

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2020

**ONDŘEJ
HÁK**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hák** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **459852**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vliv rychlosti deformace na polohu FLC křivky

Název diplomové práce anglicky:

The effect of strain rate on position of forming limit curve

Pokyny pro vypracování:

- 1) Úvod a seznámení s problematikou
- 2) Popis realizovaného experimentu, stanovení výchozích podmínek
- 3) Sledování vlivu rychlosti deformace na tvářitelnost pro materiál DX57D
- 4) Porovnání dosažených výsledků měření s numerickou simulací v programu Autoform
- 5) 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
Další literatura na doporučení vedoucího práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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


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


Ing. Vít Novák, ústav strojírenské technologie FS


Datum zadání diplomové práce: **29.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2020**


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


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


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana/ky

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Vliv rychlosti deformace na polohu FLC křivky“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Františka Tatička, Ph.D. a s použitím literatury uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze dne

Ondřej Hák

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Františku Tatičkovi, Ph.D. za odborný dohled, konzultace, vedení a čas, který mi věnoval, a které mi značně pomohly k vypracování této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Vítu Novákovi za cenné rady a pomoc při realizaci experimentu.

Anotace

Škola: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní
Ústav: Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
Název práce: Vliv rychlosti deformace na polohu FLC křivky
Akademický rok: 2019/2020
Autor: Bc. Ondřej Hák
Vedoucí práce: Ing. František Tatiček, Ph.D.
Konzultant: Ing. Vít Novák

Bibliografické údaje:	Počet stran	65
	Počet obrázků	44
	Počet tabulek	8

Klíčová slova: Tvářitelnost, diagram mezních deformací, křivka mezních deformací, zkouška podle Nakajimy, systém ARAMIS

Abstrakt: Diplomová práce se zabývá vlivem rychlosti deformace na zásobu plasticity materiálů. Teoretická část pojednává o tváření se zaměřením na hodnocení tvářitelnosti pomocí FLD diagramů, které jsou nezbytné pro návrh lisovacích operací, a to zejména v automobilovém průmyslu. Cílem experimentální části je zjistit, jaký vliv má změna rychlosti deformace na polohu FLC křivky, hraniční křivky FLD diagramu. Dále je zkoumáno, zda výsledky experimentu odpovídají numerické simulaci.

Annotation

University: Czech technical university in Prague,
Faculty of Mechanical Engineering

Department: Department of Manufacturing Technology

Head of the department: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.

Title: The effect of strain rate on position of forming limit curve

Academic year: 2019/2020

Author: Bc. Ondřej Hák

Supervisor: Ing. František Tatíček, Ph.D.

Consultant: Ing. Vít Novák

Bibliographic data: Number of pages 65

 Number of pictures 44

 Number of tables 8

Keywords: Formability, Forming Limit Diagram, Forming Limit Curve,
Nakajima test, ARAMIS system

Abstract: The diploma thesis deals with the influence of the strain rate on the plasticity of materials. The theoretical part describes forming with focus a on the evaluation of formability using Forming Limit Diagrams, which are necessary for the design of press operations, especially in the automotive industry. The goal of the experimental part is to find out what effect the change of strain rate has on the position of the FLC, the limit curve of the FLD. It is further investigated whether the results of the experiment correspond to the numerical simulation.

Obsah

1	Úvod	10
2	Problematika tváritelnosti materiálů	11
2.1	Princip plastické deformace	12
2.2	Tváritelnost	14
2.2.1	Fyzikálně-metalurgický charakter oceli	15
2.2.2	Termomechaničtí činitelé	15
2.2.3	Stav napjatosti	17
2.2.4	Technologické podmínky zpracování	17
2.3	Hluboké tažení	17
2.4	Diagram mezních deformací	19
2.4.1	Zkouška podle Nakajimy	20
2.5	DIC (Digital Image Correlation)	23
2.5.1	2D DIC	23
2.5.2	3D DIC	26
2.6	Sytém ARAMIS	26
2.7	Oceli pro stavbu karoserie	28
2.7.1	Nízkopevnostní oceli	29
2.7.2	Vysokopevnostní oceli	29
2.7.3	Pokročilé vysokopevnostní oceli	30
2.8	Numerické simulace plošného tváření	32
2.8.1	AutoForm	33
3	Návrh experimentu	34
3.1	Zkušební zařízení	34
3.2	Zkoušený materiál	37
3.3	Zkušební vzorky	37
3.4	Parametry zkoušky	40



3.5	Kalibrace.....	41
4	Postup měření.....	42
5	Vyhodnocení experimentu.....	46
6	Vliv rychlosti deformace na výsledek numerické simulace	50
7	Závěr.....	54
	Literatura.....	56
	Seznam obrázků	62
	Seznam tabulek	64
	Seznam příloh	65

Seznam použitých zkratek a symbolů

Značka	Jednotka	Veličina
F	N	zatěžující síla
n	-	exponent deformačního zpevnění
p	MPa	měrný tlak
$\varphi_1 (\varepsilon_1)$	-	hlavní deformace
$\varphi_2 (\varepsilon_2)$	-	vedlejší deformace
\bar{r}	-	plastická anizotropie
R_m	MPa	mez pevnosti
$R_{p0,2}$	MPa	smluvní mez kluzu
A	%	tažnost
r	-	normálové anizotropie
μ	-	koeficient tření
FLC		Forming Limit Curves
FLD		Forming Limit Diagram
DIC		Digital Image Correlation
LSS		Low Strength Steels (nizkopevnostní oceli)
HSS		High Strength Steels (vysokopevnostní oceli)
IF		Interstitial Free (oceli bez intersticií)
IF-HS		Interstitial Free - High Strength (vysokopevné oceli bez intersticií)
BH		Bake Hardened (oceli vytvrditelné při vypalování laku)
CMn		Carbon – Manganese Steels (uhlík- manganové oceli)
HSLA		High-Strength Low-Alloy Steel (vysokopevnostní mikrolegované oceli)
AHSS		Advanced High-Strength Steels (pokročilé vysokopevnostní oceli)
DP		Dual Phase (dvojfázové oceli)
CP		Complex Phase (vícefázové oceli)
TRIP		Transformation Induced Plasticity (Transformačně indukovaná ocel)
TWIP oceli		Twinning Induced Plasticity (oceli s plasticitou indukovanou dvojčatěním)
MS		Martensitic Steel (martenzitické oceli)
HF		Hot Formed Steels (vysokopevnostní, za tepla tvářené oceli)
PHS		Press Hardened Steel (vysokopevnostní, za tepla tvářené oceli)
PTFE		Polytetrafluorethylen (teflon)

1 Úvod

V oblasti tváření plechů jsou stále větší požadavky na rychlost výroby dílů při zachování dostatečné kvality výrobků. Toto odvětví výrobní technologie tváření je ve velké míře zastoupeno automobilovým průmyslem při lisování karosářských plechů. Snahou výrobců je zhotovit plechové díly, které jsou dostatečně pevné a tuhé kvůli bezpečnosti, ale také lehké kvůli snížení emisí vyprodukovaných vozidlem. Z výrobních linek v dnešní době každý den sjíždí tisíce automobilů a proto je potřeba dosáhnout co nejrychlejší výroby, která se týká i lisoven. Zároveň jsou na dílech zhotovovány ostré hrany a další designové prvky pro atraktivnější vzhled. Je tak vyžadováno, aby byly materiály schopny dosáhnout vysokých deformací, aniž by došlo k jejich porušení.

K hodnocení tvářitelnosti plechů se používají mimo jiné diagramy mezních deformací neboli FLD diagramy, které určují zásobu plasticity materiálu pomocí FLC křivek. Jelikož příprava fyzických prototypů je nákladná a časově náročná, využívají se v dnešní době namísto toho softwary pro simulace lisování plechů, které značně pomáhají výrobcům při navrhování nových produktů. FLD diagramy slouží k definování materiálových vlastností právě v numerických simulacích. Nicméně FLC křivky se získávají při podmínkách definovaných normou, které se mnohdy výrazně liší od reálných pracovních podmínek, kam spadá například rychlost nástroje. Cílem této práce je stanovit vliv deformační rychlosti na polohu FLC křivek a zjistit, zda získané výsledky odpovídají chování materiálu v numerických simulacích. Pokud by výsledky simulace neodpovídaly experimentu, znamenalo by to vnesení nepřesností při simulaci lisovacích operací.

V teoretické části se budu zabývat principem tváření a podstatou tvářitelnosti včetně faktorů, které ji ovlivňují. Dále se budu zabývat FLD diagramy a metodou jejich stanovení. Vzhledem k orientaci na automobilový průmysl se budu stručně zabývat také ocelmi používanými pro výrobu karosářských plechů. Závěr teoretické části pak bude patřit numerickým simulacím.

Praktická část bude věnována experimentu sloužícímu ke zjištění vlivu rychlosti deformace na FLC křivku, konkrétně jeho návrhem, provedením a vyhodnocením. Poté se zaměřím na chování materiálu v numerické simulaci. Na závěr získané poznatky shrnu a zhodnotím.

2 Problematika tvářitelnosti materiálů

Tváření je technologický proces, při kterém dochází k požadované změně tvaru výrobku nebo polotovaru, případně jeho vlastností, v důsledku působení vnějších sil bez odběru třísek. Vzniká výrobek s přesně definovaným tvarem, rozměry, přesností a tolerancemi, vzhledem a vlastnostmi. Výhodami tváření jsou vysoká produktivita práce, vysoké využití materiálu a také velmi dobrá rozměrová přesnost tvářených výrobků. Nevýhodou je především vysoká cena strojů a nástrojů a dále omezení v rozměrech konečného výrobku. Tvářená součást má proti lité nebo obrobené součásti o dané hmotnosti lepší vlastnosti a vyšší spolehlivost. [1]; [2]

Proces je realizován plastickou deformací, která je vyvolána vnějšími účinky. Za tyto účinky jsou považovány vnější síly a teplota. Vnější síly působící na těleso mají snahu vyvést jeho elementy ze stavu rovnováhy-deformovat je. Zprostředkovaně jsou materiálu předávány v kontaktu nástroj-materiál, bezprostředně na částice působí objemové síly, například setrvačné síly při tváření vysokými rychlostmi. Z hlediska účinku se vnější síly dělí na aktivní a pasivní. Mezi pasivní síly patří tření, i to má však aktivní účinek na průběh plastické deformace. Účinek vnějších sil vyvolá v materiálu reakci v podobě sil vnitřních, kterými na sebe částice vzájemně působí. Zóna vzájemného působení částic nepřevyšuje rozměr atomů a molekul tělesa. [1]; [2]

Mezi proměnné, které vstupují do tvářecího procesu, se řadí polotovar, nástroje, podmínky kontaktu materiál-nástroj, zařízení, geometrie a vlastnosti konečného výrobku, prostředí a deformační zóna. Mezi charakteristiky deformační zóny spadá například tok materiálu, napětí či teplota. [1]

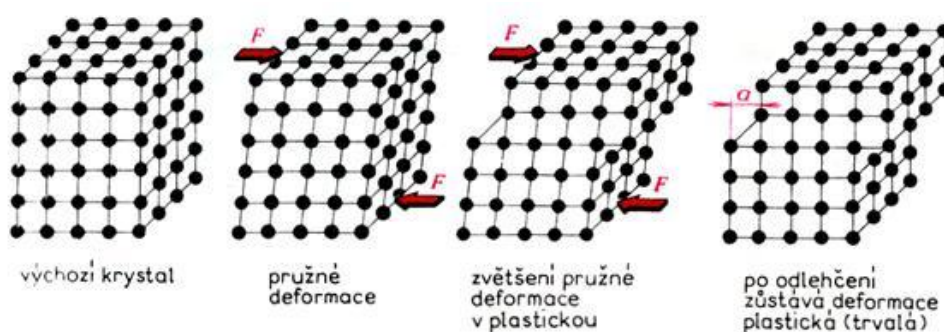
Tvářecí procesy lze rozdělit dle různých kritérií. Jedním z nejčastějších způsobů je rozdělení podle teploty, což je v podstatě rozdělení podle vztahu teploty tvářeného materiálu k teplotě rekystalizace (přibližně 0,4 teploty tání kovu v Kelvinech). Při *tváření za studena* je teplota tváření pod hodnotou 30% teploty tání materiálu a dochází ke zpevnování materiálu (růst odporu proti dalšímu tváření). Zrna se deformují ve směru tváření a dochází k anizotropii mechanických vlastností. *Tváření za tepla* probíhá nad rekystalizační teplotou, a to nad hodnotou 70% teploty tání materiálu. Z důvodu rekystalizace nedochází ke zpevnění a jsou tak potřeba mnohem menší síly, nicméně vzniká nekvalitní povrch vlivem okujení a dochází ke zhrubnutí zrna. Kompromisem je pak *tváření za poloohřevu*. [1]; [2]

Další základní rozdělení je podle působení vnějších sil. Z tohoto hlediska se tváření kovů dělí na *objemové tváření*, při kterém deformace nastává ve směru všech tří os souřadného systému, a *plošné tváření*, kde převládají deformace ve dvou směrech. Mezi technologie plošného tváření spadají základní lisovací operace jako tažení, ohýbání a stříhání. [1]; [2]

2.1 Princip plastické deformace

Kovy jsou krystalické materiály. Stavba krystalové mřížky není v reálných kovech dokonalá a vyznačuje se několika druhy mřížkových poruch. Ty mohou být bodové, v takovém případě se jedná o vakance, intersticie a substituce, dále existují poruchy čárové, mezi které patří hranové, šroubové a kombinované dislokace. Třetím typem jsou plošné poruchy, jako vrstevné vady, hranice zrn, subzrn a dvojčatění. Posledním druhem jsou prostorové poruchy, jedná se například o hranice krystalů, vměstky a podobně. [2]; [3]

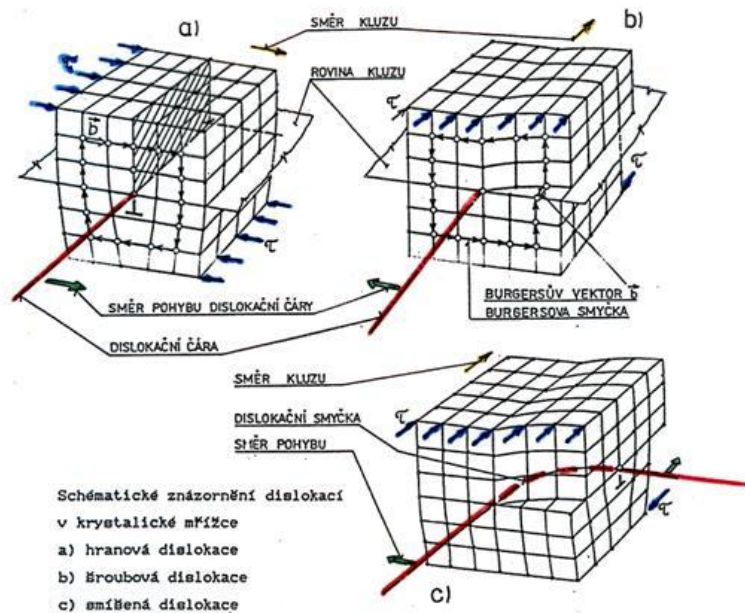
Změna tvaru mřížky, která se navenek projevuje změnou tvaru bez vzniku trhlin, se nazývá deformace. Tu lze rozdělit na *pružnou* (elastickou), kdy se materiál po odlehčení vrátí do původního stavu, a na *plastickou*, kdy změna tvaru zůstává i po odstranění příčiny deformace. Děje se tak, pokud napětí vzroste nad určitou hodnotu, která je označována jako mez kluzu. Z hlediska tváření má největší význam plastická deformace, nicméně i vliv elastické deformace má vliv na konečný tvar výrobku. Při vzniku trhlin a následné destrukci tělesa se hovoří o *porušení*. [2]; [3]



Obr. 2-1 Schéma pružné (elastické) a trvalé (plastické) deformace [2]

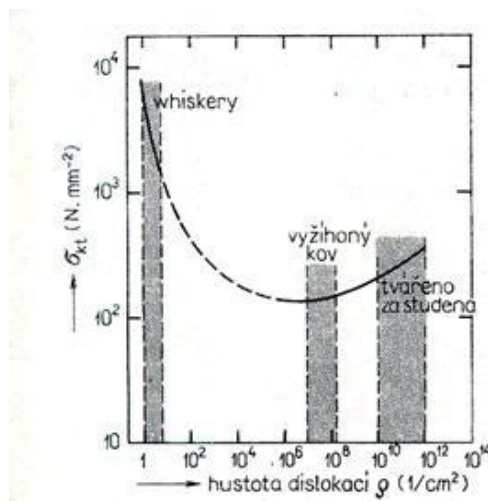
Plastická deformace je v podstatě pohyb jednotlivých částíček kovu vůči sobě. Mechanismus plastické deformace je možné vysvětlit na základě pohybu a vzniku mřížkových poruch. Z hlediska plastického přetvoření mají největší vliv čárové

poruchy, tedy dislokace. Ty se projevují vysunutím atomů z pravidelných poloh krystalové mřížky. Mohou se pohybovat, vznikat a zanikat. [2]



Obr. 2-2 Rozdělení dislokací [2]

Hustota dislokací, což je celková délka dislokačních čar obsažených v jednotce objemu, ovlivňuje pevnost kovu. Tvářením se počet dislokací zvyšuje, a tím i odpor proti deformaci, čímž dochází ke zpevnění materiálu. [2]



Obr. 2-3 Vliv hustoty dislokací na pevnost materiálu [2]

Existují dva základní druhy plastické deformace, a to skluz a dvojčatění. Vždy se rozvíjí ten mechanismus, který při daných podmínkách vyžaduje nejmenší napětí.

