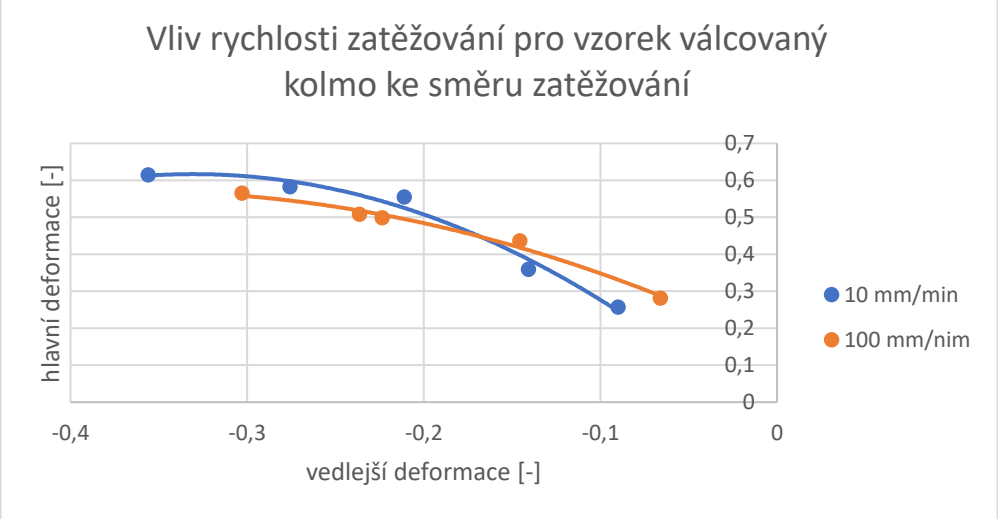
Číslo měření	Řez	Geometrie									
		R5		R10		R15		R20		R40	
		φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_1 [-]	φ_2 [-]
1	1	0,136	-0,07	0,597	-0,227	0,543	-0,25	0,537	-0,244	0,579	-0,235
	2	0,308	-0,07	0,425	-0,129	0,55	-0,246	0,532	-0,206		
	3	0,336	-0,065	0,456	-0,114			0,533	-0,244	0,672	-0,392
2	1	0,299	-0,07	0,472	-0,141	0,493	-0,297	0,562	-0,23	0,524	-0,345
	2	0,287	-0,07	0,288	-0,125	0,455	-0,188	0,59	-0,258	0,502	-0,215
	3	0,323	-0,051	0,378	-0,138	0,451	-0,137			0,55	-0,328
	průměr	0,282	-0,066	0,436	-0,146	0,498	-0,224	0,551	-0,236	0,565	-0,303



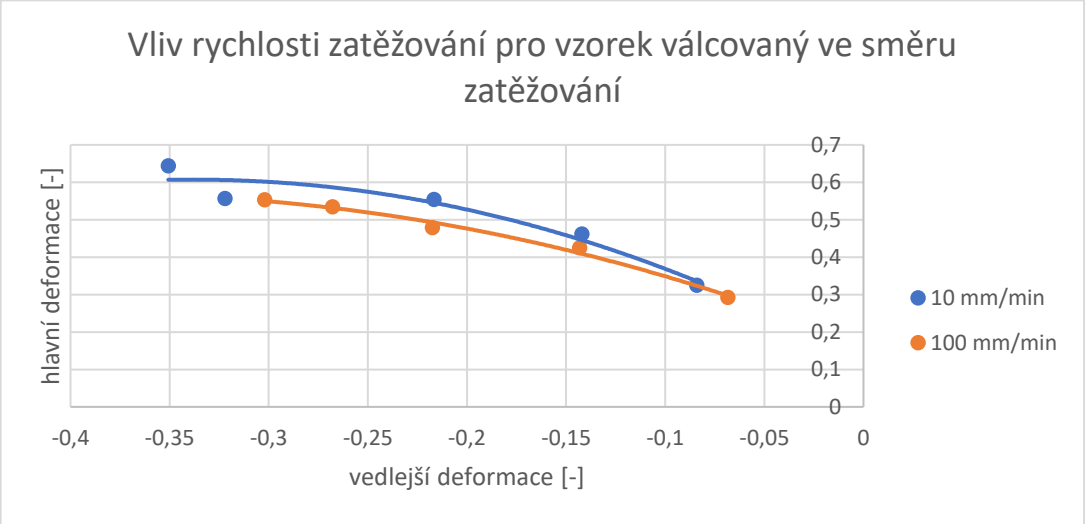
Obrázek 64: FLC křivka pro 90° z průměrných hodnot po korekci