Velikost deformace závisí na teplotě, rychlosti zatěžování, napjatosti, chemickém složení, zpevnění, tření a dalších vlivech. Navenek se tyto vlivy projevují odporem kovu ke změně tvaru neboli deformačním odporem. U skluzu se nadbytečná vrstva atomů pohybuje ve směru působícího napětí až vystoupí na povrch, nebo se zachytí o překážky uvnitř krystalu. Atomy se tedy posunují proti sobě postupně, nikoliv současně. Jestliže se pohyb dislokací zastaví, je potřeba k vyvolání další plastické deformace napětí zvýšit. Při tváření za studena kov klade stále větší odpor, dochází ke zpevňování. Přesuny atomů vážnou a plasticita kovu se vyčerpává, což může mít za následek porušení materiálu. Dojde-li k dvojčatění, přeskupuje se část krystalu tak, že se celá mřížka nejdříve natočí do příznivé polohy pro skluz a následně se část natočeného krystalu skluzem deformuje. [2]

2.2 Tvářitelnost

Tvářitelnost, neboli plasticita, je vlastnost materiálu nevratně se tvářet bez makroskopického porušení, tedy schopnost materiálu podstoupit plastickou deformaci. Říká nám, jak moc lze materiál tvářet při splnění kvalitativních požadavků. Technologická tvářitelnost je pak schopnost materiálu tvářet se bez makroskopického porušení v konkrétním tvářecím procesu. [1]; [4]

Tvářitelnost za studena se nejčastěji zkoumá zkouškou tahem při pokojové teplotě. Z ní lze stanovit exponent deformačního zpevnění n , který je definován jako exponent skutečné plastické deformace v rovnici vztahující skutečné napětí ke skutečné plastické deformaci při aplikaci jednoosého zatížení. Platí, že čím vyšší exponent zpevnění je, tím má materiál lepší plastické vlastnosti. Z hlediska jeho hodnoty rozlišujeme materiály se *špatnou tvářitelností* (do hodnoty 0,215), *dobrou tvářitelností* (mezi 0,215 a 0,25) a *výbornou tvářitelností* (větší než 0,25). Zásadní vliv na exponent deformačního zpevnění má druh krystalické mřížky. Nejhorší tvářitelnost má hexagonální mřížka, jejíž hodnoty n se pohybují okolo 0,01. U krychlové prostorově středěné je to 0,2 a nejlépe na tom je krychlová plošně středěná mřížka s exponentem deformačního zpevnění dosahujícího 0,4. [6]; [7]; [8]

Na tvářitelnosti se podílí mnoho faktorů. Ty lze rozdělit do čtyř základních skupin. Jedná se o fyzikálně-metalurgický charakter oceli, termomechanické činitele, napěťový stav a technologické podmínky zpracování. [5]

2.2.1 Fyzikálně-metalurgický charakter oceli

Do této kategorie se řadí vlastnosti a procesy související s materiálovou stránkou tváření. Vše v této oblasti závisí na chemickém složení materiálu. Složení oceli je dáno postupy výroby v ocelárně a závisí na složení vsázky a způsobu vedení tavby, případně i na metodách sekundární metalurgie. [5]

Každá ocel obsahuje základní prvky (Fe, C, Mn, Si), nečistoty (P,S), plyny (O, N, H) a stopové prvky (např. Cu, Sn, As), mnohé z nich obsahují navíc také legující a speciální prvky (např. Cr, Ni, Mo, Si, W, Nb, V, Ti, Zr, B). Je však třeba pamatovat na to, že v různých ocelích mohou některé prvky vystupovat v různých rolích. [5]

Strukturní stav oceli je ovlivňován chemickým složením, způsobem výroby a odlévání oceli, režimem tváření a ochlazování. Je určen hlavně počtem strukturních složek, jejich vlastnostmi a způsobem výskytu, a dále charakterem zrn (velikost, tvar, orientace, čistota hranic zrn). [5]

Tepečně aktivované děje závisí na difuzních schopnostech materiálu, které jsou dány chemickým složením, strukturním stavem a velmi výrazně závisí také na teplotě. Patří sem především procesy spojené se zpevňováním a uzdravováním deformovaného materiálu (rekrytalizace), dále růst zrn při ohřevu, průběh fázových přeměn a precipitace (vylučování jemných částic karbidů a nitridů z přesyceného tuhého roztoku). [5]

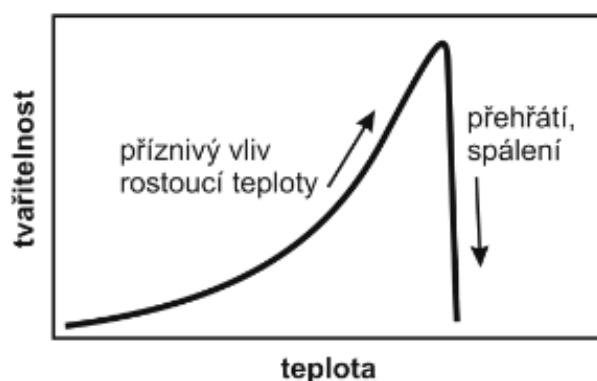
2.2.2 Termomechaničtí činitelé

Jedná se o činitele, které již plně ovládá a využívá valcář, kovář apod. Klíčovou roli hraje teplota, zejména interval tvářecích teplot daného materiálu, dále deformační rychlost a deformační historie. [5]

Teplota

Obecně platí, že se zvyšující se teplotou klesají deformační odpory a zlepšuje se tvářitelnost materiálu. Roste totiž pohyblivost atomů a dislokací, dále se zrychluje difuze a tím i uzdravování. Mnoho materiálu má špatnou tvářitelnost za nízkých teplot, ale s rostoucí teplotou se tvářitelnost zlepšuje. Materiál však nelze nahřívat libovolně, jelikož po překročení určitých teplot dochází k prudkému poklesu tvářitelnosti vlivem dvou možných jevů, *přehřátí* a *spálení*. [1]; [5]

Přehřátí materiálu znamená abnormální zhrubnutí zrna, které způsobuje náchylnost k interkrytalickému lomu. Tento jev se ještě dá napravit opatrným tvářením za tepla. Pokud však dojde k dalšímu zvýšení teploty, může dojít ke spálení, kdy dojde k natažení hranic zrn. Taková ocel má nulovou plasticitu, a proto může být jen přetavena. [1]; [5]



Obr. 2-4 Vliv teploty na tvářitelnost materiálů [5]

Deformační rychlost

Okamžitá deformační rychlost je derivace deformace podle času, zjednodušeně lze pak říci, že střední hodnota deformační rychlosti se vypočte jako podíl příslušné skutečné deformace a času, za nějž bylo této deformace dosaženo. Rychlost deformace tedy není totožná s rychlostí pracovního nástroje, existuje však vazba mezi rychlostí pohybu nástroje a deformací. S jejím zvýšením většinou tvářitelnost roste do jistého maxima a pak zase klesá. Pro různé materiály se optimální deformační rychlost liší. Kovové materiály většinou vykazují lepší plasticitu při relativně nižších rychlostech deformace, při větších rychlostech se pak tvářitelnost snižuje a materiál se může začít chovat křehce. Při vysokých rychlostech tvářením dále komplikuje situaci působení deformačního tepla. Vliv deformační rychlosti lze pozorovat převážně v lisovací operaci hlubokého tažení. [1]; [5]

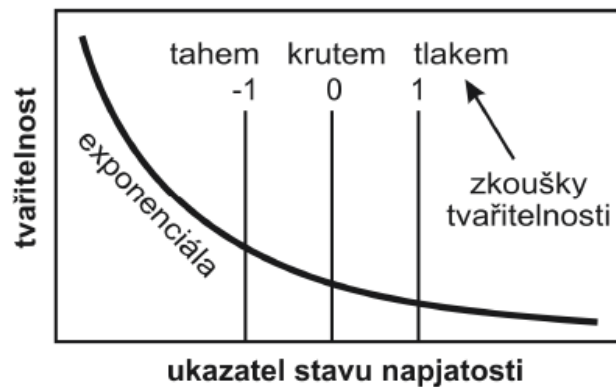
Deformační historie

V průmyslové praxi probíhá většinou tvářením opakovaním menších dílčích úběrů oddělenými časovými prodlevami, při nichž se deformačně zpevněný materiál uzdravuje a dochází k obnově jeho plastických vlastností. Optimální je, když dojde po každé dílčí operaci k rekrytalizaci. Zejména při tvářením za tepla záleží na tom, jestli je materiál tvářen jednou velkou deformací nebo několika dílčími úběry. Časová

posloupnost a velikost jednotlivých úběrů tvoří v kombinaci s teplotními parametry deformační historii. [5]

2.2.3 Stav napjatosti

Ukazatel stavu napjatosti vyjadřuje převahu tahových, respektive tlakových složek napětí ve tvářeném tělese. Obecně lze říci, že tahová napětí zvyšují pravděpodobnost křehkého interkrystalického lomu, tlaková napětí naopak přispívají k lepší soudržnosti materiálu. Plastické vlastnosti materiálu tak lze zlepšit vhodně zvoleným tvářecím postupem, který vyvolá příznivý stav napjatosti s převažujícími tlakovými složkami napětí. [5]



Obr. 2-5 Kolmogorovův diagram [5]

2.2.4 Technologické podmínky zpracování

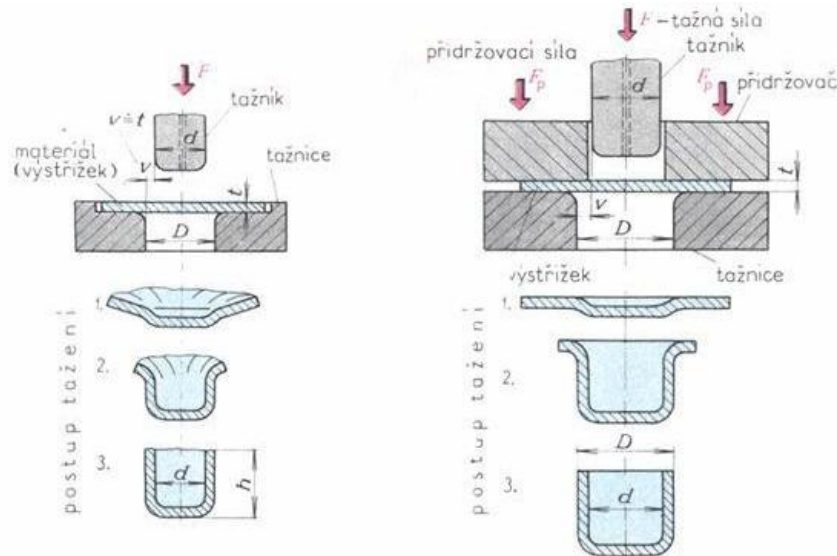
Do této kategorie spadají vlivy vznikající při použití dané technologie. Závisí tedy i na zvolených strojích a nástrojích. Patří sem například tření na stykové ploše, nerovnoměrnost deformace, geometrie tvářecího procesu či způsob deformace. [8]

2.3 Hluboké tažení

Tažení je technologický způsob tváření, při kterém se jedním nebo několika tahy vyrobí z rovného plechu (přístřihu) duté těleso-polouzavřená nádoba. Převážně se tato technologie používá při výrobě karosářských plechů v automobilovém průmyslu. Při tažení dochází ke změně tvaru působením tažníku přes tažnou hranu tažnice, přičemž se výrazně nemění výchozí tloušťka materiálu. [3]; [9]; [10]

Při tažení dochází k přesouvání značného objemu materiálu. Jelikož materiál postupuje z příruby do válcové části, může dojít ke ztrátě stability, která se může projevit například zvlněním či porušením plechu, a to hlavně při vysokém stupni

deformace. Zabránit vzniku vln lze přidržovačem. V případě jeho použití je nutné znát velikost měrného tlaku p přidržovače, který závisí na tloušťce plechu, poměru výchozí tloušťky plechu ku průměru nádoby, jakosti plechu a součiniteli tažení. K určení měrného tlaku se využívá například grafů či numerických simulací. Optimální síla přidržovače by měla eliminovat tvorbu vln, zároveň však nesní dojit k utržení dna. [3]; [9]; [10]

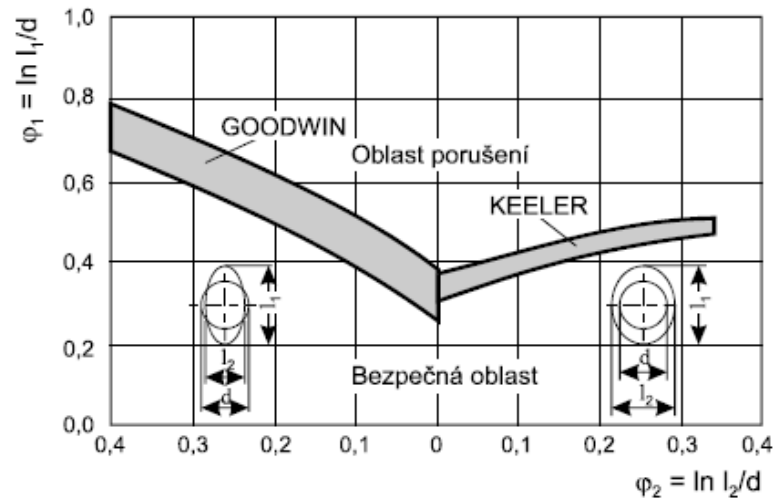


Obr. 2-6 Tažení bez přidržovače (vlevo) a s přidržovačem (vpravo) [9]

Při návrhu technologie tažení je potřeba vycházet z toho, že tažná síla musí být o něco menší než síla, která způsobí utržení dna. Dovolené napětí tedy musí být menší než napětí na mezi kluzu. Dále je zapotřebí se zabývat tažnou mezerou, tedy mezerou mezi tažníkem a tažnicí. Ta se volí větší než tloušťka plechu pro kompenzaci zesílení plechu při tažení a rozměrových tolerancí, a také aby umožnila průchod materiálu mezerou s přijatelným třením. Pohybuje se v hodnotách 1,05 - 1,5 základní tloušťky plechu. Důležitá je také problematika tření, jelikož velikost třecích sil mezi materiálem a nástroji ovlivňuje celkovou tažnou sílu. Velikost tření je komplexní funkcí obou kontaktních materiálů, makro a mikrogeometrie kontaktní plochy, kvality maziva, relativní rychlosti kluzných ploch a tlaku maziva. [3]; [9]; [10]

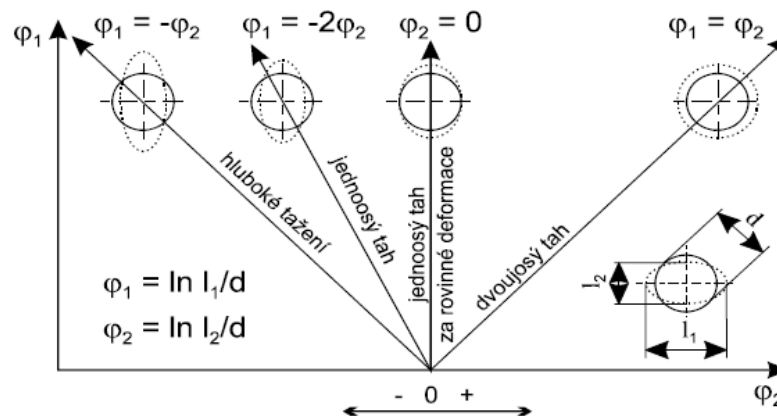
2.4 Diagram mezních deformací

Pro zjišťování zásoby plasticity a tím i limitace při tváření plechů se často používá *Diagram mezních deformací* (FLD - Forming Limit Diagram). Hraniční křivkou FLD diagramu je *Křivka mezních deformací* (FLC - Forming Limit Curves), která rozděluje bezpečnou oblast a oblast porušení. [11]; [14]



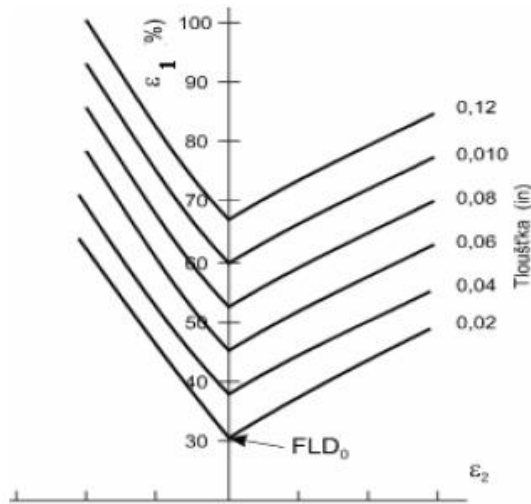
Obr. 2-7 KEELER-GOODWINův diagram ve skutečných deformacích [13]

FLD diagram obsahuje informaci o hlavních a vedlejších deformacích na povrchu výlisku. Křivku mezních deformací je možné využít pro posouzení tvářitelnosti materiálu na základě deformací na výlisku či pro posouzení tvářitelnosti materiálu na základě výsledků numerické simulace. Pokud se v některém místě výlisku stav deformace přibližuje nebo převyšuje FLC křivku, je potřeba proces tváření optimalizovat. Zlepšení stavu lze dosáhnout například změnou geometrie nástrojů, změnou tlaku přidržovače, zlepšením podmínek tření či změnou materiálu. [11]; [12]; [14]; [15]

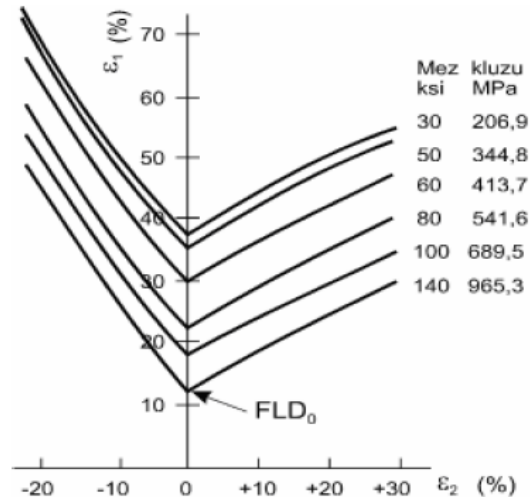


Obr. 2-8 Typické deformační stopy při plošném tváření [13]

Mezi faktory ovlivňující polohu FLC křivky patří zejména tloušťka materiálu, exponent deformačního zpevnění n , anizotropie materiálu \bar{r} a mez kluzu. Čím je tloušťka plechu a n větší, tím je křivka postavena výš. Opačný efekt má mez kluzu, kdy s jejím nárůstem dochází ke zmenšení bezpečné oblasti. Anizotropie materiálu, tedy nestejnosemnost vlastností v různých směrech souřadného systému, má vliv především v levé části diagramu. [13]



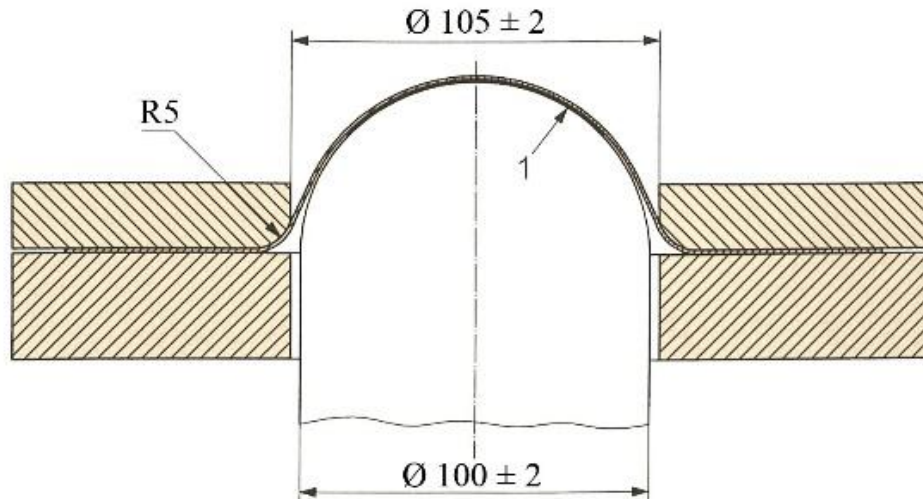
Obr. 2-9 Závislost polohy FLC na tloušťce materiálu [13]



Obr. 2-10 Závislost polohy FLC na mezi kluzu [13]

2.4.1 Zkouška podle Nakajimy

Podmínky stanovení FLC křivek definuje norma ČSN EN ISO 12004-2. Nejpoužívanější metodou je zkouška dle Nakajimy, která je založena na principu deformování zkušebních vzorků různých geometrií do vzniku trhliny za použití polokulového tažníku o průměru 100 ± 2 mm. Mezi tažníkem a zkušebním vzorkem musí být tribologický systém pro minimalizaci tření. Ten je zapotřebí nastavit tak, aby ke vzniku trhliny došlo ve vzdálenosti nedosahující 15 % průměru tažníku od vrcholu zkušební vzorku, jinak zkouška není platná. Tribologický systém se nesmí během měření jedné specifické FLC křivky měnit. [11]; [16]; [17]



Obr. 2-11 Schéma zkoušky Nakajima [18]

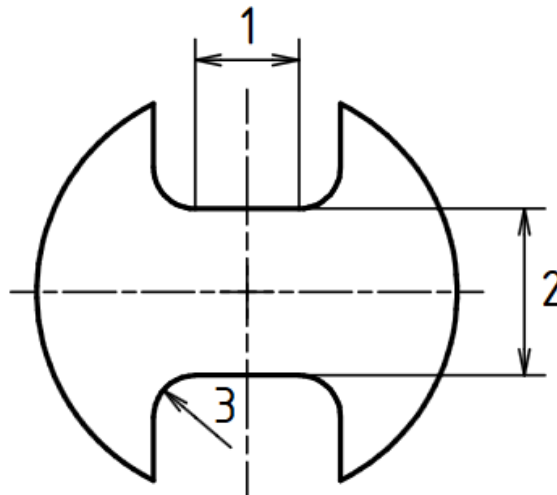
Pro malá zatížení tažníku je doporučený systém maziv uspořádan takto:

1. olej nebo mazivo
2. kruhové výstřižky z polyethylenové nebo polytetrafluorethylenové fólie
3. olej nebo mazivo

Pro velká zatížení tažníku, tedy tlustší plechy a materiály s vyšší pevností, se používá jednoduchý systém, který je stejný jako v předchozím případě, avšak místo polytetrafluorethylenu se používá měkké PVC. Dále lze použít složený systém, který se skládá z vrstev všech výše uvedených mazacích prostředků. Mohou být použity i alternativní systémy mazání založené na osobní praxi a zkušenostech. [16]

Zkušební tělesa

Norma ČSN EN ISO 12004-2 definuje geometrii a způsob přípravy zkušebního tělesa. Měření je určeno pro rovinné kovové plechy o tloušťce mezi 0,3 mm a 4 mm. Doporučuje se používat vzorky se středovým rovnoběžným dříkem delším než 25 % průměru tažníku. Pro 100 mm tažník to znamená přednostní délku dříku 25 mm až 50 mm a poloměr zaoblení 20 mm až 30 mm. [16]

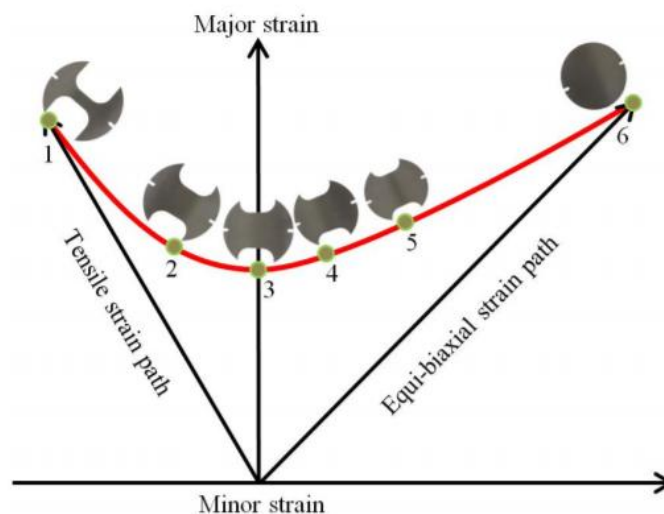


Obr. 2-12 Geometrie zkušebního tělesa

1 - délka dříku, 2 - zbývající šířka výstřižku, 3 - poloměr zaoblení = $R = 20 \text{ mm}$ až 30 mm

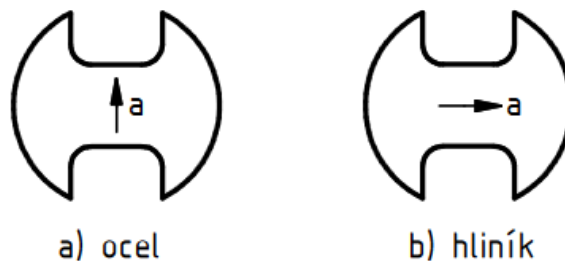
Zkušební těleso se musí připravit tak, aby se zajistilo, že lom nebude nikdy iniciován hranami zkušebních těles. Lze použít frézování, jiskrové obrábění nebo jiné metody, které nevyvolají trhliny, zpevňování či změny mikrostruktury. [16]

K získání kompletní křivky mezní tvářitelnosti je zapotřebí nejméně pět geometrií zkušebního tělesa. Je doporučeno rovnoměrné rozmístění křivky mezní tvářitelnosti od jednoosého do dvojosého stavu shodné tahové deformace. Pro každou geometrii je pak potřeba tolik zkušebních těles, aby se dosáhlo nejméně tří platných měření (vzorků, u kterých došlo k lomu ve vzdálenosti nedosahující 15 % průměru tažníku od vrcholu zkušební vzorku). [16]



Obr. 2-13 Geometrie zkušebních vzorků odpovídající určité deformaci [19]

Důležitým faktorem je také směr dřívku ve vztahu ke směru válcování plechu.. Pro hliník se používá dřívok rovnoběžný se směrem válcování, u oceli se ve většině případů používá dřívok kolmý ke směru válcování. [16]



Obr. 2-14 Orientace dřívku ke směru válcování
a-směr válcování

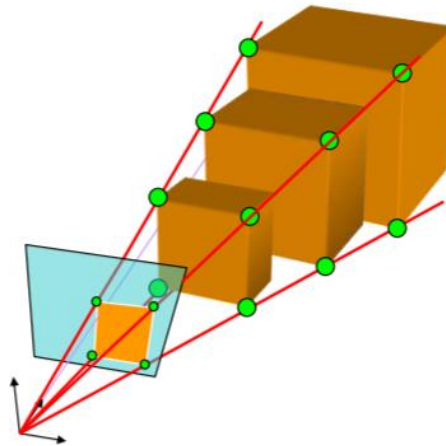
2.5 DIC (Digital Image Correlation)

DIC neboli Digitální korelace obrazu, je metoda analýzy obrazu v zorném poli založená na posuvu jednotlivých bodů a jejich deformací na sledovaném povrchu. Pomocí této bezkontaktní optické metody je možné nedestruktivně lokalizovat deformaci pod zatížením ve 2D i 3D zobrazení. Jedná se o velice flexibilní nástroj, který je vhodný pro širokou škálu aplikací. [20]; [21]; [22]

Metoda je založena na rozpoznání unikátního vzoru neboli *patternu*, aplikovaného na povrchu měřeného objektu. Tento pattern je identifikovatelný pomocí softwarových algoritmů. Snímky pořízené při měření jsou korelovány s referenčním obrazem a výsledkem je deformační mapa měřeného objektu. [20]; [21]; [22]

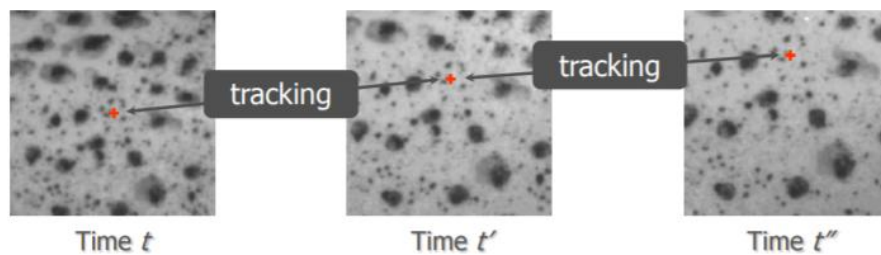
2.5.1 2D DIC

Dvourozměrná korelace je monokulární metoda, u které nelze určit velikost objektů. Důsledkem je, že 200% izotropní deformace objektu produkuje stejný snímek, jako by objekt byl přesunut do poloviční vzdálenosti od kamery. To znamená, že je nutné dodržet *planaritu* povrchu neboli jeho rovinnost, povrch musí být rovnoběžný k rovině snímání a během měření musí být zaručena konstantní vzdálenost senzoru od objektu. Metoda umožňuje široké spektrum velikosti měřených dílů (od 10^{-4} do 10^2 m) a rychlostí snímání (od statických dějů po 200 MHz). [20]; [21]; [22]



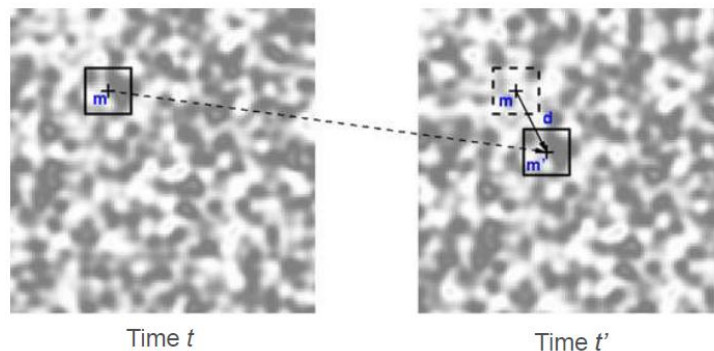
Obr. 2-15 Princip dvourozměrné korelace [23]

Principem metody je, že dojde k výběru počátečního bodu v původním snímku, který může být sledován v průběhu deformace nebo posuvu sledovaného povrchu. [22]; [23]



Obr. 2-16 Sledování zvoleného bodu [23]

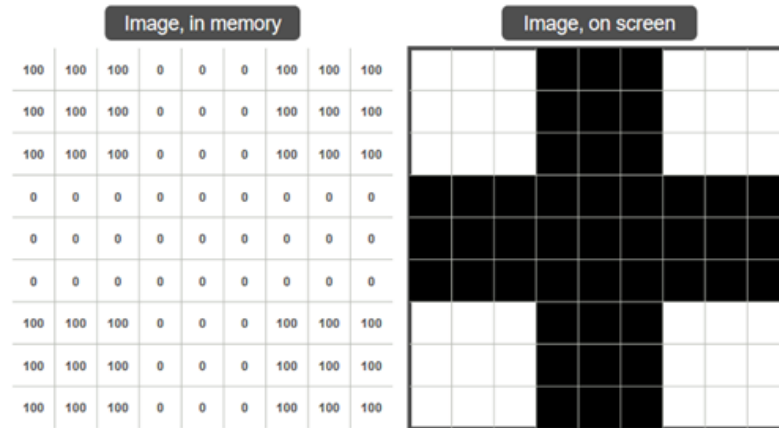
V praxi ovšem nemůže být sledován pouze jedinečný samostatný bod, ale jsou použity i sousedící pixely. Souhrn tohoto bodu s okolními pixely se nazývá *subset* nebo *fazeta*. [22]; [23]



Obr. 2-17 Posun subsetu [23]

Vyhodnocení probíhá na základě určování stupňů šedi, kdy bílá barva má stupeň šedi 100 a černá barva stupeň šedi 0 (viz Obr. 2-18). Systém se snaží nalézt místo, kam se subset posunul po deformaci. Řešením je výpočet možných shod v okolních oblastech

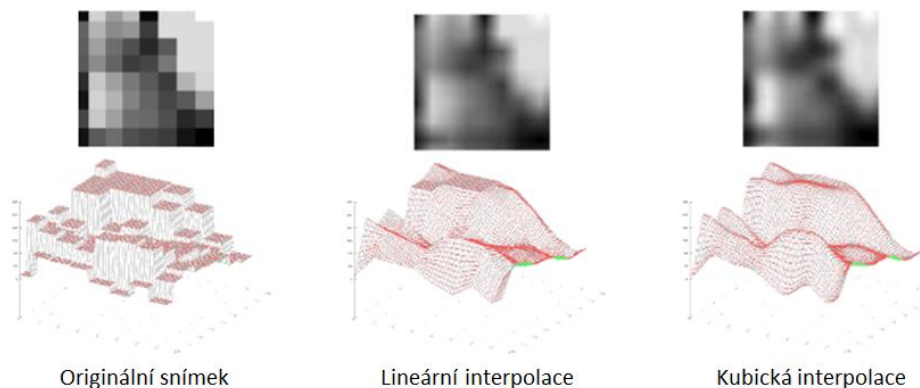
a použití korelační funkce k nalezení oblasti s největší podobností. Standardní korelační funkcí je suma čtverců rozdílů (SSD). Pro tuto funkci platí, že čím menší hodnoty, tím větší shoda. [22]; [23]



Obr. 2-18 Příklad vyhodnocení obrazce [23]

Ve skutečnosti jsou však snímky znehodnoceny šumem, což znamená, že pixely nebudou mít skoro nikdy hodnotu 0 pro černou barvu a hodnotu 100 pro bílou, ale budou mít různé odstíny. Hodnoty pixelů se proto budou pohybovat v rozmezí od 0 do 100. Během snímání může také dojít ke změně světelných podmínek a nástřik se stává světlejším nebo tmavším při roztažení či kompresi. Proto je nepravděpodobné, že by se hodnota SSD funkce rovnala 0 a shoda tak byla dokonalá. [22]; [23]

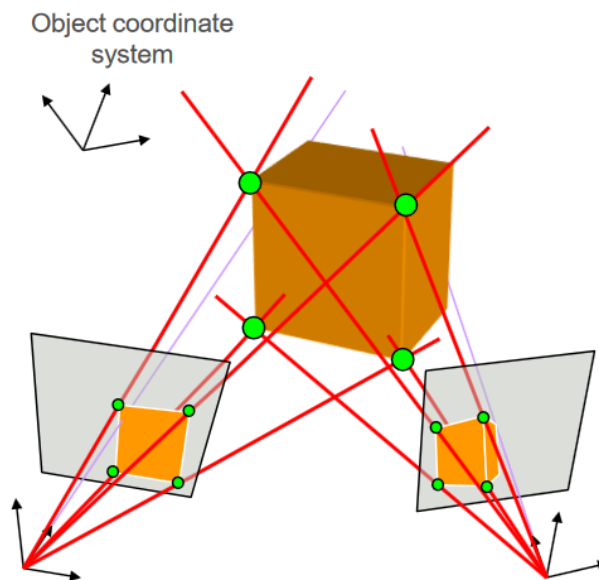
Optimalizační algoritmy vyžadují spojitost ve sledované oblasti, nicméně jednotlivé pixely jsou na sebe ve sledované oblasti navzájem nespojitě. Tuto spojitost je potřeba rekonstruovat pomocí interpolace.[22]; [23]



Obr. 2-19 Interpolace snímku [23]

2.5.2 3D DIC

Třírozměrnou korelaci lze použít na 3D povrch libovolného tvaru vykonávající jakýkoli pohyb. Podobně jako u lidského zraku, dva snímací senzory poskytují dostatek informací k vyhodnocení objektu ve třech dimenzích. Získání 3D struktury objektu pomocí dvou kamer se nazývá stereo-triangulace. Vzhledem k použití dvou kamer je nutná kalibrace, která zajistí, aby snímané body (pixely) měly odpovídající polohu ve 3D souřadnicovém systému. K tomu se používá kalibrační deska. Ta se nesmí v průběhu kalibrace deformovat a musí být známa relativní vzdálenost mezi referenčními body na desce. Vyhodnocování pak funguje na stejném principu jako u dvourozměrné korelace. [22]; [23]



Obr. 2-20 Princip třírozměrné korelace [23]

2.6 Systém ARAMIS

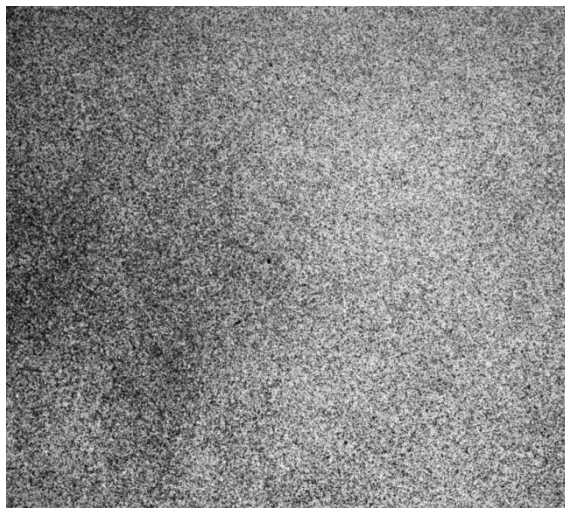
ARAMIS je bezkontaktní optický systém německé firmy GOM, který pracuje na principu digitální korelace obrazu (DIC). Umožňuje velmi přesné měření ve 3D nezávisle na materiálu a teplotě tělesa. Lze ho použít pro statické i dynamické děje a získat tak informace jako jsou 3D souřadnice, 3D posunutí, rychlost a zrychlení, deformace povrchu či vyhodnocení 6 stupňů volnosti. Získaná data pomáhají určit charakteristiku a vlastnosti zkoumaných materiálů. Tyto materiálové vlastnosti se pak používají v numerických simulacích.