8 Diskuze a porovnání výsledků

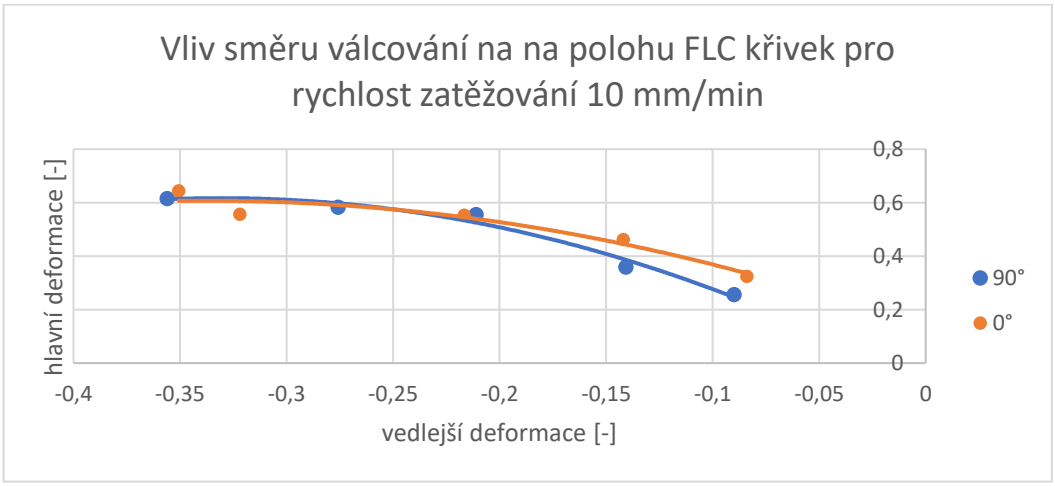
V rámci experimentálních měření jsem měřil série vzorků vyřezaných pomocí vláknového laseru z tabule plechu. Vzorky byly odebírány pro různé směry válcování tak, aby mohl být vyhodnocen vliv anizotropie. Materiálem byla ocel DX57D. Cílem práce bylo vyhodnocení levé části FLD diagramu pomocí systému ARAMIS na zařízení pro tahovou zkoušku. Vyhodnocení bylo zaměřeno na porovnání limitních křivek pro různé rychlosti zatěžování a různé směry válcování jednotlivých vzorků, jak ukazují tabulky naměřených hodnot z kapitol 6.4.1 a 6.4.2. Hlavními problémy byla soudržnost a přilnavost stochastické měrné sítě a také prokluz v čelistech stroje pro tahovou zkoušku. Tyto chyby měření jsem se snažil eliminovat v grafickém vyhodnocení, aby nedocházelo ke zkreslení výsledků měření. V následujících grafech je porovnání mezních křivek pro rychlost zatěžování a směry válcování. U porovnání z hlediska rychlosti zatěžování je patrné, že pro nižší rychlost zatěžování jsme schopni dosáhnout vyšších hodnot hlavních deformací, nicméně tento rozdíl není nijak výrazný. U porovnání vlivu směru válcování můžeme vidět, že křivky se liší jen velmi málo, nebo u rychlosti zatěžování 100 mm/min téměř vůbec. V případě tohoto experimentu lze říct, že vliv rychlosti zatěžování a vliv směru válcování nemá téměř žádný vliv na polohu křivek mezní tvářitelnosti. Na druhou stranu rozsah experimentu byl dva vzorky pro každý směr a rychlost zatěžování, z tohoto důvodu by bylo nutné poskytnout daleko více měření, pro ověření těchto závěrů.



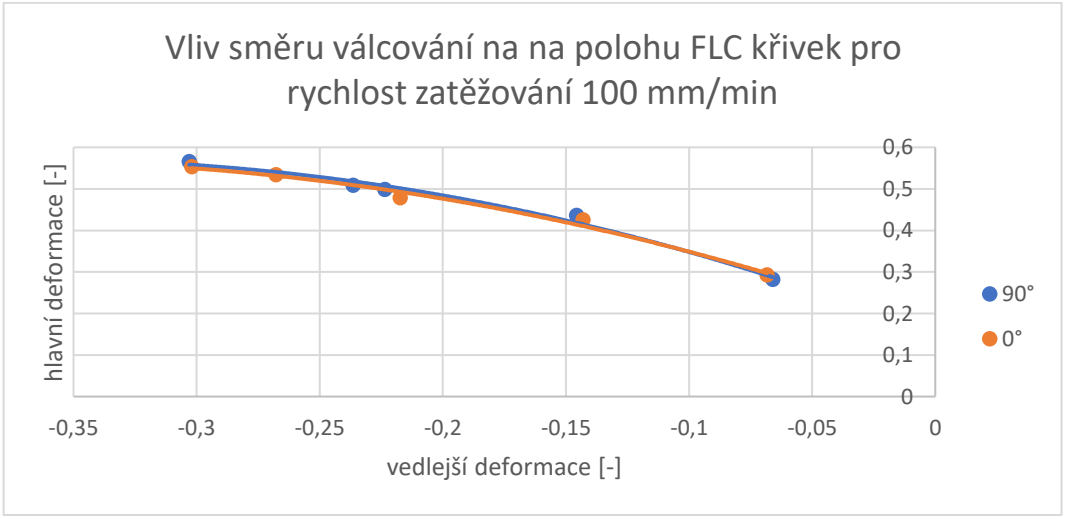
Obrázek 65: Porovnání křivek mezní tvářitelnosti pro směr válcování 90°



Obrázek 66: Porovnání křivek mezní tvářitelnosti pro směr válcování 0°

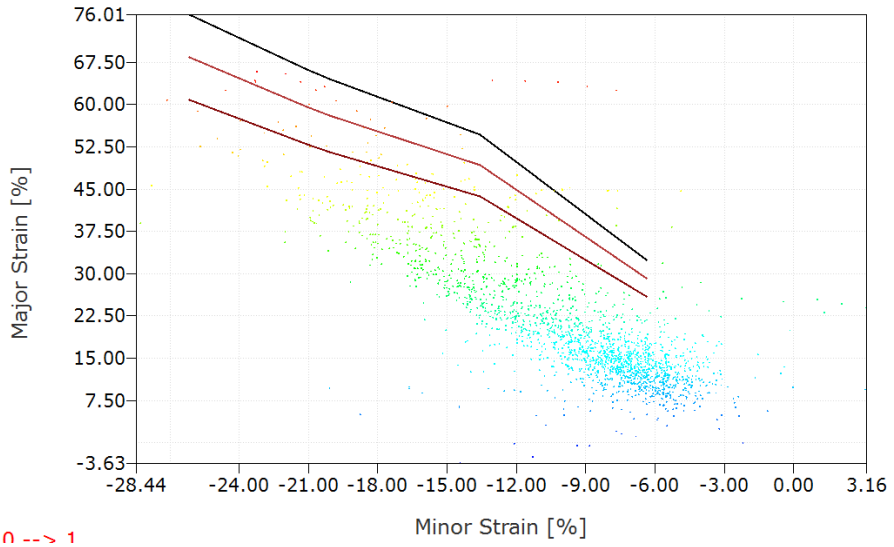


Obrázek 67: Porovnání křivek mezní tvářitelnosti pro rychlost zatěžování 10 mm/min

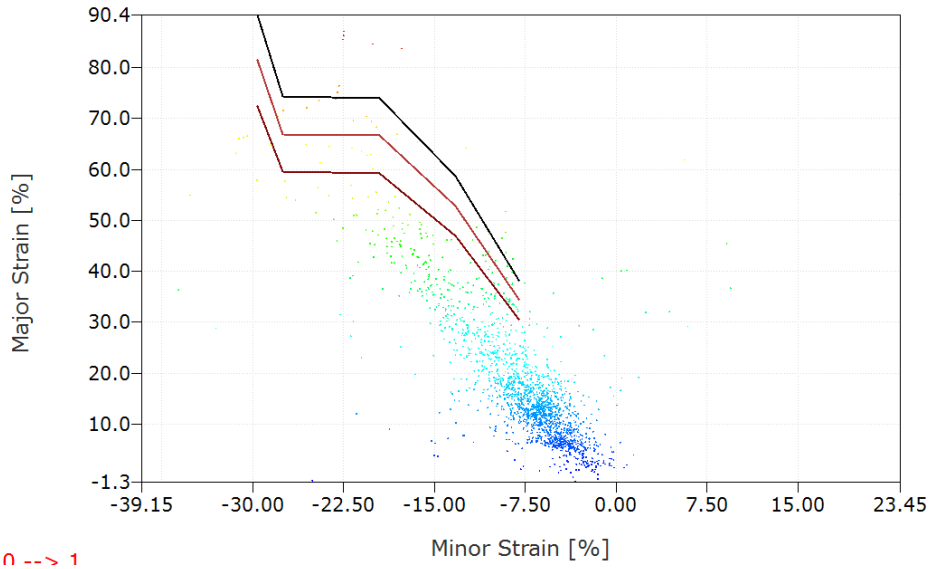


Obrázek 68: Porovnání křivek mezní tvářitelnosti pro rychlost zatěžování 100 mm/min

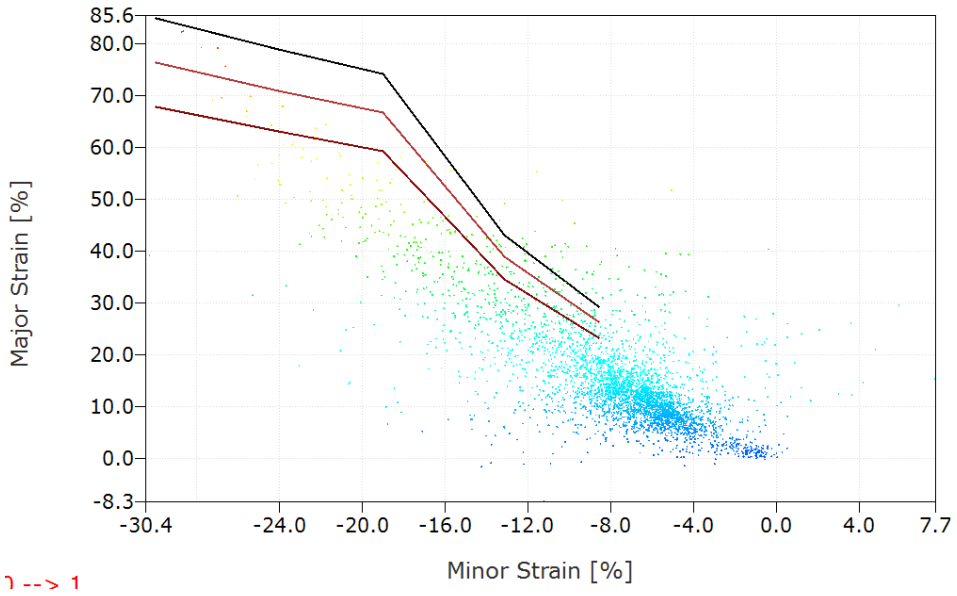
Výsledky získané pomocí systému ARAMIS lze srovnávat také za použití jiných optických systémů. V tomto případě proběhlo porovnání výsledků se systémem ARGUS. Rozdíly v průběhu měření jsou popsány ve výše uvedených kapitolách. Výhodou tohoto porovnání je, že měření může probíhat na stejných vzorcích na kterých je měrná síť pro systém ARGUS nanesena z druhé strany vzorku. Tím dosáhneme identického zatěžování. Nelze opomenout také vliv rozdílných způsobů snímání a vyhodnocování. Technicky je systém ARAMIS zdokonalením systému ARGUS, proto jsou tyto rozdíly ve výsledcích měření pochopitelné. Rozdíly také mohly být způsobeny nepříliš dobrou kvalitou měrné sítě. Na následujících obrázcích vidíme křivky získané ze systému ARAMIS a barevné body, které jsou zaznamenány systémem ARGUS.



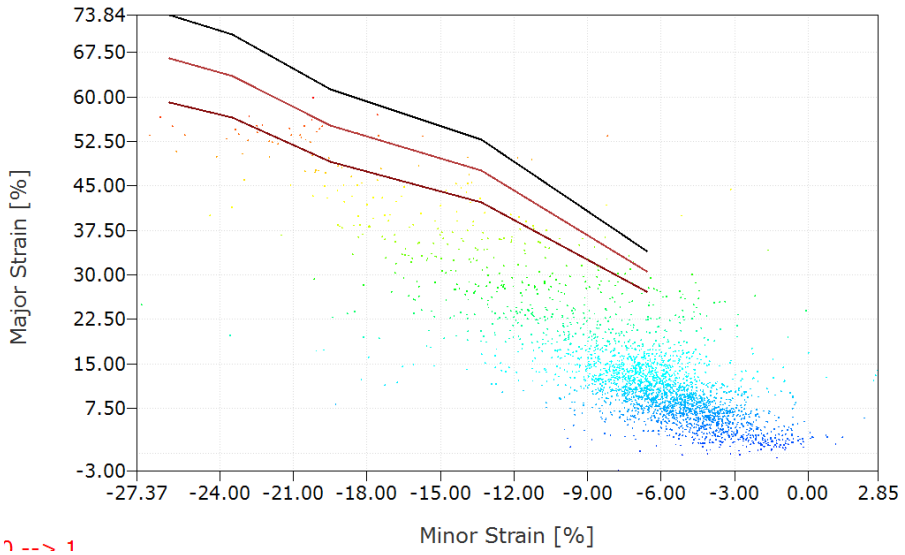
Obrázek 69: Výsledek měření ze systému ARGUS pro rychlost zatěžování 10 mm/min a směr 90°