Mezi materiálové vlastnosti, které lze pomocí systému ARAMIS získat, patří:

- FLC křivky
- Deformační křivky a z nich vyplývající údaje: R_m , $R_{p0,2}$, E , n ,
- Poissonova konstanta
- Koeficient normálové anizotropie
- Změna tloušťky

[24]; [25]; [26]

Při měření je vzorek v průběhu deformace snímán 2 CCD kamerami. Systém je založen na rozeznávání stupňů šedi a na sledovaný objekt je tedy potřeba před samotným měřením nanést černobílý nástřík, který se v průběhu zkoušky deformuje. Snímaný povrch musí být neopakující se (náhodný), izotropní a dostatečně kontrastní. Na tomto povrchu sleduje systém posuv a deformaci jednotlivých bodů. [11]; [23]; [26]

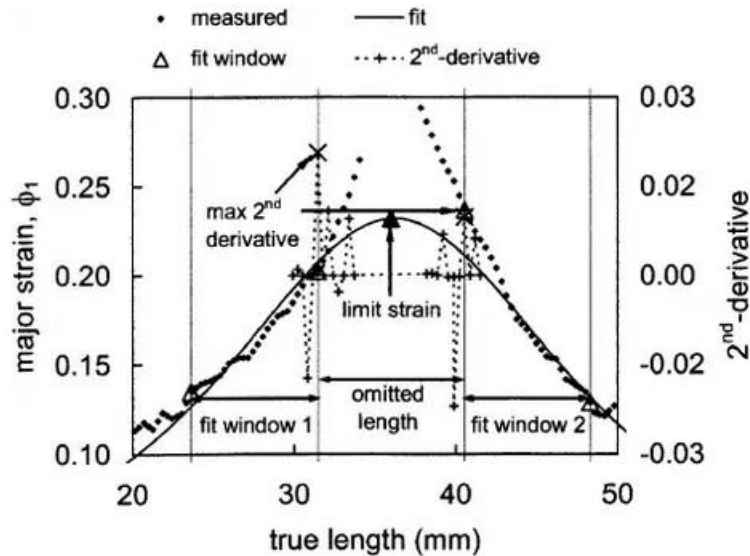


Obr. 2-21 Příklad náhodného rastru



Obr. 2-22 Definice správného nástříku [23]

Ke stanovení FLD diagramu v systému ARAMIS se používá zkouška podle Nakajimy. Určení bodu na FLC křivce spočívá v porovnání referenčního snímku, na kterém nebylo aplikováno žádné zatížení, a snímku vytvořeného těsně (1 až 5 snímků) před vznikem trhliny, na kterém se vytvoří tři řezy kolmé ke směru trhliny. Mezi těmito dvěma stavy je také potřeba dostatečný počet snímků na to, aby systém dokázal sledovat posuv jednotlivých fasetek. Z vytvořených řezů jsou automaticky vypočítány charakteristické hodnoty (teoretická maxima hlavní a vedlejší deformace) vytvořením ideálního tvaru křivky z naměřených hodnot, tedy regresní inverzní paraboly (viz Obr. 2-23). Jednotlivé body získané z různých geometrií se poté spojí a umožní vytvoření FLC křivky zkoumaného materiálu. [11]; [27]

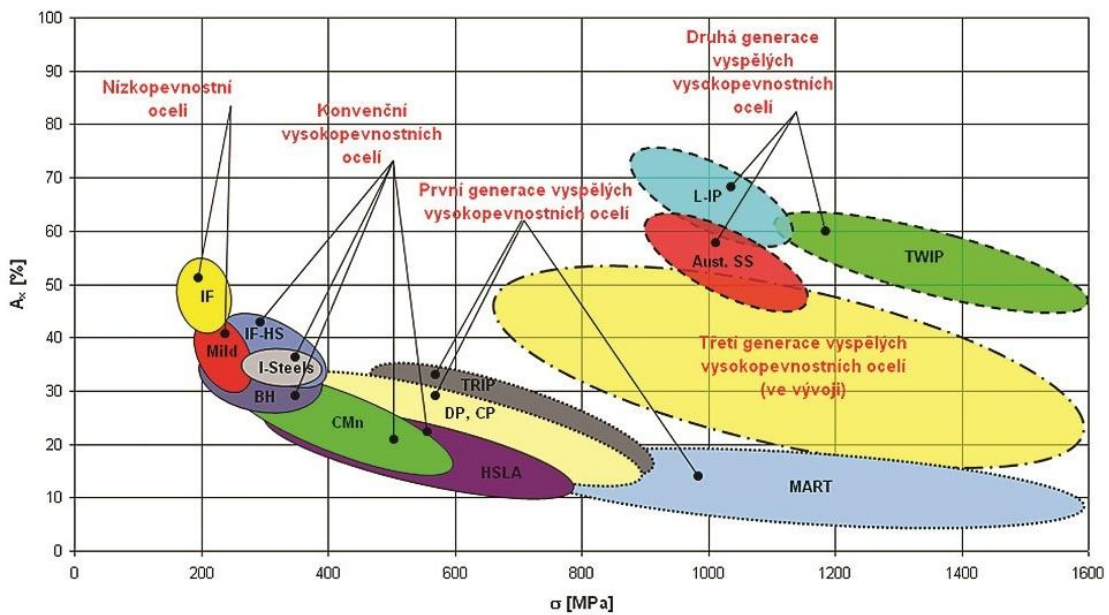


Obr. 2-23 Princip stanovení limitní deformace z naměřených hodnot [27]

2.7 Oceli pro stavbu karoserie

V automobilovém průmyslu je pro výrobu karoserií používána celá řada materiálů. I přes rostoucí využití hliníku, hořčíku a jejich slitin je nejvyužívanějším z nich ocel. Při volbě materiálu pro karoserii je kladen důraz na bezpečnost automobilu, a proto jsou důležité mechanické vlastnosti. Hledí se zejména na tuhost, ať už statickou či dynamickou, a také na pevnost. Zároveň je ale potřeba, aby byla hmotnost automobilu co nejnižší. V současné době je kladen velký důraz na ekologii, proto je snaha o snižování hmotnosti, což má vliv na spotřebu, emise i výkon. Použité plechy tedy musí být co nejpevnější, ale zároveň také co nejlehčí. To ovšem nejsou jediné požadované vlastnosti, jelikož jsou zapotřebí i dobré zpracovatelské vlastnosti a tyto oceli tedy mají vysoké nároky na dostatečnou plasticitu. Ta je důležitá při lisování plechů a umožňuje vytvářet různé designové prvky na karoserii. V neposlední řadě je nutné zajistit také dobrou svařitelnost. [28]; [29]

Oceli pro automobilové karoserie lze rozdělit podle metalurgie. První skupinou jsou *nízkopevnostní oceli* (LSS), tedy měkké hlubokotažné oceli s řízenou mezí kluzu (IF a Mild oceli). Druhou skupinou jsou *vysokopevnostní oceli* (HSS), což jsou nejpopulárnější konvenční oceli (IF-HS, BH, CMn a HSLA oceli). Dále existují *pokročilé vysokopevnostní oceli* (AHSS), speciální materiály s vyšší pevností než HSS oceli, určené na bezpečnostní a nosné prvky (DP, CP, TRIP, TWIP a MS oceli). Nejvyšší pevnosti dosahují *vysokopevnostní, za tepla tvářené oceli* (HF či PHS), což jsou manganborové oceli, které se používají na bezpečnostní prvky karoserie. [29]



Obr. 2-24 Porovnání celkové tažnosti a meze kluzu jednotlivých druhů ocelí [29]

2.7.1 Nízkopevnostní oceli

IF oceli (Interstitial Free)

Oceli bez intersticií mají velmi nízký obsah uhlíku a dusíku (pod 0,005 %) a při krystalizaci těchto ocelí tedy nejsou ve struktuře přítomny žádné intersticiální atomy, které by ji zpevňovali. Proto mají extrémně vysokou tažnost, ale zároveň nízkou pevnost. Mají feritickou matici a jsou mikrolegovány titanem nebo niobem. [29]; [30]

Mild oceli

Jedná se o běžné nízkouhlíkové oceli s nižší pevností. Mají feritickou strukturu a jsou stabilizovány mikrolegujícími prvky jako je titan či niob. Dnes se již téměř nepoužívají. [29]; [31]

2.7.2 Vysokopevnostní oceli

IF-HS oceli (Interstitial Free - High Strength)

Jsou to oceli bez intersticií, které jsou zpevněny přísadou fosforu, manganu a křemíku. Mají feritickou strukturu a nízký poměr mezi $R_m/R_{p0,2}$. Díky vysokému exponentu deformačního zpevnění mají vynikající hlubokotažnost a jsou tak vhodné pro složité součásti, které vyžadují vysokou pevnost. [29]; [30]; [32]

BH oceli (Bake Hardenable)

Zpevnění této oceli je dosaženo kontrolovaným žháním, což je proces založený na nízkoteplotním staticko-napěťovém umělém stárnutí, které probíhá při teplotách 170 °C po dobu 20 minut. Toho lze dosáhnout například při vypalování laku. Proces stabilizuje dislokace interstickými atomy uhlíku a dusíku, podmínkou je dostatečně vysoký podíl interstických (rozpuštěných) atomů uhlíku v tuhém roztoku na konci výrobního procesu. Patří do skupiny nízkouhlíkových ocelí a jejich struktura je feritická. [29]; [30]; [31]; [32]

HSLA oceli (High Strength Low Alloy)

Tyto oceli mají nízký obsah uhlíku, podporující plasticitu. Nižší obsah uhlíku je kompenzován mikrolegujícími prvky jako vanad, titan a niob. Tyto prvky tvoří nitridy, karbidy a karbonitridy, které přispívají k jemné precipitaci karbidů, zjemnění zrna a zpevnění matrice. Díky tomu je dosaženo požadovaných pevnostních charakteristik. [28]; [29]; [31]; [32]

2.7.3 Pokročilé vysokopevnostní oceli

DP oceli (Dual Phase)

Dvoufázové oceli se skládají z měkké feritické matrice (70 - 90 %), která zajišťuje plasticitu, a v ní dispergované pevné martenzitické mikrostruktury ve formě ostrůvků (10 - 30 %) vzniklé transformací zbytkového stabilizovaného austenitu. Kombinuje tak výhody obou struktur. Tyto oceli mají schopnost vysokého mechanického zpevnění, díky čemuž dochází ke zvýšení meze kluzu po tváření. Dále se využívá BH efektu při vytvrzování laku pro další zvýšení meze kluzu. Vzhledem k jejich vysoké schopnosti absorbovat energii a vysokým hodnotám únavové pevnosti jsou vhodné pro konstrukční a bezpečnostní prvky automobilů. [29]; [30]; [31]; [32]

CP oceli (Complex Phase)

Vícefázové oceli jsou nízkouhlíkové oceli, které mají feriticko-bainitickou matici, v níž je obsaženo malé množství martenzitu a někdy i zbytkového austenitu. Výrazného zjemnění zrna lze dosáhnout pomalou rekrytalizací, popřípadě precipitací mikrolegujících prvků jako jsou titan či niob. Mají vysokou hodnotu meze kluzu při zachování hodnoty meze pevnosti v tahu. [29]; [30]; [31]; [32]

TRIP oceli (Transformation Inducted Plasticity)

Multifázové oceli s transformačně indukovanou plasticitou mají vynikající kombinaci pevnosti a tažnosti. Jejich mikrostruktura je složena z ostrůvků zbytkového austenitu (5 - 15 %) a bainitu (25 – 40 %) rozptýlených ve feritické matici (50 -60 %). U některých typů se nachází i malé množství martenzitu. Při plastické deformaci dochází k transformaci austenitu na martenzit, což způsobuje zpevnění oceli. Mají vyšší obsah uhlíku než například DP oceli pro stabilizaci netransformovaného austenitu. Dále mají vyšší obsah křemíku, hliníku a manganu pro urychlení transformace feritu na bainit a pro zabránění vzniku karbidů v oblasti bainitu. V důsledku vysoké absorpční energie a únavové pevnosti jsou vhodné pro automobilové konstrukční a bezpečnostní díly. [29]; [30]; [31]; [32]

TWIP oceli (Twinning Inducted Plasticity)

Jedná se o oceli s vysokým obsahem manganu (17 - 24 %), který udržuje uhlík v tuhém roztoku austenitu. Dále jsou dolegovány hliníkem, který potlačuje přeměnu austenitu na nežádoucí martenzit, a křemíkem, který zlepšuje pevnost tuhého roztoku. U těchto ocelí se využívá principu dvojčatění, díky čemuž mají extrémní hodnoty tažnosti při velmi vysoké pevnosti. Dobré mechanické vlastnosti jsou však vykoupeny jejich cenou, která je kvůli legování manganem vysoká. Díky jejich pevnosti, tažnosti a odolnosti proti nárazu pomáhají ke snížení hmotnosti karoserie. [29]; [30]; [31]; [32]; [33]

MS oceli (Martensitic Steel)

Oceli, jejichž mikrostruktura je převážně martenzitická s malým množstvím feritu a bainitu. Struktury se dosahuje transformací austenitu při válcování za tepla s následným zakalením, po kterém následuje žihání a další zakalení. Martenzitické struktury lze také dosáhnout tepelným zpracováním po tváření. Dosahují velmi vysokých hodnot meze pevnosti v tahu (až 1700 MPa). Po zakalení jsou často ještě popouštěny s cílem zlepšit jejich tažnost a dosáhnout tak přiměřené tvárnosti při extrémně vysokých pevnostech. Díky jejich vynikajícím mechanickým vlastnostem jsou vhodné pro bezpečnostní prvky se zvýšenou odolností proti nárazu, jako části nárazníku, boční prahové výztuže či střešní příčník. [29]; [31]; [31]; [32]

Manganborové oceli

Jsou to za tepla tvářené oceli (HF - Hot Formed nebo PHS - Press Hardened Steel) a jsou určeny především pro konstrukční nosné a bezpečnostní části karoserie, které vyžadují vysokou odolnost proti nárazu. Přídavek malého množství bóru umožňuje použití vysokoteplotního termomechanického zpracování. Velmi vysoká pevnost po tváření umožňuje dosáhnout snížení hmotnosti daného dílu o 30 - 50 % oproti konvenčním za studena tvářeným ocelím. Tento typ oceli používá např. Volvo. [28]; [31]; [32]

2.8 Numerické simulace plošného tváření

V dnešní době jsou nedílnou součástí výrobního procesu numerické simulace. Při návrhu lisování plechů je možné použít modelování a simulace k mnoha účelům. Lze například sledovat tok materiálu, analyzovat rozložení napětí a teplot, určit tvářecí síly či předpovídat potenciální zdroje defektů a poruch. Ve výsledku to znamená, že můžeme zkontrolovat geometrii součásti a její vyrobitelnost. Tímto způsobem lze zlepšit kvalitu vyráběných dílů a snížit výrobní náklady, jelikož dochází ke snížení množství fyzikálních prototypů a testů, které jsou materiálově, časově i cenově velmi náročné. [34]; [35]; [36]

Tvarová složitost geometrie dílů a velká škála materiálů vyžadují dostatečnou přesnost a rychlost numerické simulace. Ve výpočtových simulacích procesů plošného tváření se využívá řešení získané použitím metody konečných prvků (MKP). Při použití této metody je součást v prostoru popsána trojúhelníkovými nebo čtyřúhelníkovými prvky. K ověření lisovatelnosti lze použít rychlé jednokrokové, vícekrokové a inverzní řešiče, které řeší výpočty rovnic implicitní metodou. Získání výsledků řešením implicitní numerickou metodou je rychlé a pohybuje se řádově v minutách. Precizní realistické řešení lze získat použitím explicitní numerické metody, avšak výpočet je v takovém případě delší. Přesnost výsledku, a tím i dobu výpočtu, lze optimalizovat pomocí parametrů okrajových podmínek, jako je počet úrovní adaptivního síťování se zjemňováním sítě konečných prvků součásti v průběhu simulace. Platí vztah, že čím menší je nejmenší element sítě, tím probíhá výpočet s menším časovým krokem, což je podmínkou stability řešení. Tím se prodlužuje doba výpočtu. [36]

Z hlediska matematiky představuje MKP v širším smyslu numerickou metodu řešení (parciálních) diferenciálních rovnic v kontinuu, v užším smyslu je to technika diskretizace kontinua do konečného počtu prvků. Je to velmi silná metoda při řešení úloh mechaniky poddajných těles. Nutno však podotknout, že za správnost výsledků neručí metoda samotná, jelikož vše závisí na způsobu použití. Metodu lze použít nevhodně jak při modelování mechanické soustavy, kdy se rozhoduje například o použití 1D, 2D, či 3D kontinua, tak i z hlediska použitých výpočtových postupů. Ke správnému a efektivnímu využití programu je tak potřeba kvalifikovaných pracovníků. [37]

2.8.1 AutoForm

AutoForm je software od švýcarské firmy AutoForm Engineering, který se používá v oblasti tváření plechů a zaujímá přední pozici v numerických simulacích pro automobilový průmysl. Umožňuje navrhnout nástroje a simulovat celý lisovací proces a všechny jeho fáze včetně pronutí přístřihu vlastní vahou, dojetí přídržovačů, vlastního tažení (i víceukrového), odstřížení, kalibrace, odpružení atd. [38]; [39]; [40]

K dispozici má AutoForm mnoho modulů, díky kterým se dá například jednoduše a rychle posoudit vyrobitelnost dílu včetně návrhu přístřihu, nebo simulovat kompletní proces hlubokého tažení. V případě celkové simulace software umožňuje identifikovat, který ze vstupních parametrů má nejvyšší vliv na kvalitu dílu a do jaké míry. Je možné provádět optimalizace formy či přístřihu a střižné křivky, kdy stačí zadat požadovaný tvar po deformaci a systém navrhne tvar přístřihu a střižné křivky. Také dokáže optimalizovat proces s ohledem na to, aby měly jednotlivé části výtažku optimální přetvoření podle FLD diagramu. Software má také řadu nástrojů pro kompletní návrh celé formy. [39]; [41]; [42]; [43]

3 Návrh experimentu

Vlastnosti materiálů jsou vyhodnocovány při podmínkách daných normou, ale tyto podmínky jsou vzdálené reálnému lisovacímu procesu. Snahou při navrhování výrobních technologií je zhotovit součást v co nejkratším čase a dosáhnout tak maximální produktivity, nicméně materiály se v závislosti na podmínkách zpracování mohou chovat různými způsoby. Jelikož se při návrhu a simulacích lisovacích procesů počítá se standardními vlastnostmi materiálu, může docházet k nepřesnostem. Cílem experimentu proto bylo pozorovat chování materiálu při různých deformačních rychlostech a zjistit tak, jaký vliv má rychlost deformace na tvářitelnost daného materiálu. K tomu bylo zapotřebí sestavit FLC křivky pro různé rychlosti tažení. Aby mohl být experiment uskutečněn, bylo nutné stanovit na jakém zařízení bude zkouška provedena, dále určit materiál vzorků, jejich geometrii a také parametry zkoušky.

3.1 Zkušební zařízení

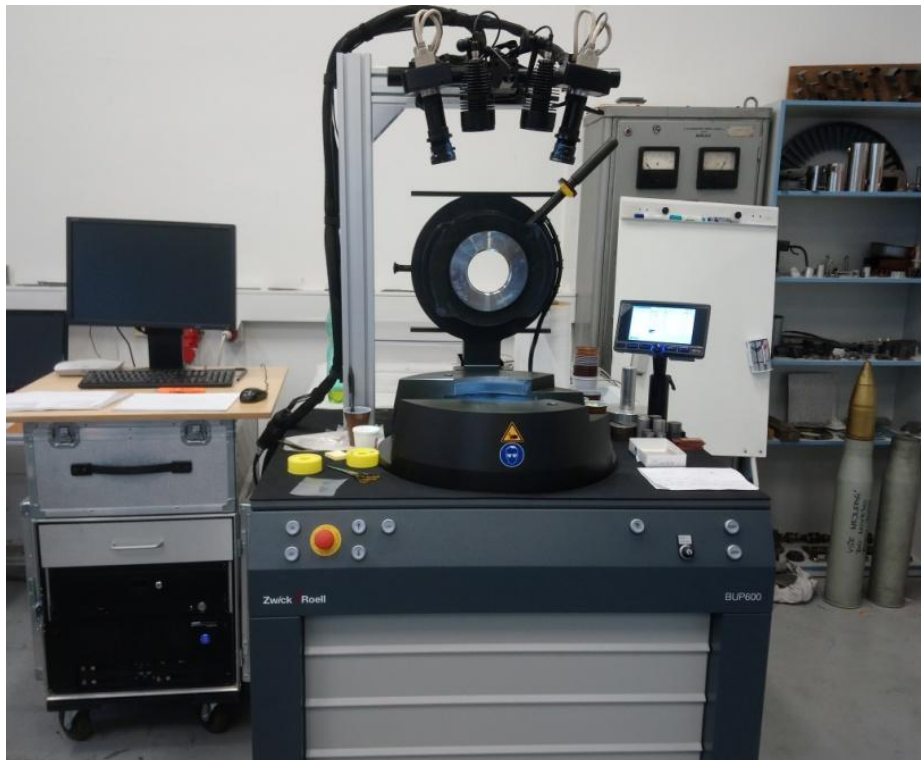
Zkoušky jsem prováděl na zkušebním zařízení BUP 600 firmy ZwickRoell. Jedná se o stroj pro určování hlubokotažnosti plechů. Mimo to na něm lze testovat i vliv povrchových úprav, povlaků, maziva, nástrojů a parametrů metody při procesu tváření. Stroj dokáže vyvinout maximální zatěžovací sílu 600 kN a rychlost posuvu tažení může být nastavena až na 17 mm/s. [44]

Pro vyhodnocování měření jsem použil systém ARAMIS. Ten zahrnuje několik variant, které se liší typem kamer. Při experimentu byl stroj BUP 600 osazen senzorem s označením ARAMIS 4M rev03. Základní technické údaje jsou uvedeny v Tab. 3-1.