Obrázek 70: Výsledek měření ze systému ARGUS pro rychlost zatěžování 10 mm/min a směr 0°



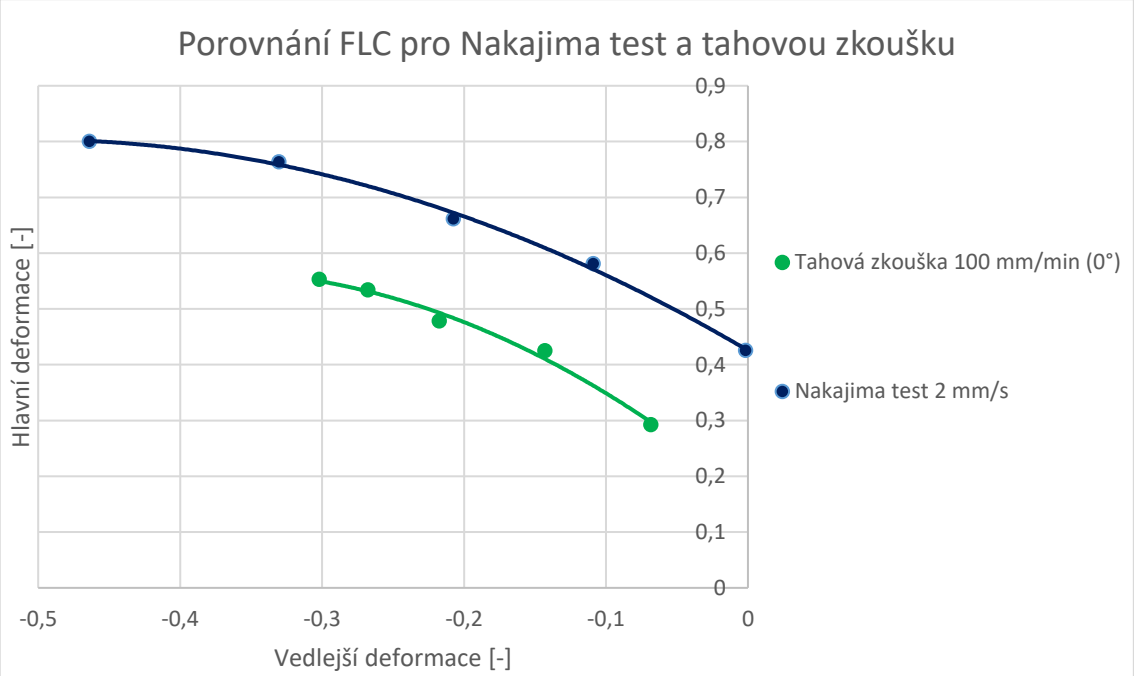
Obrázek 71: Výsledek měření ze systému ARGUS pro rychlost zatěžování 100 mm/min a směr 90°



Obrázek 72: Výsledek měření ze systému ARGUS pro rychlost zatěžování 100 mm/min a směr 0°

Jak již bylo uvedeno v části zaměřené na získávání FLD, tak zkoušek existuje celá řada. Jednou z nich je i Nakajima test, při kterém dochází k deformování plechu půlkulovým tažníkem, až do prasknutí materiálu. Rozdíly mezi Nakajima testem a tahovou zkouškou jsou především absence tření při tahové zkoušce nebo jiný stav napjatosti. Při Nakajima testu získáme levou i pravou stranu FLD. Nakajima test byl

použit při jedné souběžné diplomové práci, proto jsem se rozhodl pro porovnání poloh křivek mezních deformací v oblasti záporných vedlejších deformací. V grafu na obrázku 73 je porovnání křivek mezních deformací pro tahovou zkoušku, pro směr 0° a rychlost 100 mm/min a Nakajima testu, při normované rychlosti 2 mm/s. Tvar těchto křivek je velice podobný, ale je patrné posunutí křivky ve směru vertikální osy hlavní deformace. Při Nakajima testu bylo dosaženo vyšších hodnot hlavních deformací a bezpečná oblast pro tváření byla větší.



Obrázek 73: Porovnání FLC u tahové zkoušky a Nakajima testu

9 Závěr

Tato práce byla zaměřena na získání levé části FLD diagramu pomocí optického měřícího zařízení. Zkoušení jsem provedl na vzorcích podobných zkoušce tahem. Cílem bylo sledovat deformace pomocí systému ARAMIS na zkušebním stroji pro zkoušku tahem. Při takovémto zatěžování nedochází k ovlivnění v důsledku tření mezi nástrojem a materiálem. Tato zkouška měla za cíl porovnat vliv vybraných faktorů na polohu těchto křivek. Zvolil jsem vliv rychlosti zatěžování a směru válcování. Hlavním systémem, na který jsem se v práci zaměřil byl systém ARAMIS, nicméně stejný experiment byl vyhodnocen také systémem ARGUS.

V úvodní teoretické části je seznámení s danou problematikou. Tváření a zejména tvářitelnost je zde popsána i s možnými faktory, které tvářitelnost ovlivňují. Následuje kapitola, která se věnuje způsobům vyhodnocení chování materiálu. Je zde detailně popsána tahová zkouška, která je součástí experimentu. Často využívané v dnešní době jsou počítačové simulace. Cílem této práce je získání diagramu mezních deformací, jehož význam a možnosti získávání jsou uvedeny v kapitole 4. Následuje popis optických měřících systémů, které využívají metod digitální obrazové korelace.

Experimentální část se zabývá tvorbou křivek mezních deformací. Zatěžování jsem provedl pomocí tahové zkoušky na stroji LabTest Model 5.100SP1. Snímání deformací a vyhodnocení probíhalo pomocí systémů ARAMIS a ARGUS. Testovaným materiálem byla ocel DX57D o tloušťce 0,7 mm. Experiment začíná již přípravou zkušebních vzorků. Zvolil jsem geometrii vhodnou pro tahovou zkoušku a zjišťování křivek mezní tvářitelnosti. Klíčovým faktorem je správná příprava povrchu vzorku, která rozhoduje o kvalitě a přesnosti naměřených dat. U obou systémů se jedná o správnou předúpravu povrchu a následné nanesení měrné sítě na povrch vzorku. U obou systémů se jedná o odlišný proces nanášení i odlišnost samotné měrné sítě. Této problematice se věnuje kapitola 6, která obsahuje rovněž kalibraci systému ARAMIS. Následující kapitola má za cíl seznámit čtenáře s průběhem zkoušky včetně všech parametrů měření. Součástí této kapitoly je rovněž vyhodnocování naměřených dat. Vyhodnocování probíhalo v softwaru příslušného systému. Naměřená data jsem převedl do grafické podoby. Cílem bylo porovnat vybrané vlivy, které by mohly mít vliv na polohu křivek mezních deformací. Byl vybrán vliv rychlosti zatěžování, kde byly porovnávány dvě rychlosti a to rychlost 10 mm/min a rychlost 100 mm/min. Druhým faktorem byl vliv směru

válcování, tj. vliv anizotropie mechanických vlastností. Vzorky jsem odebíral ve směru válcování a také kolmo na směr válcování.

Porovnání jsem graficky zpracoval a tyto grafy jsou k vidění v kapitole 8, z výsledků je patrné, že vliv rychlosti deformace a směru válcování není nijak výrazný. Dobře je to vidět například na obrázku 68, kdy při rychlosti 100 mm/min jsou křivky pro oba směry válcování téměř totožné. V rozdílech mezi rychlostmi zatěžování si můžeme všimnout, že při menších rychlostech vydrží materiál více deformace, ovšem ani tento rozdíl není tak výrazný. Celkově lze u tohoto experimentu říct, že nebyl zaznamenám výrazný vliv rychlosti zatěžování nebo anizotropie mechanických vlastností na polohu křivek mezních deformací.

Jako další jsem porovnával vyhodnocení deformací pomocí dvou optických měřících systémů. Mimo již zmíněného systému ARAMIS jsem vyhodnocení deformací provedl pomocí systému ARGUS. Ačkoli tyto systémy porovnávali stejné vzorky zaznamenal jsem rozdíly ve vyhodnocená deformací. Grafické porovnání zachycují grafy na obrázcích 69 až 72. Z těchto grafů je patrné, že na stejných vzorcích jsme dosáhli rozdílného vyhodnocení deformací. Poloha křivek získaných ze systému ARAMIS je v grafech umístěna výše než body deformované sítě u systému ARGUS. Je to způsobeno rozdílnými metodami snímání a vyhodnocení deformací, které jsou v této práci popsány.

Vyhodnocení deformací pomocí křivek mezních tvářitelností se běžně provádí pomocí technologických zkoušek. Touto zkouškou může být například zkouška Nakajima. Z tohoto důvodu jsem porovnal polohu křivky z tahové zkoušky také s touto zkouškou. Výsledek je zobrazen v grafu na obrázku 73. Křivka pro tahovou zkoušku je položena níže vzhledem k ose hlavní deformace, bezpečná oblast tváření je tedy pro takovou zkoušku nižší. U tahové zkoušky není ovlivnění třením mezi nástrojem a materiálem a také je u těchto zkoušek rozdílný stav napjatosti.

V průběhu zkoušení se vyskytly problémy, které mohly naměřená data zkreslit. U systému ARAMIS to byl možný prokluz v čelistech nebo nedostatečná soudržnost měrné sítě způsobená velkou deformací v kritické oblasti. U systému ARGUS to byla nedostatečná kvalita měrné sítě, díky čemuž nebyla zcela pokryta oblast vyhodnocení.

K potvrzení závěrů této práce by bylo nutné provést více měření, aby bylo možné statistické zhodnocení. Zejména je nutné do budoucna zlepšit kvalitu měrné sítě pro systém ARGUS a řešit upnutí do čelistí zařízení pro tahovou zkoušku.

Některé závěry této práce poskytují mnoho možností, jak na tuto práci navázat. Velice zajímavý je vliv směru válcování a bylo by vhodné zabývat se tímto vlivem i nadále. V praxi jsme si ověřili použití optického měřícího systému se strojem pro tahovou zkoušku. V tomto případě jsem získával jednotlivé výsledky odděleně, ze systému ARAMIS i ze stroje pro zkoušku tahem. Propojení obou zařízení by jistě přispělo k novým možnostem analýzy naměřených dat. Systém ARAMIS nabízí celou řadu možností a díky nastavitelné snímkovací frekvenci a rozlišení lze tento systém použít na děje, při kterých dochází k rychlejší deformaci nebo dynamickému zatěžování.

Použitá literatura

[1] SCHINDLER, Ivo, Petr KAWULOK a Miroslav LEGERSKI. *Metalurgická tvařitelnost (studijní opora)*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2008.

[2] PETRUŽELKA, Jiří a Pavel SONNEK. *Tvařitelnost kovových materiálů*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2007. 211 s.

[3] Katedra strojírenské technologie Technické univerzity v Liberci. *Technologie II* [online]. TU v Liberci [cit. 2020-01-16]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm

[4] 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.

[5] PETRUŽELKA, Jiří a Richard BŘEZINA. *Úvod do tváření I*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2001. ISBN 80-7078-877-1.

[6] BEROUN, Stanislav. *Technologie tváření kovů* [online]. [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:1886

[7] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.

[8] BENEŠOVÁ, Soňa a Vladimír BERNÁŠEK. Technologie tváření. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2014. 91 s. ISBN 978-80-261-0449-0.