Tab. 3-1 Základní údaje o senzoru ARAMIS 4M rev03 (rozsah platný pro objektivy 20 mm, 24 mm a 100 mm) [45]

Standardní rozsah měření v mm	10 x 7 až 3450 x 2500
Rozlišení kamery	2400 x 1728 pixelů
Obrazový snímač	CMOS
Max. snímkovací frekvence	168 Hz při 2400 x 1728 pixelech 336 Hz při 2400 x 864 pixelech 672 Hz při 2400 x 400 pixelech 1334 Hz při 2400 x 168 pixelech

Hlavní komponenty hardwaru	PC, senzor, ovladač senzoru, LED nasvícení vzorků
Doba expozice	0,1 ms až 2 s
Rozsah měření napětí	0,02 % až >100 %
Přesnost naměřeného napětí	až 0,01 %



Obr. 3-1 Zkušební zařízení

Před samotným měřením je nutno určit rozsah měření, který závisí na velikosti měřeného objektu. Kamery jsou umístěné na společném ramenu, které může mít podle varianty maximální vzdálenost kamer od sebe 500 mm, nebo 800 mm, dle toho se liší možný rozsah. Pro experiment jsem použil nastavitelné rameno s rozsahem 500 mm a vzájemná vzdálenost kamer byla 300 mm. Dále je rozsah měření závislý na velikosti objektivů, který byl v tomto případě 100 mm. Reálný rozsah se ovšem určí kalibračním objektem. V případě tohoto experimentu se jedná o kalibrační destičku s označením GOM/CP 20/MV 55x44 mm². Rozsahy měření jsou uvedeny v Tab. 3-2. [45]

Tab. 3-2 Rozsahy měření pro ARAMIS 4M rev03

ARAMIS 4M Velikost objektivů 100 mm na 500 mm rameni	Měřený objem	Vzdálenost kamer od měřeného vzorku
	Délka x šířka [mm x mm]	[mm]
GOM/CP 20/MV 55x44 mm ²	65 x 48	685
GOM/CP 20/MV 55x44 mm ²	80 x 60	785


Obr. 3-2 Kalibrační destička GOM/CP 20/MV 55x44 mm²

Důležité je také dostatečné nasvícení vzorku. Z toho důvodu jsou součástí senzoru dvě LED svítilny. Úhel světla se volí v závislosti na ohniskové vzdálenosti, pro ohniskovou vzdálenost větší nebo rovno 65 mm to je úhel 10°. Světlo však může způsobovat na lesklých materiálech odraz, a proto jsou kamery vybaveny polarizačními filtry. Ty slouží ke korekci světla, které jde do obou kamer, a k odstranění lesklých bodů na snímcích. [45]

Senzor se musí před kalibrací či měřením zahřát, přičemž zahřívání začíná okamžikem, kdy je senzor zapnut. Zahřívací doba senzoru 4M rev03 je 25 minut. Záznam a vyhodnocení měření jsem provedl v softwaru ARAMIS Professional 2018. [45]

3.2 Zkoušený materiál

Materiálem použitým při měření je ocel třídy DX57D jakosti CR5GI40/40-U-O, číslo materiálu 1.0853. Jedná se o žárově pozinkované plechy vhodné pro tváření za studena s velmi vysokou tažností určené i pro ty nejnáročnější operace hlubokého tažení. Technické dodací podmínky oceli se řídí normou ČSN EN 10346: Kontinuálně žárově ponorem povlakované ocelové ploché výrobky - Technické dodací podmínky, podle které je ocel značena DX57D+Z100-M-C-O (Z = žárový zinek, Z100 = 100 g na 1 m², M = malý zinkový květ, C = chemická pasivace, O = olejováno). Pro mezní úchytky rozměrů a tolerance tvaru platí norma ČSN EN 10143: Ocelové plechy a pásy kontinuálně pokovené - Mezní úchytky rozměrů a tolerance tvaru. [46]; [47]; [48]

Tab. 3-3 Chemické složení dle ČSN EN 10346

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

Tab. 3-4 Mechanické vlastnosti dle ČSN EN 10346

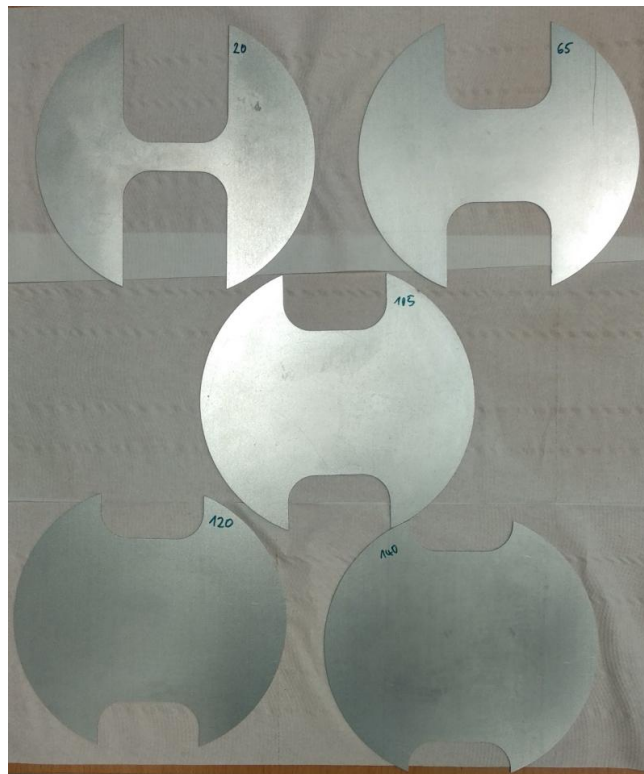
Mez kluzu	Pevnost v tahu	Tažnost			r		n _{10-20/Ag}
		A	A _{50 mm}	A _{80 mm}	r _{90/20}	r _{m/20}	
R _{p0,2}	R _m	A	A _{50 mm}	A _{80 mm}	r _{90/20}	r _{m/20}	n _{10-20/Ag}
110-170	260-330	-	≥ 42	≥ 41	≥ 2,1	≥ 1,8	≥ 0,22

3.3 Zkušební vzorky

Geometrie zkušebních vzorků odpovídala normě ČSN EN ISO 12004-2. Průměr vzorků byl 200 mm a pro pokrytí FLC křivky bylo použito 5 geometrií. Ty jsem navrhl tak, aby se nacházely dva vzorky v levé části FLD diagramu, jeden v oblasti nulových vedlejších deformací a dvě geometrie v pravé části FLD diagramu, tedy pro kladné vedlejší deformace. Levou část diagramu popisují vzorky s rozměry dříku 20 mm a 65 mm. Stanovení tvaru vzorku, u kterého při zkoušce nedochází k výrazným vedlejší deformacím, bylo nejtěžším úkolem. Původní návrh byl pro šířku dříku 80 mm, nicméně se ukázalo, že požadavku vyhovuje geometrie s dříkem širokým 105 mm. Díky tomuto zjištění jsem mohl určit další geometrii, která je charakterizována rozměrem dříku 120 mm a poslední rozměr použité geometrie byl 140 mm.

Rozměry dříků u vzorků použitých pro experiment tedy byly 20, 65, 105, 120 a 140 mm. Délka dříku činila 35 mm a poloměr zaoblění byl stanoven na 20 mm. Vzorky byly zhotoveny z plechu o tloušťce 0,7 mm.

Před samotnou výrobou vzorků bylo potřeba vytvořit jejich modely, které jsem zhotovil v programu SolidWorks. Po exportování modelů do formátu DXF se mohlo přejít k vyřezání vzorků na vláknovém laseru. Tento způsob výroby vzorků není definován v normě, nicméně vliv této technologie na výsledek zkoušky není výrazný a pro povahu experimentu nepodstatný.[49]



Obr. 3-3 Geometrie zkušebních vzorků



Obr. 3-4 Kontrola tloušťky vzorků

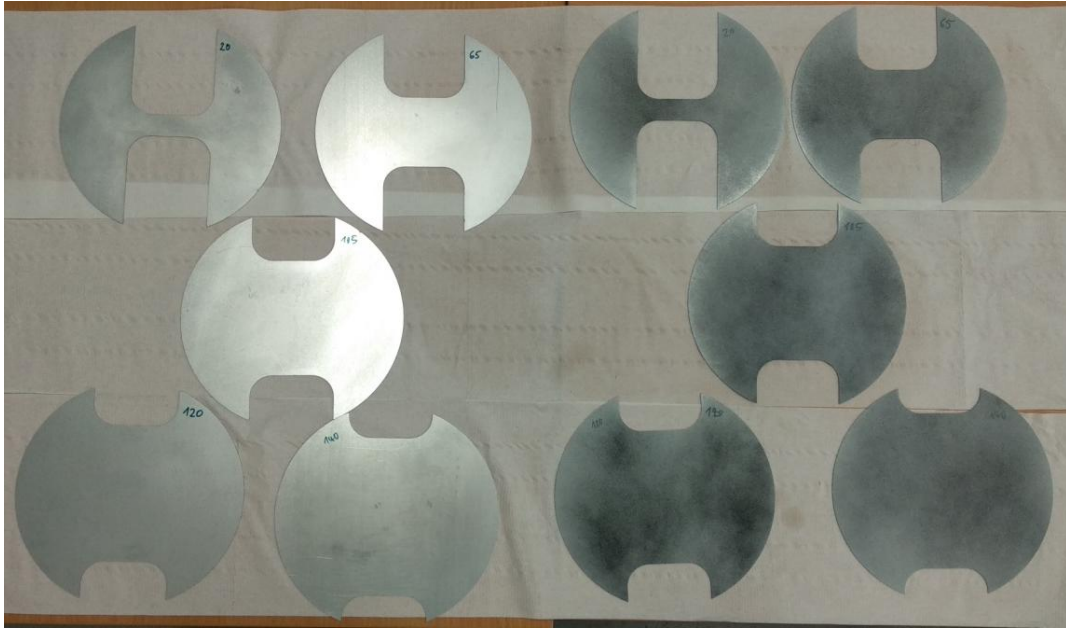
Pro vyhodnocení zkoušky systémem ARAMIS bylo zapotřebí vytvořit na vzorcích stochastické (tečkované) obrazce dle normy ČSN EN ISO 12004-2. Ta říká, že obrazce mohou být nanášeny rozprašováním nástřiku na povrch zkušebních těles. Pro snížení zpětných odrazů je možné rozprášit tenkou matnou bílou základní vrstvou, poté může být nastříkán oblak nahodile rozmístěných černých skvrn (např. černým nástřikem ve spreji nebo grafitem).

Před samotným nanášením patternu je potřeba zaručit jeho přilnavost k povrchu a je proto nezbytné vzorky důkladně odmastit. Nedostatečná adheze může způsobit zvláště u hlubokotažných plechů špatnou integritu nátěru, což může vést ke znehodnocení zkoušky. Pro odmaštění zkušebních vzorků jsem nejprve použil směs mycích prostředků a vody v kombinaci s ručním kartáčováním. Následoval oplach vodou a sušení. Poté jsem již mohl přistoupit k samotnému nanesení patternu pomocí barev ve spreji. Jako první jsem nanesl bílou matnou vrstvou, na kterou jsem následně rozprášil černou barvu tak, aby vznikla stochastická síť skvrn.

V průběhu zkoušky se však vyskytly problémy jak se soudržností nástřiku, tak i s rozpoznáváním patternu v systému ARAMIS. Pro důkladnější odmaštění jsem tedy poté použil technický benzín a toluen. Čitelnost patternu se zásadním způsobem zvýšila po použití bezbarvého matného laku místo bílého podkladu. Jelikož je povrch použitého materiálu dostatečně světlý a díky bezbarvému matnému laku nedocházelo k odleskům, ukázala se tato varianta jako mnohem účinnější než postup, který je dán normou.



Obr. 3-5 Přípravky použité pro odmašťování a tvorbu patternu



Obr. 3-6 Vzorky před a po nanesení patternu

3.4 Parametry zkoušky

Parametry pro zkoušku dle Nakajimy jsou předepsány opět normou ČSN EN ISO 12004-2. Normovaná rychlost tažníku je $1,5 \pm 0,5$ mm/s a zkušební teplota je stanovena na 23 ± 5 °C. Při zkoušce musí být, pokud možno, zabráněno vtažení materiálu, aby byly zajištěny téměř lineární průběhy deformací. Toho lze dosáhnout například vhodnou přidržovací silou. [16]

Vlastnosti materiálů jsou vyhodnocovány při těchto podmínkách, nicméně ty neodpovídají reálnému lisovacímu procesu. Cílem experimentu bylo tedy popsat chování materiálu při různých deformačních rychlostech, avšak tento parametr není možné v zařízení zadat. Lze však měnit rychlost posuvu nástroje, která s rychlostí deformace úzce souvisí (viz kapitola 2.2.2). Z toho důvodu jsem zkoušku prováděl při rychlosti tažníku 2 mm/s, což odpovídá podmínkám definovaných v normě, a dále při rychlostech 10 mm/s a 15 mm/s. Sílu přidržovače jsem nastavil na 300 kN, což by mělo zabránit vtažení materiálu.

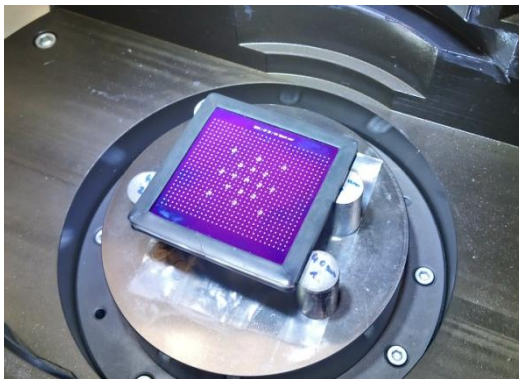


Obr. 3-7 Kontrolní panel s parametry zkoušky

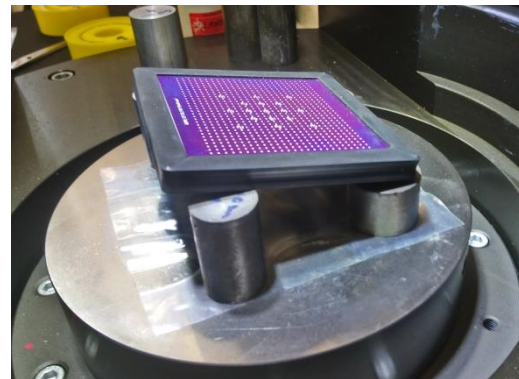
Dalším důležitým parametrem bylo nastavení snímkovací frekvence kamer. Čím rychlejší byla rychlost tažníku, tím vyšší snímkovací frekvence byla potřeba ke zhotovení záznamu zkoušky. Její zvýšení má však za následek horší rozpoznávání rastru a pro vyšší rychlosti byl proto zapotřebí kvalitnější pattern. Pro rychlost 2 mm/s bylo potřeba snímkovací frekvence alespoň 10 Hz, pro 10 mm/s 35 Hz a pro 15 mm/s minimálně 50 Hz.

3.5 Kalibrace

Před provedením experimentu bylo potřeba systém ARAMIS zkalibrovat, jelikož správné provedení kalibrace má zásadní vliv na přesnost měření. Kalibrační destička se volí na základě rozsahu měření, v tomto případě to byla destička o rozměrech 55 x 44 mm² (viz kapitola 3.1). Samotná kalibrace spočívala v polohování destičky dle pokynů kalibračního systému, který je přednastaven v systému ARAMIS, a to v celkem třinácti krocích, ve kterých jsem kalibrační destičku různě natáčel vůči kamerám.



Obr. 3-8 Ukázka z kalibrace 1

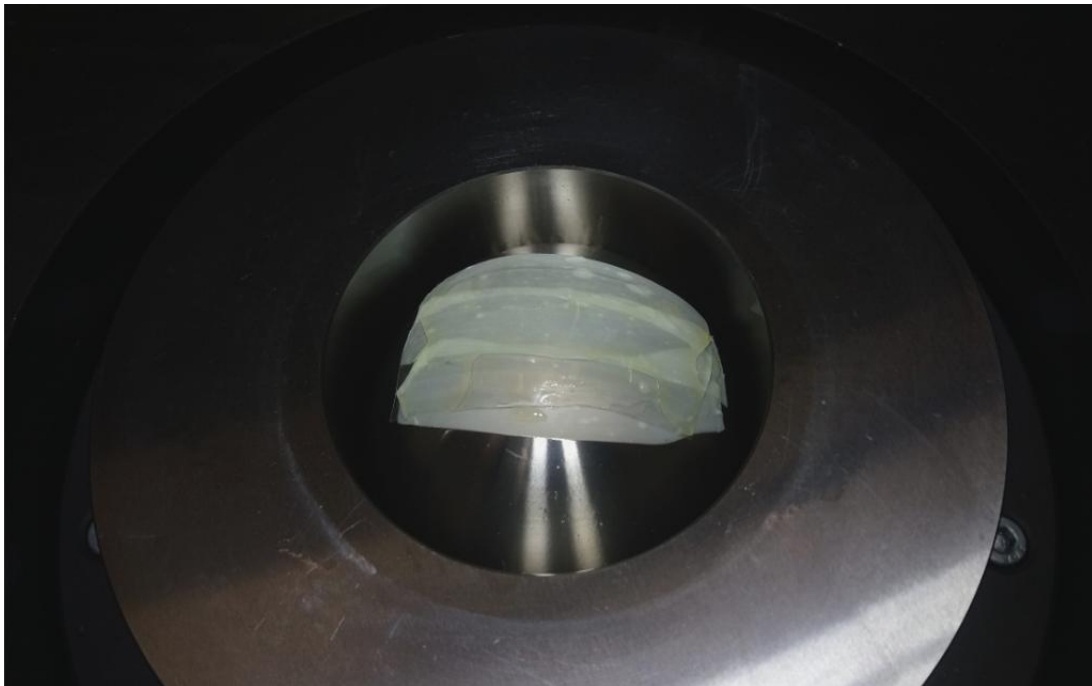


Obr. 3-9 Ukázka z kalibrace 2

4 Postup měření

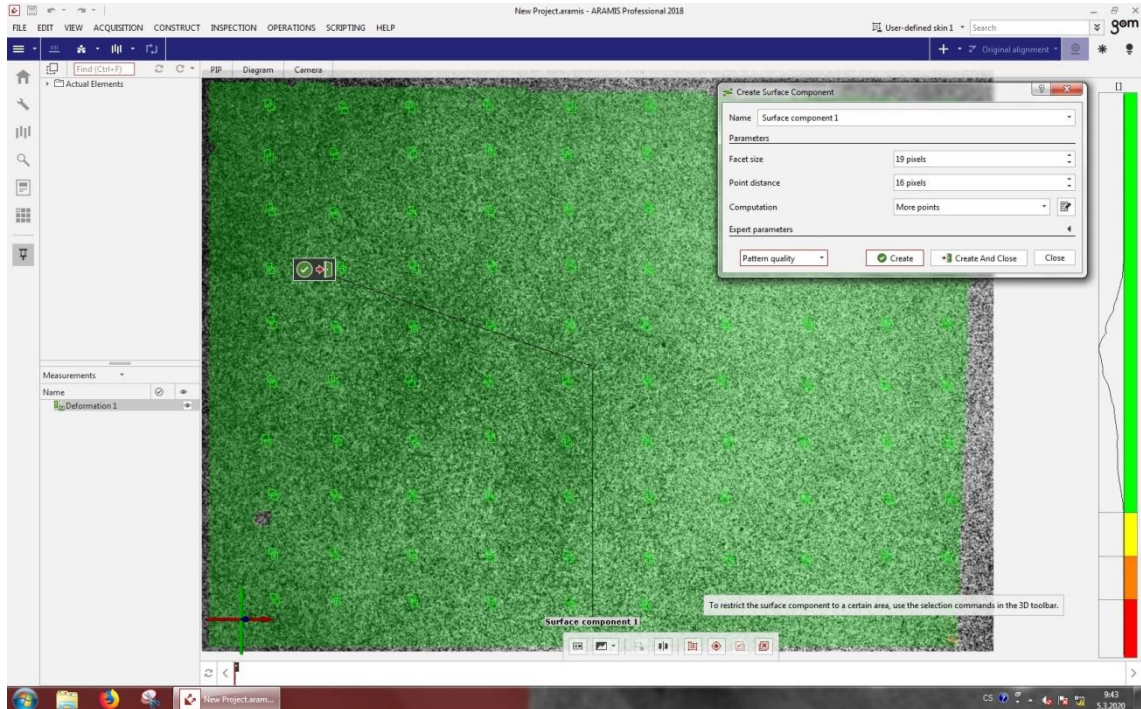
Po stanovení podmínek experimentu, přípravě vzorků a kalibraci systému jsem mohl přejít k samotnému měření. Jelikož pro vyhodnocení jednoho bodu na FLC křivce je dle normy ČSN EN ISO 12004-2 potřeba tří platných měření (viz kapitola 2.4.1), pro zhotovení kompletní FLC křivky sestavené z pěti bodů bylo zapotřebí provést patnáct měření. K získání třech FLC křivek tedy bylo nezbytné provést čtyřicet pět úspěšně provedených měření. Pro každé z nich byl použit níže uvedený postup.