[9] Katedra vozidel a motorů Technické univerzity v Liberci. *Úvod do strojírenství* [online]. TU v Liberci [cit. 2020-01-25]. Dostupné z: http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:1886

[10] ČIŽMÁROVÁ, Elena a Jana SOBOTOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.

[11] ČSN EN ISO 6892–1 *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.

[12] KNÍŽEK, Jiří. *Měření mezního stavu deformace při zkoušce rozšiřování otvoru pomocí optického systému ARAMIS.* Liberec, 2013. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Fakulta strojní. Vedoucí práce Jiří SOBOTKA.

[13] HAMERNÍK, Jan. *Vlastnosti kovových materiálů a jejich zkoušení.* [online]. Pelhřimov, 2006 [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: http://jhamernik.sweb.cz/vlastnosti.htm

[14] Ústav strojírenské technologie - obor tváření. In: *Zjišťování anizotropie z tahové zkoušky* [online].2014. [cit. 2020-02-16]. Dostupné z: http://u12133.fs.cvut.cz/assets/subject/files/126/6-anizotropie.pdf

[15] DAVIS, J. R. *Tensile testing*. 2.vyd. Ohio: ASM International, United States, 2004. ISBN: 087170806X/9780871708069

[16] TATÍČEK, František. *Vliv materiálu na kvalitu výlisku* [online]. 2018 [cit. 2020-02-16]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/vliv-materialu-na-kvalitu-vylisku.html

[17] TATÍČEK, František. Teorie a metodika tváření – přednášky. Praha: ČVUT, 2017.

[18] KOPŘIVA, Miloslav. *Počítačová podpora technologie* [online]. Brno: Vysoké učení technické, 2002 [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: https://docplayer.cz/6833192-Pocitacova-podpora-technologie.html

[19] FABÍK, Richard. *Modelování tvářecích procesů* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: https://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/modelovani-tvarecich-procesu/Fabik_Modelovani_tvarecich_procesu.pdf

[20] KOBAYASHI, Shiro, Soo-Ik OH a Taylan ALTAN. *Metal forming and the finite-element method*. New York: Oxford University Press, 1989. ISBN 0-19-504402-9.

[21] KOPŘIVA, Miloslav. *Činnosti v postprocesingu simulačních software s ukázkami* [online]. Brno: Vysoké učení technické, 2003 [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/dpp_cinnost_v_preprocesingu_kopriva.pdf

[22] JELÍNEK, Dan. *3D optické měřicí systémy vhodné pro technologie tváření*. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Eva Peterková, Ph.D.

[23] KEELER, Stuart. *The Science of Forming: Forming-Limit Diagrams: Then and Now*. Metalformingmagazine [online]. 2016. [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: https://www.metalformingmagazine.com/magazine/article/?/2016/7/1/Forming-Limit_Diagrams:_Then_and_Now

[24] JURČIŠIN, Miroslav. *Experimentální měření křivky mezních deformací.* MM průmyslové spektrum [online]. 2015. [cit. 2020-03-13]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/experimentalni-mereni-krivky-meznich-deformaci.html

[25] E-Design [online]. Elsevier, 2015 [cit. 2020-03-13]. DOI: 10.1016/C2009-0-63076-2. ISBN 9780123820389

[26] BANABIC, Dorel. *Advanced methods in material forming*. Berlin: Springer, c2007. ISBN 3540698442.

[27] MALESA, Marcin, Krzysztof MALOWANY, Urszula TOMCZAK, Bartłomiej SIWEK, Małgorzata KUJAWIŃSKA a Anna SIEMIŃSKA-LEWANDOWSKA. Application of 3D digital image correlation in maintenance and process control in industry. *Computers in Industry* [online]. 2013, 64(9), 1301-1315 [cit. 2020-03-15]. DOI: 10.1016/j.compind.2013.03.012. ISSN 01663615. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0166361513000651

[28] Metrology systems [online]. GOM [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: https://www.gom.com/metrology-systems.html

[29] *Digital Image Correlation: Overview of Principles and Software*. In: Correlated Solutions [online]. s. 56 [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: http://www.correlatedsolutions.com/supportcontent/condensed-shortcourse.pdf

[30] SCHMIDT, Timothy, John TYSON, Konstantin GALANULIS, Duane REVILOCK a Matthew MELIS. *Full-field dynamic deformation and strain measurements using high-speed digital cameras* [online]. In: Philadelphia: Trilion Quality Systems, 2014 [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: https://trilion.com/wp-content/uploads/Ppr.409.SPIE-High-Speed.pdf

[31] DIC Measurements in Engineering Applications. *MESOCOS: Digital Image Correlation* [online]. Praha: MESOCOS s.r.o, 2015 [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: http://image-correlation.com/assets/files/MESOCOS-DIC.pdf

[32] NOVÁK, Vít. *Teorie metrologických procesů.* Praha: České vysoké učení technické, 2019.

[33] ARAMIS: *Determination of Forming Limit Curves.* Braunschweig, 2014.

[34] PAN, Bing, QIAN, Kemao, XIE, Huimin a Anand ASUNDI. *Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review*. Measurement Science and Technology[online]. 2009, 20(6), 062001- [cit. 2020-03-29]. DOI: 10.1088/0957-0233/20/6/062001. ISSN 0957-0233. Dostupné z: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/20/6/062001

[35] Metrology systems: ARAMIS adjustable [online]. *GOM* [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: *https://www.gom.com/metrology-systems/aramis/aramis-adjustable.html*

[36] *Determination of Materiale Behavior in tensile test* [online]. *GOM* [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: *https://www.gom.com/metrology-systems/aramis/aramis-adjustable.html*

[37] ARAMIS. *User Information – Hardware,* Braunschweig, 2014.

[38] KŘÍŽ, Tomáš. *Vliv způsobu přípravy zkušebního vzorku na deformace zjišťované systémem aramis*. Praha, 2019. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Ing. František Tatíček, Ph.D.

[39] HOVAD, Jan. *Deformační sítě a jejich uplatnění v praxi*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D.

[40] ČSN EN ISO 10346 *Kontinuálně žárově ponorem povlakované ocelové ploché výrobky pro tváření za studena – Technické dodací podmínky.* Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Vliv teploty na tvářitelnost ..... - 14 -
Obrázek 2: Závislost přetvárného odporu na teplotě a oblasti tváření ..... - 14 -
Obrázek 3: Změna tvaru zrn v důsledku tváření za studena ..... - 15 -
Obrázek 4: Změna mechanických vlastností při válcování ..... - 16 -
Obrázek 5: Oblast tvářecích teplot ..... - 18 -
Obrázek 6: Pracovní diagram měkké oceli ..... - 20 -
Obrázek 7: Smluvní tahový diagram ..... - 21 -
Obrázek 8: Poměr meze kluzu a meze pevnosti jako ukazatele tvářitelnosti ..... - 23 -
Obrázek 9: Princip odebírání vzorků s ohledem na směr válcování ..... - 24 -
Obrázek 10: Diagram tvářitelnosti podle Lieta ..... - 27 -
Obrázek 11: průběh teplotního pole po tažné operaci ..... - 28 -
Obrázek 12: Schéma principu aplikace simulací ..... - 29 -
Obrázek 13: Základní typy prvků ..... - 31 -
Obrázek 14: Nasíťování bramy při simulaci vertikálního válcování ..... - 31 -
Obrázek 15: Diagram mezních deformací podle Tomlenova ..... - 32 -
Obrázek 16: Původní Keelerův diagram ..... - 32 -
Obrázek 17: Keeler – Goodwinův diagram ve skutečných deformacích ..... - 33 -
Obrázek 18: Typické deformační stopy při plošném tváření ..... - 34 -
Obrázek 19: Vliv tloušťky materiálu na polohu FLC křivek ..... - 35 -
Obrázek 20: Vliv velikosti meze kluzu na polohu FLC křivek ..... - 35 -
Obrázek 21: Vliv exponentu deformačního zpevnění a normálové anizotropie na polohu FLC křivek ..... - 35 -
Obrázek 22: FLD zjištěné pomocí experimentálních technik ..... - 36 -
Obrázek 23: Experimentálně zjištěný FLD pro hliníkový plech ..... - 37 -
Obrázek 24: Analýza deformace v softwaru Pam – Stamp ..... - 37 -
Obrázek 25: příklad náhodného patternu ..... - 38 -
Obrázek 26: průběh transformace fazet ..... - 39 -
Obrázek 27: Princip dvourozměrné korelace ..... - 40 -
Obrázek 28: Fazeta před a po deformaci ..... - 40 -
Obrázek 29: princip třírozměrné korelace ..... - 41 -
Obrázek 30: Posunutí měřené oblasti při snímání dvěma kamerami ..... - 41 -
Obrázek 31: Uspořádání systému ARAMIS ..... - 42 -