Prvním krokem bylo nanesení kluzné vrstvy na tažník. Tření mezi tažníkem a vzorkem muselo být dostatečně nízké na to, aby trhlina vznikla v souladu s normou, tedy méně než 15 mm od vrcholu tažníku. Toho jsem dosáhl postupným vrstvením různých mazacích prostředků v tomto pořadí: olej, PTFE páska, olej, polyethylenová fólie, olej.



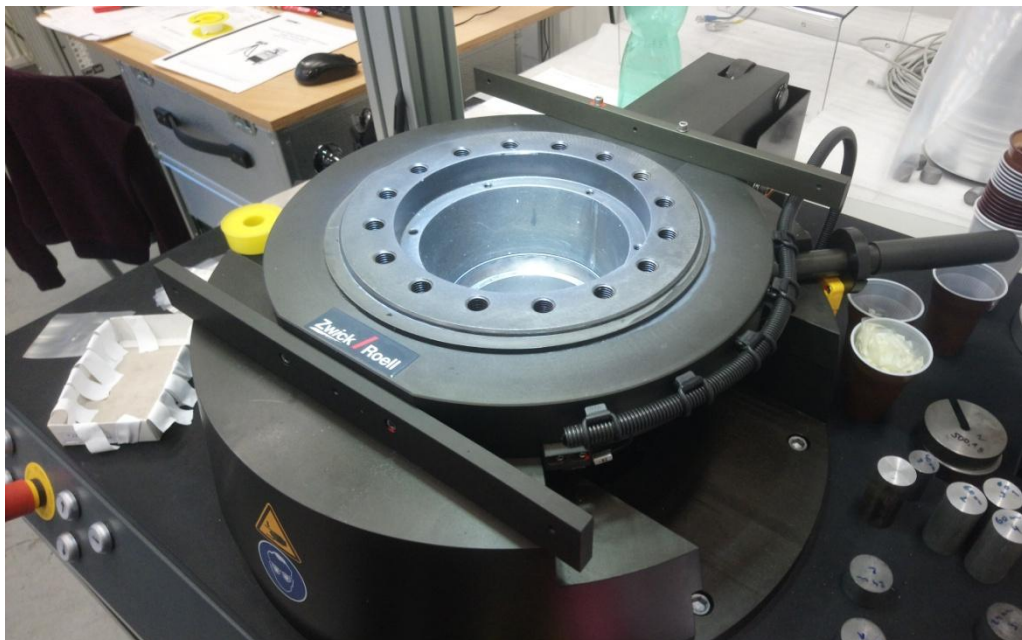
Obr. 4-1 Ukázka kluzné vrstvy nanesené na tažník

Následně jsem vzorek umístil do zkušebního zařízení. Před uzavřením zkušební komory je vhodné zkontrolovat kvalitu naneseného patternu v systému ARAMIS. Tento krok není pro vykonání zkoušky nezbytný, ale zvláště při vyšších snímkovacích frekvencích kamer je vhodné zkontrolovat, zda systém nástřík rozpoznal v dostatečné kvalitě.

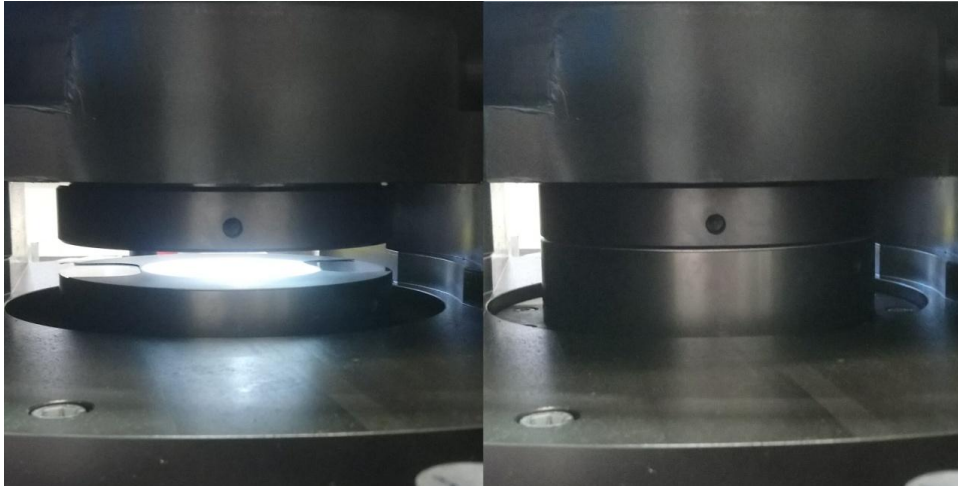


Obr. 4-2 Kontrola kvality patternu

V dalším kroku jsem uzavřel zkušební komoru a vysunul přídržovač. Tyto úkony znamenají manipulaci s pohyblivými částmi stroje a z důvodu bezpečnosti je potřeba k jejich vykonání použít obě ruce.

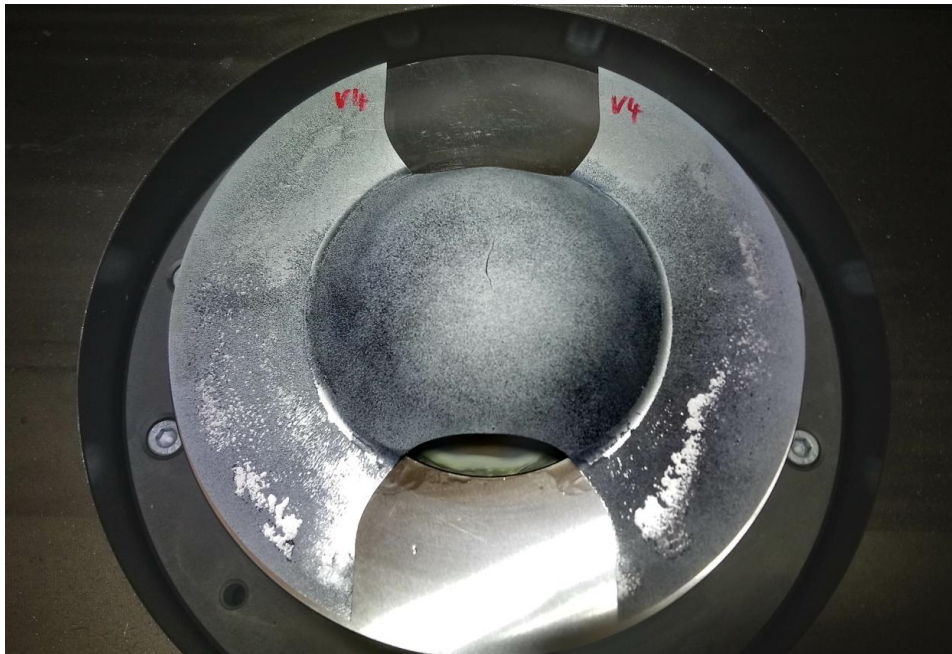


Obr. 4-3 Uzavření zkušební komory



Obr. 4-4 Zkušební komora před a po vysunutí přídržovače

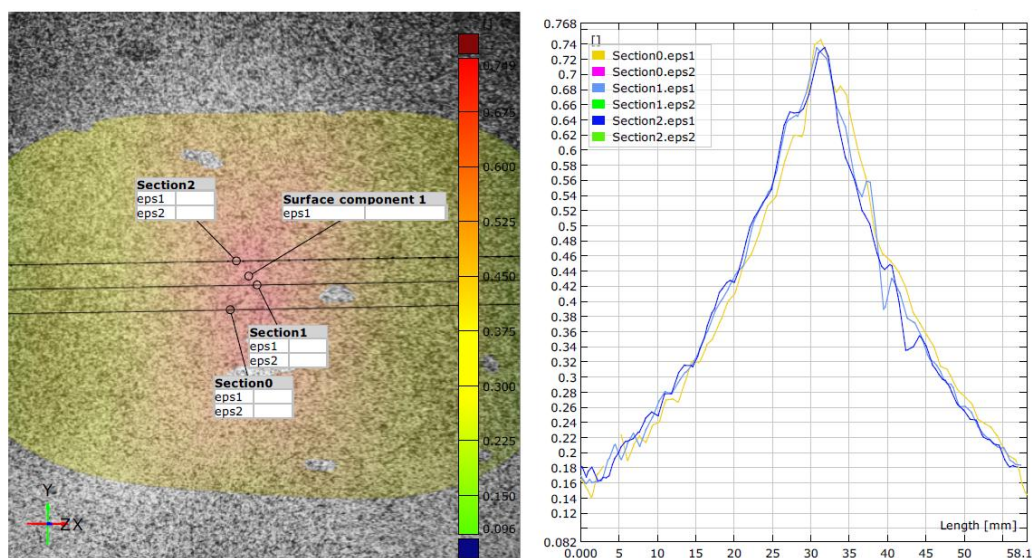
Nyní jsem již mohl uskutečnit samotnou zkoušku. Ta spočívala ve spuštění nahrávání záznamu v softwaru ARAMIS Professional 2018 a následnou aktivací pohybu tažníku na zkušebním zařízení BUP 600. Po vytvoření trhliny jsem nahrávání záznamu přerušil a mohl jsem přejít k vyhodnocení naměřených dat.



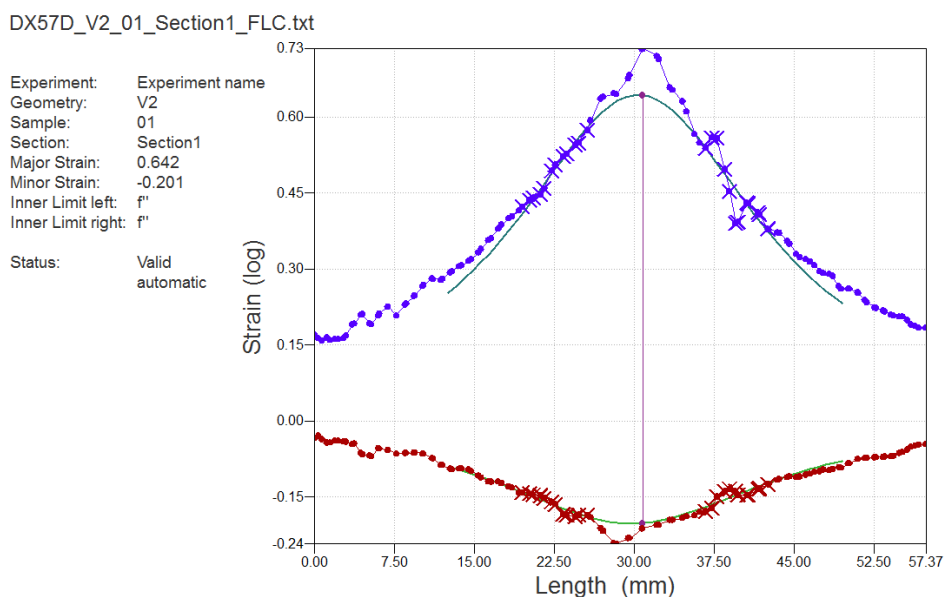
Obr. 4-5 Vzorek s trhlinou po uskutečnění zkoušky

Před samotným výpočtem deformací je vhodné odstranit snímek, který sloužil pro kontrolu patternu. Jako referenční snímek je potřeba použít ten, který byl zaznamenán po spuštění zkoušky, než došlo k deformaci vzorku. Tak získáme jistotu, že výsledek nebude negativně ovlivněn. Dále je vhodné odstranit snímky vzniklé po vytvoření trhliny, jelikož vzhledem k povaze vyhodnocování nejsou v této oblasti snímky důležité

a prodlužují čas výpočtu. Po této přípravě jsem v softwaru nechal vytvořit měrnou síť, což spočívá ve vytvoření jednotlivých subsetů (fazetek), přičemž oblast vyhodnocování lze omezit pouze na okolí trhliny pro další zkrácení výpočtu. Následně jsem spustil výpočet dat pro tvorbu FLC křivky. Poté už stačilo jen vybrat snímek těsně před vznikem trhliny a na něm vytvořit tři řezy kolmé ke směru tvorby trhliny. Tyto řezy slouží k získání tří hodnot pro hlavní deformaci a tomu odpovídajících hodnot vedlejších deformací (viz Obr. 4-6). Provedením dalších zkoušek stejných parametrů jsem získal body potřebné pro vytvoření průměrných hodnot hlavní a vedlejší deformace, které sloužily k vytvoření jednoho výsledného bodu v FLD diagramu. Opakováním postupu pro jednotlivé geometrie tak lze sestavit FLC křivku.



Obr. 4-6 Vyhodnocení zkoušky



Obr. 4-7 Získání výsledných deformací proložení křivky regresní inverzní parabolou

5 Vyhodnocení experimentu

Měření FLC křivek pro ocel DX57D se ukázalo být náročné na přípravu vzorků. Vzhledem k vysoké tažnosti oceli se vyskytl problém se soudržností patternu, jelikož velké deformace kladou značné požadavky na jeho přilnavost. Tento problém se vyskytoval především při rychlosti zkoušky 2 mm/s a bylo proto potřeba dbát u vzorků tažených touto rychlostí na důkladné odmaštění. Při vyšších rychlostech tažníku se projevil problém rozpoznávání patternu v systému ARAMIS. Důvodem bylo, že při vyšších rychlostech zkoušky byla zapotřebí také vyšší snímkovací frekvence kamer, aby byl zaznamenán dostatečný počet snímků ve značně zkráceném čase. Například zkouška, která při rychlosti 2 mm/s trvala přibližně 15 sekund, byla při rychlosti 15 mm/s hotová za 2 sekundy. Zvýšením frekvence se ovšem snímky stávají tmavšími a dochází tak k horší rozpoznávací schopnosti. Proto bylo nutné zajistit ideální světelné podmínky a na kamerách nastavit vhodně polarizační filtry. To ovšem pro dobrou čitelnost patternu nestačilo a pomohla až výměna bílé podkladové vrstvy nástřiku za bezbarvý matný lak.

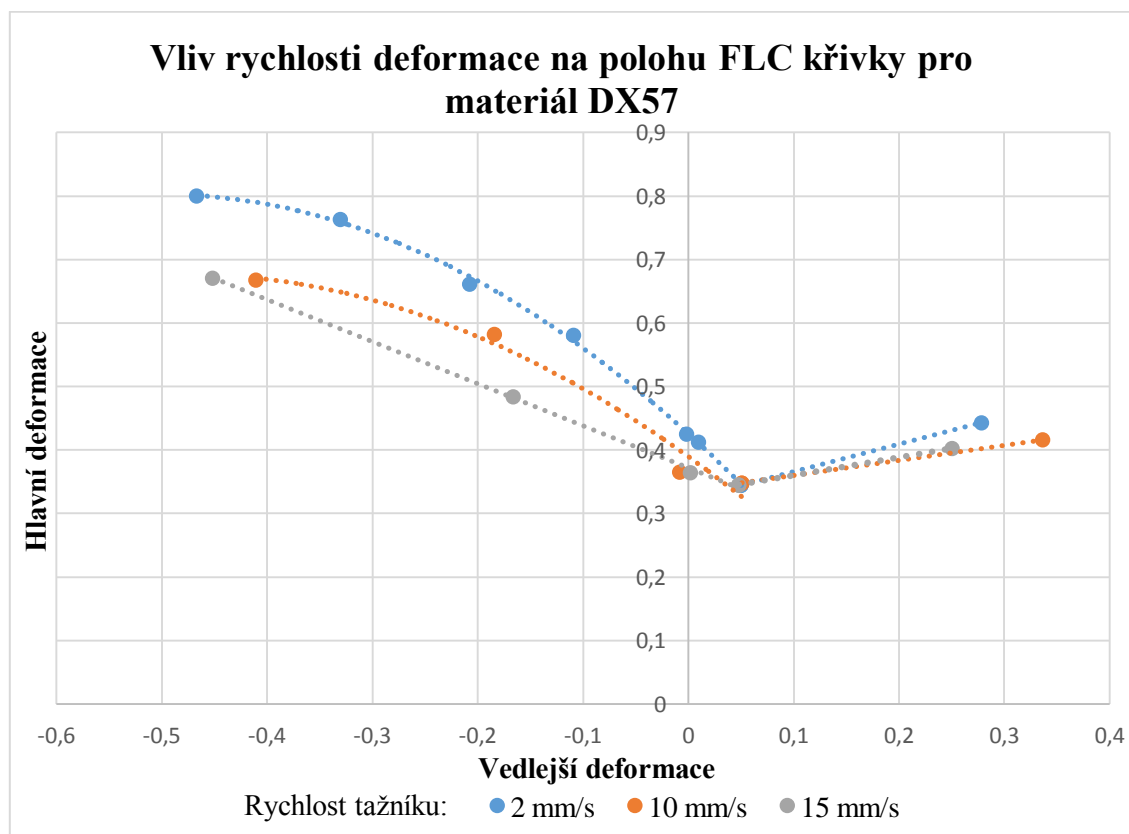
Další problematickou částí experimentu byla tvorba tribologického systému mezi tažníkem a vzorkem, jelikož bylo potřeba zaručit, že trhlinka vznikne do 15 mm od vrcholu. To bylo náročné především u vzorků s širším dříkem (v pravé části FLD diagramu) a při vyšších rychlostech zkoušky. K úpravám jednotlivých vrstev tribologického systému během zkoušky nedošlo, ale důležité bylo jejich správné nanesení. V případě špatné aplikace mazacích přípravků nedošlo ke tvorbě trhliny v požadovaném místě a okraje polyethylenové fólie mohly dokonce zapříčinit iniciaci trhliny.

Po provedení potřebných měření jsem hodnoty pro jednotlivé geometrie a rychlosti zprůměroval a z výsledných bodů již bylo možné sestavit FLD diagram se třemi FLC křivkami, které charakterizují zásobu plasticity pro zkoumané rychlosti.

K dispozici bylo i několik vzorků o rozměrech dříku 50, 80 a 110 mm. Tyto geometrie jsem využil pro detailnější popis FLC křivky vytvořené při podmínkách daných normou, tedy při rychlosti tažníku 2 mm/s. Pro tuto rychlost jsem tedy použil celkem osm geometrií na rozdíl od zbylých dvou křivek, které se skládají každá z pěti bodů.

Tab. 5-1 Výsledné hodnoty deformací pro různé geometrie a rychlosti zkoušky

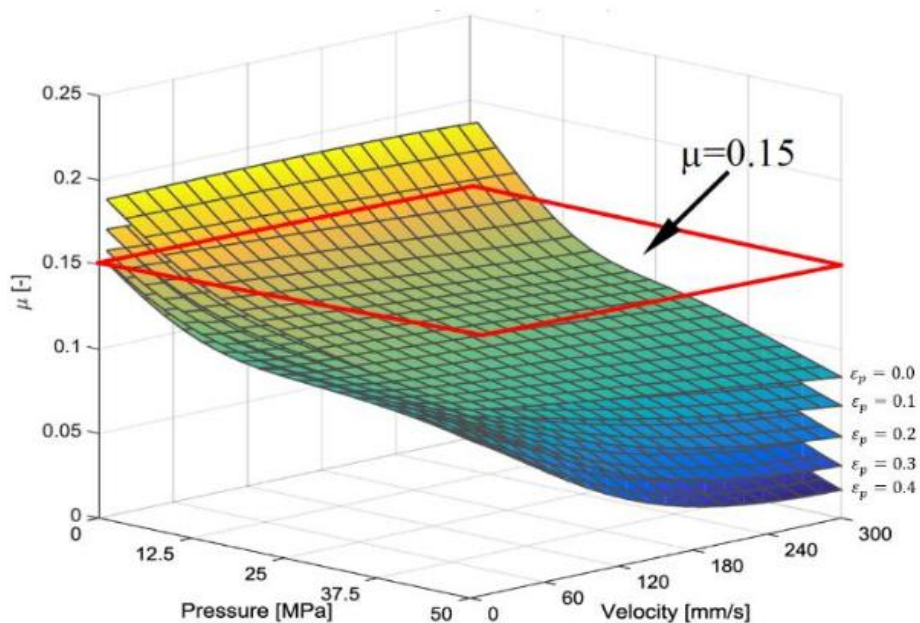
Vzorek		20 mm (V1)		50 mm		65 mm (V2)		80 mm	
Deformace		Hlavní	Vedlejší	Hlavní	Vedlejší	Hlavní	Vedlejší	Hlavní	Vedlejší
Rychlost [mm/s]	2	0,800	-0,467	0,763	-0,330	0,661	-0,208	0,581	-0,109
	10	0,668	-0,411			0,582	-0,184		
	15	0,671	-0,452			0,484	-0,166		
Vzorek		105 mm (V4)		110 mm		120 mm (V3)		140 mm (V5)	
Deformace		Hlavní	Vedlejší	Hlavní	Vedlejší	Hlavní	Vedlejší	Hlavní	Vedlejší
Rychlost [mm/s]	2	0,425	-0,002	0,413	0,010	0,345	0,050	0,443	0,278
	10	0,365	-0,008			0,348	0,051	0,416	0,337
	15	0,364	0,002			0,345	0,048	0,403	0,251



Z výsledného grafu je patrné, že změna rychlosti tažníku, která má za následek i změnu deformační rychlosti, má vliv na polohu FLC křivky. Je tak potvrzen předpoklad, že zvýšením deformační rychlosti dochází k posunu FLC křivky směrem k nižším hodnotám hlavních deformací a omezuje tedy maximální přípustné přetvoření materiálu. Největší vliv změny rychlosti tažníku je možné pozorovat v oblasti záporných vedlejších deformací a dle experimentu se tento vliv snižuje směrem k nulové hodnotě. Zajímavým faktem je, že dle naměřených dat není hlavní deformace

křivek nejnižší při nulové vedlejší deformaci a všechny tři křivky se setkávají právě v bodě, kde dosahuje hlavní deformace minimální hodnoty. Tento jev by však bylo vhodné prozkoumat důkladnějším měřením s více opakováními.

Kromě změny deformační rychlosti je však třeba brát v potaz také další vlivy, ke kterým docházelo při zvýšení rychlosti zkoušky. Například u vzorků tažených rychlostí 15 mm/s šlo hmatem zjistit, že jsou vzorky bezprostředně po vykonání zkoušky zahřáté. Dále jsem pozoroval změny v systému maziv, kdy při vyšších rychlostech došlo k vytlačení veškerého oleje a výraznější deformaci PTFE pásky a polyethylenové fólie. Přestože tření muselo být pořád dostatečně nízké na to, aby vzorek praskl v požadovaném místě, nelze vyloučit, že i změna třecích podmínek mohla hrát ve výsledku roli. To ale není jediný vliv, který mohl ovlivnit velikost tření, jelikož změnou rychlosti a tlaku dochází také ke změně koeficientu tření i bez jakýchkoliv změn v tribologickém systému, jak je patrné z Obr. 5-1. V tomto případě však tření s rostoucí rychlostí a tlakem klesá. Lze tedy říci, že na polohu FLC křivky má vliv deformační rychlost, ale také tření a deformační teplo, které souvisejí se změnou rychlosti nástroje. [50]



Obr. 5-1 Vliv rychlosti a tlaku na koeficient tření při různých stupních napětí [50]

Změnu dosažených deformací lze sledovat i bez použití systému ARAMIS, a to na zdvihu tažníku, potažmo na výsledné hloubce výtažku. Takto nelze určit konkrétní hodnoty, ale je možné tímto způsobem pozorovat, jaký má rychlost vliv na dosaženou dráhu tažníku, což reprezentuje i změnu hlavní deformace. Proto jsem proměřil hloubky výtažků pro jednotlivé rychlosti. Průměry naměřených hodnot jsou uvedeny v Tab. 5-2 a je z nich zřejmé, že s rostoucí rychlostí klesá hloubka výtažků, a tedy i zdvih tažníku. Jediná anomálie je u geometrie s dříkem o rozměru 140 mm a rychlosti 10 mm/s. To mohlo být způsobeno setrvačností po ukončení zkoušky, kdy tažník mohl urazit ještě určitou dráhu. Také rozdíly v jednotlivých hloubkách výtažků pro geometrie s širšími dříky při opakování zkoušky se stejnými parametry byly výraznější. Jedná se tak spíše o orientační výsledky, nicméně i z nich je patrný trend poklesu dosažené deformace při vyšších rychlostech posuvu tažníku.

Tab. 5-2 Vliv rychlosti tažníku na dosažený zdvih při porušení vzorku

Vzorek		Dosažený zdvih tažníku [mm]				
		20 mm	65 mm	105 mm	120 mm	140 mm
Rychlost [mm/s]	2	32,1	35,0	38,2	40,8	45,8
	10	30,3	34,2	37,4	40,2	46,0
	15	29,7	34,1	36,9	39,1	45,5

Na Obr. 5-2 je k vidění porovnání vzorku taženého rychlostí 2 mm/s, který je umístěn ve spodu, a rychlostí 15 mm/s položeného navrchu. I z tohoto vizuálního porovnání je patrný rozdíl v dosažených deformacích.

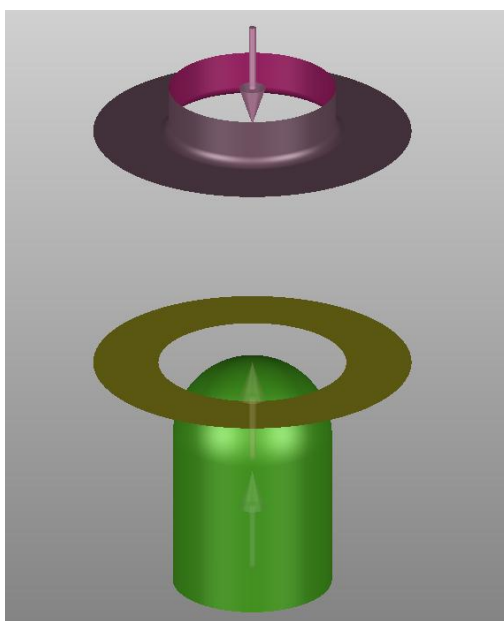


Obr. 5-2 Vizuální porovnání vzorku taženého rychlostí 2 mm/s a 15 mm/s

6 Vliv rychlosti deformace na výsledek numerické simulace

Po potvrzení, že rychlost deformace má vliv na polohu FLC křivky, bylo dalším krokem ověřit tuto skutečnost v numerické simulaci, konkrétně v softwaru AutoForm. Software ovšem bez znalostí materiálových vlastností nedokáže vyhodnotit, kdy dojde k porušení materiálu v důsledku deformace. Mezi základní potřebné vlastnosti patří například Youngův modul pružnosti, Poissonova konstanta a hustota. Dále je potřeba znát křivku zpevnění a hodnoty s ní související, jako mez pevnosti, mez kluzu a exponent deformačního zpevnění. Nezbytné je také definovat podmínku plasticity materiálu. Tyto vlastnosti ovšem nestačí k tomu, aby software dokázal rozpoznat, kdy dojde k porušení materiálu a tuto podmínku určuje právě FLC křivka. Ta se dá získat například provedením zkoušky podle Nakajimy. To znamená, že nelze využít numerické simulace k získání FLC křivky a experiment není možné v softwaru AutoForm reprodukovat. Lze však ověřit, zda-li má změna rychlosti deformace vliv na dosaženou deformaci za jinak stejných podmínek.

Aby bylo možné numerické simulace uskutečnit, bylo zapotřebí nejprve vytvořit nástroje, tedy tažník, tažnici a přídržovač. Spolu s modely vzorků, které jsem zhotovil již pro potřeby experimentu, tvořily kompletní sestavu. Jako představitele pro tuto simulaci jsem zvolil vzorek s šířkou dřívku 105 mm.



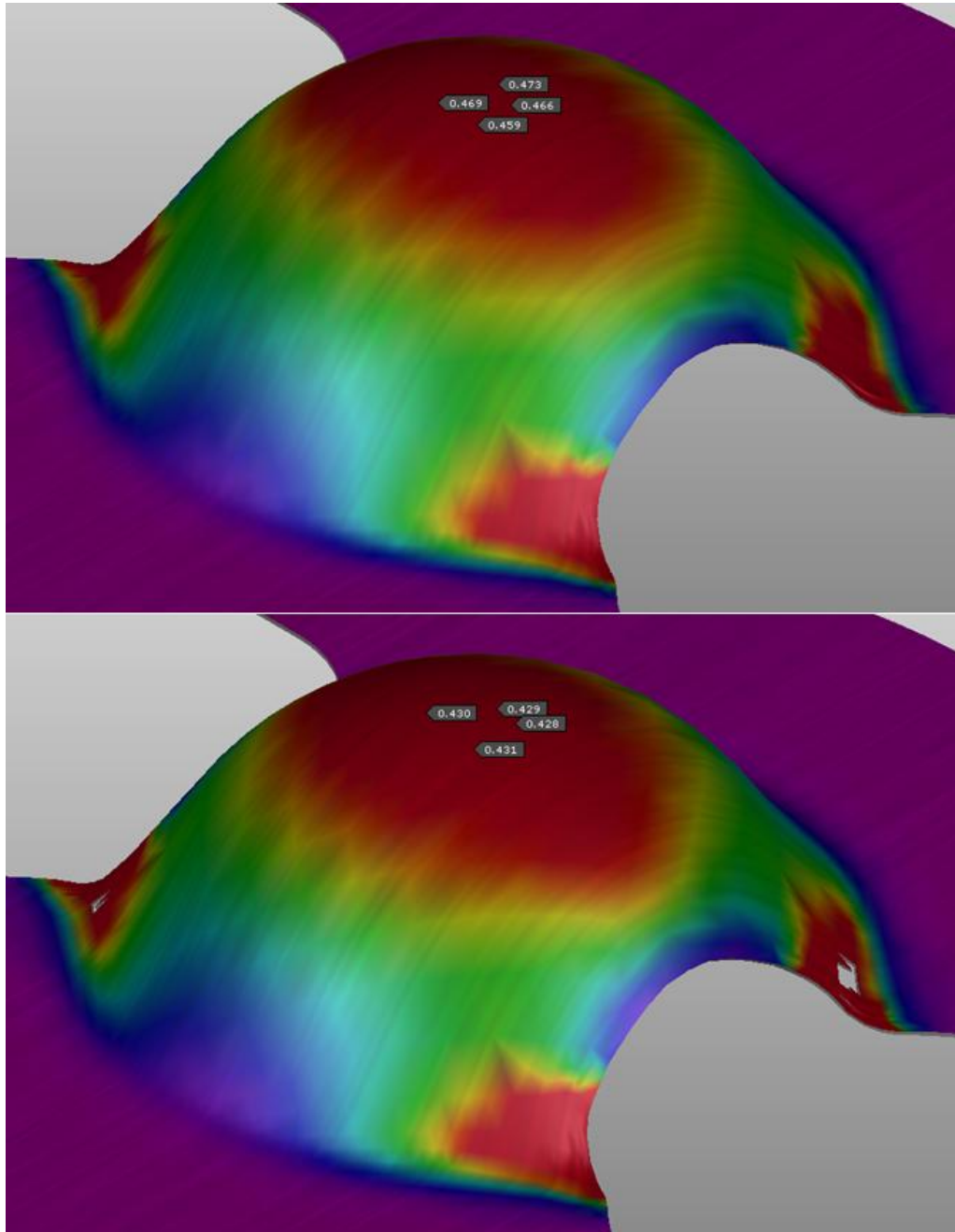
Obr. 6-1 Sestava nástrojů

Dalším krokem byla volba parametrů procesu, potažmo počátečních podmínek. Jelikož šlo v tomto případě o to zjistit, zda bude simulace vůbec reagovat na změnu rychlosti, zvolil jsem dvě výrazně odlišné rychlosti, konkrétně 1 mm/s a 200 mm/s. Nastavení tření bylo v této části analýzy konstantní, vždy se jednalo o tření proti plechu, které bylo pro tažnici 0,5, pro tažník 0,03 a pro přídržovač 0,5. Nezbytným krokem pro uskutečnění simulace bylo také definování tvářeného materiálu. V softwaru jsou k dispozici různé skupiny materiálů a také různé materiálové modely pro stejné materiály. Aby byla tato úloha plně pokryta, provedl jsem simulace pro vícero materiálových modelů. Mohl jsem tak pozorovat nejen jejich chování při změně rychlosti zkoušky, ale také rozdíly mezi jednotlivými modely. V Tab. 6-1 jsou uvedeny průměrné hodnoty z bodů, které jsem odečetl v oblasti vrcholu výtažku.

Tab. 6-1 Vliv rychlosti deformace pro různé materiálové modely v numerické simulaci

Rychlost	1 mm/s	200 mm/s	1 mm/s	200 mm/s
Deformace	Hlavní		Vedlejší	
DX57 Voestalpine	0,417	0,429	-0,013	-0,015
MMK	0,485	0,485	-0,111	-0,111
DX57 Baosteel	0,498	0,501	-0,110	-0,110
DX57 Tata Steel Vegter	0,463	0,461	-0,012	-0,012
DX57 Tata Steel Strainrate Sensitive	0,467	0,430	-0,014	-0,016

Dle výsledků se jeví, že ve většině případů nemá změna rychlosti deformace výrazný vliv na velikost dosažené deformace. Jediným materiálovým modelem, u kterého došlo ke značnému poklesu hlavní deformace, je DX57 Tata Steel Strainrate Sensitive. Jedná se také o jediný model, který má v materiálové kartě uvedeny křivky zpevnění pro různé deformační rychlosti. Zajímavé je sledovat rozdíly mezi jednotlivými materiálovými modely, které jsou překvapivě vysoké i přes to, že mechanické vlastnosti jednotlivých modelů se dle materiálových karet příliš neliší. Rozdílné hodnoty jsou přitom patrné nejen u hlavních deformací, ale také u vedlejších deformací. Ohledně zkoumání vlivu změny rychlosti posuvu tažníku na velikost deformací v numerické simulaci jsem provedl i další pokusy, ale zde prezentuji jen klíčové výsledky.



Obr. 6-2 Porovnání hlavní deformace pro rychlost nástroje 1 mm/s (nahore) a 200 mm/s (dole) pro materiálový model DX57 Tata Steel Strainrate Sensitive v programu AutoForm

Protože může mít na výsledek vliv i velikost součinitele tření, který se v reálných podmínkách při změně rychlosti a tlaku mění, zabíval jsem se také touto variantou. Jako materiálový model posloužil DX57 Tata Steel Strainrate Sensitive, jelikož se tento model jeví jako nejpropracovanější. Opět jsem použil geometrii vzorku s šířkou dřívku 105 mm. Rychlost tažníku jsem nastavil na 1 mm/s a součinitel tření u tažnice a přidržovače byl 0,5. Sledoval jsem vliv změny součinitele tření mezi plechem a tažníkem na velikost deformace.

Tab. 6-2 Vliv koeficientu tření na deformaci

Deformace		Hlavní	Vedlejší
Součinitel tření	0,020	0,565	-0,019
	0,025	0,507	-0,016
	0,030	0,492	-0,014
	0,035	0,436	-0,012

Z tabulky vyplývá, že změna součinitele tření má výrazný vliv na velikost hlavní deformace a malá změna třecích podmínek se tak projeví velkou změnou její hodnoty. U vedlejší deformace dochází v tomto případě k mírnému růstu, který není nikterak významný. Toto zjištění potvrzuje fakt, že na správnost výsledku numerické simulace mají kritický vliv nastavené parametry, v tomto případě hodnota součinitele tření.

Software AutoForm ovšem kromě nastavení konstantního tření v průběhu simulace nabízí i komplexnější metodu, která počítá i s rychlostí a tlakem. Vzorec, podle kterého je počítán koeficient tření, je následující:

$$\mu_{eff} = \mu \left(\frac{p}{p_{ref}} \right)^{(e-1)} - a \ln \frac{\max(v_{rel}, v_{ref})}{v_{ref}} \quad (1)$$

kde μ základní koeficient tření

p_{ref} referenční tlak

e tlakový exponent

a rychlostní faktor

v_{ref} referenční rychlost

v_{rel} relativní rychlost plechu vůči nástroji, se kterým je v kontaktu

Další možností, jak zpřesnit vliv třecích podmínek, je software TriboForm. Obě tyto metody však vyžadují další experimenty pro získání výpočtových koeficientů či změření přesného vlivu rychlosti a tlaku na koeficient tření, což je již nad rámec této práce.

7 Závěr

V diplomové práci jsem se zaměřil na problematiku tvářitelnosti plechů. Jelikož je v dnešní době kladen stále větší důraz na rychlost výroby při zachování dostatečné kvality výrobků, zabýval jsem se vlivem deformační rychlosti na dosažitelnou deformaci výlisku. Cílem bylo porovnat tvářitelnost plechů při zkušebních podmínkách daných normou se zkouškami provedenými většími rychlostmi, které se více přibližují reálným podmínkám lisovacího procesu.