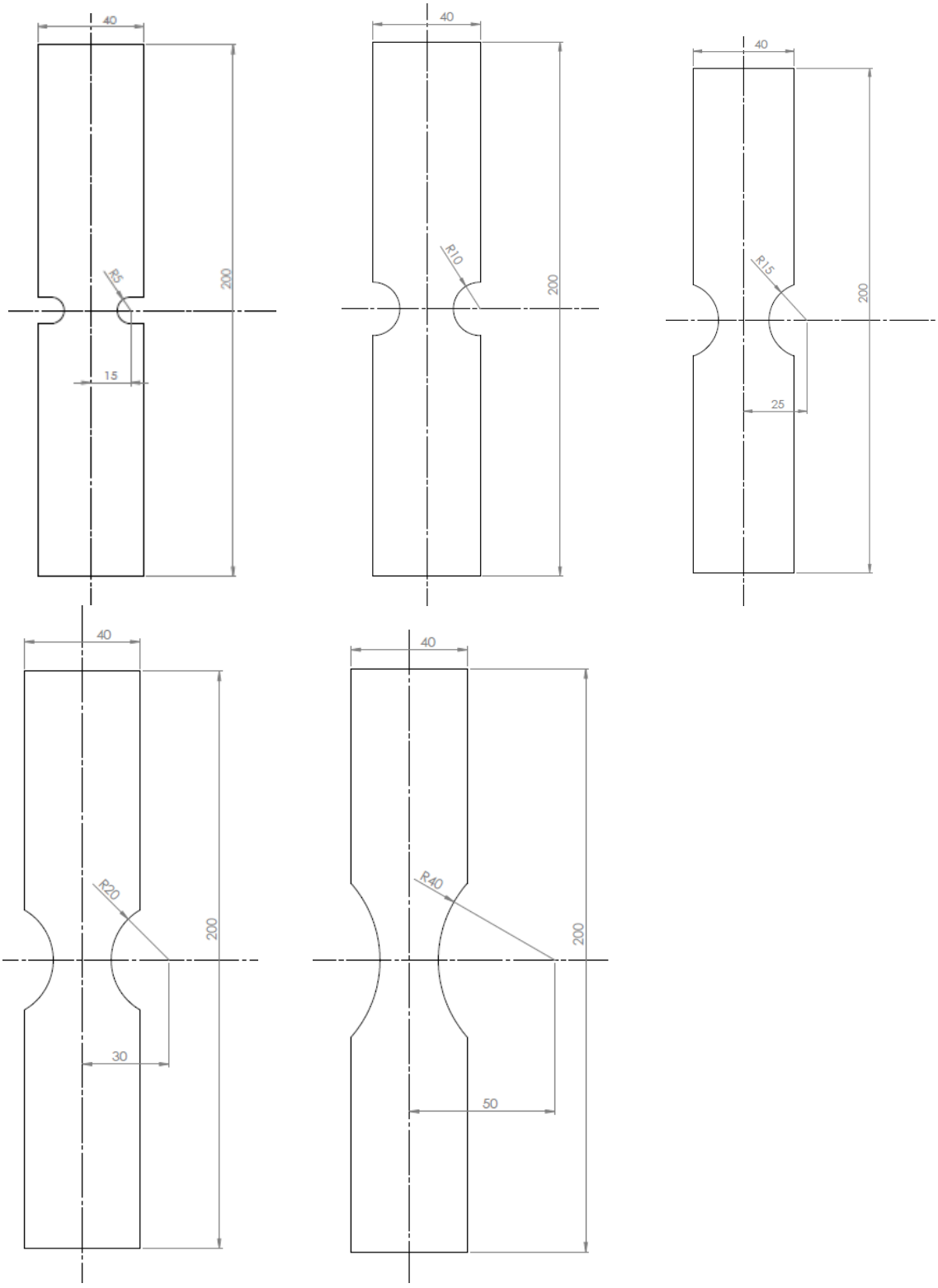
Obrázek 32: Vyhodnocení deformace při tahové zkoušce pomocí systému ARAMIS..... - 43 -
Obrázek 33: Souprava pro měření systémem ARGUS..... - 44 -
Obrázek 34: Příklady různých typů měrných sítí ..... - 45 -
Obrázek 35: Příklad deformovaného vzorku připraveného pro snímání..... - 45 -
Obrázek 36: FLC křivky získané pomocí měření různě připravených vzorků..... - 47 -
Obrázek 37: Rozměry plechu a rozmístění vzorků..... - 48 -
Obrázek 38: Tahový vzorek z tenkého plechu..... - 48 -
Obrázek 39: Vzorky připravené pomocí vláknového laseru ..... - 49 -
Obrázek 40: Vliv špatného odmaštění..... - 50 -
Obrázek 41: Prostředky pro odmaštění..... - 51 -
Obrázek 42: Barvy používané k nanášení patternu ..... - 51 -
Obrázek 43: Zkušební vzorky s naneseným patternem ..... - 52 -
Obrázek 44: Nanášení měrných sítí ..... - 52 -
Obrázek 45: Vzorky s měrnou sítí po zatěžování..... - 53 -
Obrázek 46: Zkušební stroj LabTest 5.100SP1 ..... - 54 -
Obrázek 47: Štítek zkušebního zařízení..... - 54 -
Obrázek 48: Uspořádání systému ARAMIS a stroje pro tahovou zkoušku ..... - 55 -
Obrázek 49: Vertikální uspořádání snímacího systému ARAMIS..... - 56 -
Obrázek 50: Kalibrační destička..... - 57 -
Obrázek 51: Kalibrované měrky s kameny..... - 57 -
Obrázek 52: Vzorek upnutý mezi čelisti zařízení pro tahovou zkoušku ..... - 58 -
Obrázek 53: Uspořádání měřícího systému ARAMIS a zařízení pro tahovou zkoušku .... - 59 -
Obrázek 54: Vyhodnocení kvality stochastické měrné sítě a určení fazet ..... - 60 -
Obrázek 55: Pracoviště vyhodnocování naměřených dat..... - 61 -
Obrázek 56: Všechny vzorky po provedení tahové zkoušky..... - 61 -
Obrázek 57: Zobrazení metody řezů na zkušebním vzorku ..... - 62 -
Obrázek 58: Příklad snímku pro vyhodnocování deformací ..... - 62 -
Obrázek 59: Jeden ze snímků pro následné vyhodnocování ..... - 63 -
Obrázek 60: Vyhodnocování v softwaru systému ARGUS..... - 64 -
Obrázek 61: FLC křivka pro 0° z průměrných hodnot po korekci..... - 65 -
Obrázek 62: FLC křivka pro 90° z průměrných hodnot po korekci..... - 66 -

Obrázek 63: FLC křivka pro 0° z průměrných hodnot po korekci ..... - 66 -
Obrázek 64: FLC křivka pro 90° z průměrných hodnot po korekci ..... - 67 -
Obrázek 65: Porovnání křivek mezní tvářitelnosti pro směr válcování 90° ..... - 68 -
Obrázek 66: Porovnání křivek mezní tvářitelnosti pro směr válcování 0° ..... - 69 -
Obrázek 67: Porovnání křivek mezní tvářitelnosti pro rychlost zatěžování 10 mm/min ... . - 69 -
Obrázek 68: Porovnání křivek mezní tvářitelnosti pro rychlost zatěžování 100 mm/min . ..... - 69 -
Obrázek 69: Výsledek měření ze systému ARGUS pro rychlost zatěžování 10 mm/min a směr 90° ..... - 70 -
Obrázek 70: Výsledek měření ze systému ARGUS pro rychlost zatěžování 10 mm/min a směr 0° ..... - 71 -
Obrázek 71: Výsledek měření ze systému ARGUS pro rychlost zatěžování 100 mm/min a směr 90° ..... - 71 -
Obrázek 72: Výsledek měření ze systému ARGUS pro rychlost zatěžování 100 mm/min a směr 0° ..... - 71 -
Obrázek 73: Porovnání FLC u tahové zkoušky a Nakajima testu ..... - 72 -

Seznam tabulek

Tabulka 1: Parametry tvářecích strojů ..... - 17 -
Tabulka 2: Vybrané hodnoty snímkovacích frekvencí a rozlišení pro jednotlivé konfigurace ..... - 43 -
Tabulka 3: Chemické složení použitého materiálu ..... - 46 -
Tabulka 4: Mechanické vlastnosti materiálu DX75D ..... - 47 -
Tabulka 5: Vybraná technická data stroje pro tahovou zkoušku ..... - 54 -
Tabulka 6: Naměřené hodnoty pro směr 0° ..... - 65 -
Tabulka 7: Naměřené hodnoty pro směr 90° ..... - 65 -
Tabulka 8: Naměřené hodnoty pro směr 0° ..... - 66 -
Tabulka 9: Naměřené hodnoty pro směr 90° ..... - 67 -

Příloha 1 – Tvar zkušebních vzorků



Příloha 1 Geometrie vzorků R5 až R40