Teoretická část práce je věnována základům tváření. Nejprve jsem se zaměřil na obecné informace vztahující se k této technologii, tedy definici tváření a dělení podle různých kritérií, přičemž téma práce spadá pod technologii plošného tváření. Tyto obecné znalosti jsem dále doplnil o samotný princip plastické deformace, který tváření materiálů umožňuje. Dále jsem se zabýval tvářitelností materiálů a faktory, které jej ovlivňují, přičemž jedním z těchto faktorů je právě deformační rychlost. Tvářitelnost lze hodnotit podle různých kritérií, mezi které se řadí FLD diagram, jehož významem a principem, kterým se stanoví, jsem se následně zabýval. Tento diagram je významný především v automobilovém průmyslu při simulacích lisování plechů, proto je část práce věnována také ocelím využívaným pro stavbu karoserie a numerickým simulacím.

V experimentální části jsem řešil způsob, jakým určit vliv deformační rychlosti na polohu FLC křivky, tedy hraniční křivky FLD diagramu. Pro stanovení FLC křivek, které by tento vliv zaznamenaly, jsem použil zkoušku dle Nakajimy, pro její realizaci zařízení BUP 600 a pro vyhodnocení pak software ARAMIS. Deformační rychlost jsem měnil rychlostí posuvu tažníku. Jejím vyčíslením jsem se nezabýval, ale předpokládal jsem, že pokud budu měnit rychlost posuvu tažníku, bude se měnit i rychlost deformace. Zkoušku jsem vyhodnocoval při třech různých rychlostech tažníku. Výsledky ukázaly, že s rostoucí rychlostí zkoušky se křivka posouvá k nižším hodnotám hlavních deformací, přičemž tento trend byl nejvíce viditelný v oblasti záporných vedlejších deformací. Také jsem pozoroval při vysoké rychlosti deformace zahřátí vzorků a větší změny v systému maziv. Spolu s faktem, že koeficient tření se mění v závislosti na rychlosti a tlaku, mohly mít tyto faktory také vliv na výsledek. Posun FLC křivky při změně rychlosti tedy způsobuje jak deformační rychlost, tak do jisté míry i koeficient tření a deformační teplo. Dalším poznatkem je, že při tvorbě nástříku, který slouží pro vyhodnocení zkoušky softwarem, je pro zkoumaný materiál DX57D vhodnější použít

jako základovou vrstvu bezbarvý matný lak místo bílého nástřiku, který doporučuje norma. To je dáno tím, že tento materiál je lesklý a spolu s černým nástřikem tvoří dostatečný kontrast, přičemž bezbarvý lak zabraňuje odleskům.

Dále jsem se zabýval vlivem změny rychlosti deformace na výsledek numerické simulace v programu AutoForm. Jelikož software potřebuje pro vyhodnocování znát materiálové vlastnosti včetně FLC křivky, nebylo možné experiment reprodukovat a sestavit tak křivky v simulaci. Nicméně šlo zkontrolovat, zda má změna rychlosti posuvu tažníku vliv na velikost výsledné deformace v numerické simulaci. Toto jsem zkoumal pro různé materiálové modely a ukázalo se, že jen u jednoho z nich došlo k výraznému poklesu dosažené deformace. Byl to model, u kterého byly v materiálové kartě stanoveny křivky zpevnění pro různé deformační rychlosti. Také jsem zkoumal, do jaké míry má vliv na výsledek simulace změna koeficientu tření. Dle výsledků má tento faktor značný význam a jeho nárůst způsobuje pokles dosažené deformace v hlavním směru. AutoForm nabízí také využití komplexnější metody stanovení třecího koeficientu, která počítá s vlivem teploty a tlaku, nebo lze pro přesné stanovení chování tribologického systému využít software TriboForm. Tyto možnosti byly již nad rámec mého experimentu, nicméně touto cestou by se dalo vydat pro zpřesnění výsledků numerické simulace a pokračovat v tomto tématu v další práci.

Literatura

- [1] PETRUŽELKA, Jiří a Richard BŘEZINA. *Úvod do tváření I*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2001. ISBN 80-707-8877-1.
- [2] LENFELD, Petr. Technologie tváření kovů. *Technologie II* [online]. Technická univerzita Liberec [cit. 2020-02-23]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm
- [3] BOLJANOVIC, Vukota. *Sheet Metal Forming Processes and Die Design*. New York: Industrial Press, 2004. ISBN 0831131829.
- [4] SCALLAN, Peter. Material evaluation and process selection. *Process Planning* [online]. Elsevier, 2003, 2003, , 109-170 [cit. 2020-02-04]. DOI: 10.1016/B978-075065129-5/50005-2. ISBN 9780750651295. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780750651295500052>
- [5] SCHINDLER, Ivo, Petr KAWULOK a Miroslav LEGERSKI. *Metalurgická tvářitelnost* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2008 [cit. 2020-02-04]. Dostupné online
- [6] SCHINDLER, Ivo a Petr KAWULOK. *DEFORMAČNÍ CHOVÁNÍ MATERIÁLŮ* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2020-02-04]. Dostupné z: https://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-2-metalurgie/deformacni-chovani-materialu/Schindler_Kawulok_Deformacni_chovani_materialu.pdf
- [7] TATÍČEK, František. Vliv materiálu na kvalitu výlisku. *MM Průmyslové spektrum* [online]. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 2018(1) [cit. 2020-02-04]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vliv-materialu-na-kvalitu-vylisku.html>
- [8] TATÍČEK, František. Teorie a metodika tváření [přednášky]. Praha: ČVUT, 2019
- [9] LENFELD, Petr. Technologie plošného tváření - tažení. *Technologie II* [online]. Technická univerzita Liberec [cit. 2020-03-13]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/09.htm

- [10] TATÍČEK, František, Tomáš PILVOUSEK a Martin KUBELKA. Akademie tváření: Hluboké tažení. *MM Průmyslové spektrum* [online]. ČVUT, FS v Praze, **2011**(11) [cit. 2020-03-23]. Dostupné z:
<https://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-hluboke-tazeni.html>
- [11] Measuring Systems: ARAMIS. *GOM* [online]. [cit. 2020-02-04]. Dostupné z:
https://www.gom.com/fileadmin/user_upload/industries/flc_fld_EN.pdf
- [12] JURČIŠIN, Miroslav. Experimentální měření křivky mezních deformací. *MM Průmyslové Spektrum* [online]. **2015**(10) [cit. 2020-02-04]. Dostupné z:
<https://www.mmspektrum.com/clanek/experimentalni-mereni-krivky-meznich-deformaci.html>
- [13] PETRUŽELKA, Jiří a Pavel SONNEK. Tvařitelnost kovových materiálů [online]. 3 Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2006 , poslední aktualizace 9.1.2007
- [14] KIM, S.B., H. HUH, H.H. BOK a M.B. MOON. Forming limit diagram of auto-body steel sheets for high-speed sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2011, **211**(5), 851-862 [cit. 2020-02-04]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.01.006. ISSN 09240136. Dostupné z:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092401361000018X>
- [15] BONG, Hyuk Jong, Frédéric BARLAT, Myoung-Gyu LEE a Deok Chan AHN. The forming limit diagram of ferritic stainless steel sheets: Experiments and modeling. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 2012, **64**(1), 1-10 [cit. 2020-02-04]. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2012.08.009. ISSN 00207403. Dostupné z:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020740312001944>
- [16] ČSN EN ISO 12004-2. *Kovové materiály -Plechý a pásy -Stanovení křivek mezní tvářitelnosti -Část 2: Stanovení křivek mezní tvářitelnosti v laboratoři.* Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.

- [17] EMANUELA, Affronti a Merklein MARION. Metallographic Analysis of Nakajima Tests for the Evaluation of the Failure Developments. *Procedia Engineering* [online]. 2017, **183**(1-3), 83-88 [cit. 2020-02-04]. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.015. ISSN 18777058. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705817315205>
- [18] *Scheme of the Nakajima test according to EN ISO 12004-2* [online]. [cit. 2020-02-04]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Scheme-of-the-Nakajima-test-according-to-EN-ISO-12004-2_fig1_291141018
- [19] Material Characterization. *NETFORM Engineering* [online]. [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: <http://www.netformmetal.com/material-characterization>
- [20] Jak funguje princip měření DIC. *Dantec Dynamics* [online]. [cit. 2020-02-29]. Dostupné z: <https://www.mereni-deformaci.cz/jak-funguje-princip-mereni-dic/>
- [21] Multikamerové DIC měření. *Dantec Dynamics* [online]. [cit. 2020-02-29]. Dostupné z: <https://www.mereni-deformaci.cz/multikamerove-dic/>
- [22] SEBERA, Václav a Jan TIPPNER. Optické měření deformace metodou korelace digitálního obrazu. *Lesnická a dřevařská fakulta* [online]. Mendelova univerzita v Brně, 2012 [cit. 2020-02-29]. Dostupné z: https://fraxinus.mendelu.cz/vyuka/soubory/TMZD_NMS/Povinne_volitelne_predmety/Analyza_obrazu_dreva/Opticke%20mereni%20deformace%20metodou%20korelace%20digitalniho%20obrazu.pdf
- [23] Digital Image Correlation: Overview of Principles and Software. *Correlated Solutions* [online]. [cit. 2020-02-29]. Dostupné z: <http://www.correlatedsolutions.com/supportcontent/condensed-shortcourse.pdf>
- [24] ARAMIS [online]. MCAE [cit. 2020-02-08]. Dostupné z: <https://www.mcae.cz/cs/produkty/ARAMIS-opticky-system-pro-analyzu-3d-pohybu-a-3d-deformaci/>
- [25] Material Properties - FLC. *GOM* [online]. [cit. 2020-02-08]. Dostupné z: <https://www.gom.com/industries/sheet-metal-forming/material-propertiesflc.html>

- [26] Combination of digital image correlation and thermographic measurements. *GOM* [online]. [cit. 2020-02-08]. Dostupné z: https://www.gom.com/fileadmin/user_upload/industries/gom_applicationnote_infratec_en.pdf
- [27] BANABIC, Dorel. *Sheet metal forming processes: constitutive modelling and numerical simulation* [online]. Berlin: Springer, 2010 [cit. 2020-03-16]. ISBN 978-3-540-88113-1.
- [28] ŠIMON, Petr. Karosérie osobního automobilu. 2015, ŠkodaAuto a. s. [online]. [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/18241549-Karoserie-osobniho-automobilu-ing-petr-simon-skoda-auto-a-s-04-03-2015.html>
- [29] FOREJTOVÁ, Lucie, Ladislav KOLAŘÍK, Jan SUCHÁNEK, Marie KOLAŘÍKOVÁ a Tomáš PILVOUSEK. Svařitelnost ocelí pro automobilové karosérie. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha Fakulta strojní: ČVUT, 2017, 08. 03. 2017 [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/svaritelnost-oceli-pro-automobilove-karoserie.html>
- [30] MAZANCOVÁ, Eva. *Technické materiály I: učební text* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012 [cit. 2020-03-07]. ISBN 978-80-248-2577-9.
- [31] GIRMAN, Vladimír a Valentína HRABČÁKOVÁ. Kovové materiály automobilových konstrukcí - II Karoséria a karosářenské plechy. *Materials Engineer / Materiálový inžinier* [online]. Košice: UPJŠ [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: https://www.materialing.com/materialy_auto_konstrukcii
- [32] Advanced High-Strength Steels: Application Guidelines Verson 6.0 [online]. WorldAutoSteel, 2017, April 2017 [cit. 2020-03-07]. Dostupné online
- [33] Multi Phase Twinning-Induced Plasticity (TWIP) Steel. *Total Materia* [online]. 2007 [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&LN=CZ&site=kts&NM=%20207>

- [34] TISZA, M. Numerical modelling and simulation in sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2004, **151**(1-3), 58-62 [cit. 2020-03-16]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.009. ISSN 09240136. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013604003073>
- [35] BANABIC, Dorel. *Sheet metal forming processes: constitutive modelling and numerical simulation* [online]. Berlin: Springer, 2010 [cit. 2020-03-16]. ISBN 978-3-540-88113-1.
- [36] Počítačová simulace tváření plechů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. **2001**(7) [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/pocitacova-simulace-tvareni-plechu.html>
- [37] ŠPANIEL, Miroslav a Zdeněk HORÁK. *Úvod do metody konečných prvků*. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 9788001046654.
- [38] AutoForm Software. *StampingSimulation* [online]. [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: <https://stampingsimulation.com/autoform-software/>
- [39] Návrh formy pro hluboké tažení plechů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. **2001**(4) [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/navrh-formy-pro-hluboke-tazeni-plechu.html>
- [40] AutoForm Profile. *AutoForm* [online]. [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: <https://www.autoform.com/en/company/profile/>
- [41] AutoForm-Sigma. *AutoForm* [online]. [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: <https://www.autoform.com/en/products/autoform-forming/autoform-sigma>
- [42] AutoForm-StampingAdviser. *AutoForm* [online]. [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: <https://www.autoform.com/en/products/autoform-forming/autoform-stampingadviser/>
- [43] AutoForm-DieDesigner. *AutoForm* [online]. [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: <https://www.autoform.com/en/products/autoform-forming/autoform-diedesigner/>

- [44] Product Information: BUP 400 / BUP 600 Sheet Metal Testing Machines for testControl II. *ZwickRoell* [online]. [cit. 2020-03-28]. Dostupné z: https://www.zwickroell.com/-/media/files/sharepoint/vertriebsdoku_pi/11_933_bup_400_bup_600_testcontrol_ii_pi_en.pdf
- [45] *ARAMIS: User Information - Hardware*. Braunschweig: GOM, 2018. Dostupné z: www.gom.com
- [46] Ocelové plechy válcované za studena žárově pozinkované. *ALFUN* [online]. [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: <http://www.alfun.cz/plechy-valcovane-za-studena-zarove-pozinkovane>
- [47] DX57D. *Salzgitter Flachstahl GmbH* [online]. [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: https://www.salzgitter-flachstahl.de/fileadmin/footage/MEDIA/gesellschaften/szfg/informationmaterial/produktinformationen/feuerverzinkte_produkte/eng/dx57d.pdf
- [48] Drawing teels. *U. S. Steel Košice* [online]. [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: <https://www.usske.sk/en/products/hot-dip-galvanized/drawing-steels>
- [49] KŘÍŽ, Tomáš. *Vliv způsobu přípravy zkušebního vzorku na deformace zjišťované systémem ARAMIS*. Praha, 2019. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce František Tatiček.
- [50] SIGVANT, M, J PILTHAMMAR, J HOL, J H WIEBENGA, T CHEZAN, B CARLEER a A H VAN DEN BOOGAARD. Friction and lubrication modeling in sheet metal forming simulations of a Volvo XC90 inner door. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2016, **159** [cit. 2020-06-21]. DOI: 10.1088/1757-899X/159/1/012021. ISSN 1757-8981. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/159/1/012021>

Seznam obrázků

Obr. 2-1 Schéma pružné (elastické) a trvalé (plastické) deformace [2]	12
Obr. 2-2 Rozdělení dislokací [2]	13
Obr. 2-3 Vliv hustoty dislokací na pevnost materiálu [2]	13
Obr. 2-4 Vliv teploty na tváritelnost materiálů [5]	16
Obr. 2-5 Kolmogorovův diagram [5]	17
Obr. 2-6 Tažení bez přidržovače (vlevo) a s přidržovačem (vpravo) [9]	18
Obr. 2-7 KEELER-GOODWINův diagram ve skutečných deformacích [13]	19
Obr. 2-8 Typické deformační stopy při plošném tváření [13]	19
Obr. 2-9 Závislost polohy FLC na tloušťce materiálu [13]	20
Obr. 2-10 Závislost polohy FLC na mezi kluzu [13]	20
Obr. 2-11 Schéma zkoušky Nakajima [18]	21
Obr. 2-12 Geometrie zkušební tělesa	22
Obr. 2-13 Geometrie zkušebních vzorků odpovídající určité deformaci [19]	22
Obr. 2-14 Orientace dřívku ke směru válcování	23
Obr. 2-15 Princip dvourozměrné korelace [23]	24
Obr. 2-16 Sledování zvoleného bodu [23]	24
Obr. 2-17 Posun subsetu [23]	24
Obr. 2-18 Příklad vyhodnocení obrazce [23]	25
Obr. 2-19 Interpolace snímku [23]	25
Obr. 2-20 Princip třírozměrné korelace [23]	26
Obr. 2-21 Příklad náhodného rastru	27
Obr. 2-22 Definice správného nástřiku [23]	27
Obr. 2-23 Princip stanovení limitní deformace z naměřených hodnot [27]	28
Obr. 2-24 Porovnání celkové tažnosti a meze kluzu jednotlivých druhů ocelí [29]	29
Obr. 3-1 Zkušební zařízení	35
Obr. 3-2 Kalibrační destička GOM/CP 20/MV 55x44 mm ²	36
Obr. 3-3 Geometrie zkušebních vzorků	38
Obr. 3-4 Kontrola tloušťky vzorků	38
Obr. 3-5 Přípravky použité pro odmašťování a tvorbu patternu	39
Obr. 3-6 Vzorky před a po nanesení patternu	40
Obr. 3-7 Kontrolní panel s parametry zkoušky	41
Obr. 3-8 Ukázka z kalibrace 1	41

Obr. 3-9 Ukázka z kalibrace 2	41
Obr. 4-1 Ukázka kluzné vrstvy nanesené na tažník	42
Obr. 4-2 Kontrola kvality patternu	43
Obr. 4-3 Uzavření zkušební komory	43
Obr. 4-4 Zkušební komora před a po vysunutí přidržovače	44
Obr. 4-5 Vzorek s trhlinou po uskutečnění zkoušky	44
Obr. 4-6 Vyhodnocení zkoušky	45
Obr. 4-7 Získání výsledných deformací proložením křivky regresní inverzní parabolou	45
Obr. 5-1 Vliv rychlosti a tlaku na koeficient tření při různých stupních napětí [50]	48
Obr. 5-2 Vizuální porovnání vzorku taženého rychlostí 2 mm/s a 15 mm/s	49
Obr. 6-1 Sestava nástrojů	50
Obr. 6-2 Porovnání hlavní deformace pro rychlost nástroje 1 mm/s (nahore) a 200 mm/s (dole) pro materiálový model DX57 Tata Steel Strainrate Sensitive v programu AutoForm	52

Seznam tabulek

Tab. 3-1 Základní údaje o senzoru ARAMIS 4M rev03 (rozsah platný pro objektivy 20 m, 24 mm a 100 mm) [45]	34
Tab. 3-2 Rozsahy měření pro ARAMIS 4M rev03	36
Tab. 3-3 Chemické složení dle ČSN EN 10346	37
Tab. 3-4 Mechanické vlastnosti dle ČSN EN 10346	37
Tab. 5-1 Výsledné hodnoty deformací pro různé geometrie a rychlosti zkoušky	47
Tab. 5-2 Vliv rychlosti tažení na dosažený zdvih při porušení vzorku.....	49
Tab. 6-1 Vliv rychlosti deformace pro různé materiálové modely v numerické simulaci	51
Tab. 6-2 Vliv koeficientu tření na deformaci	53

Seznam příloh (CD)

Příloha 1 - Geometrie vzorků

Příloha 2 - Kalibrační protokol

Příloha 3 - Naměřené hodnoty

Příloha 4 - Numerická simulace