



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINING TECHNOLOGY

TAŽENÍ PLECHU A JEHO VERIFIKACE POČÍTAČOVOU SIMULACÍ

SHEET METAL DRAWING AND ITS VERIFICATION BY COMPUTER SIMULATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. FILIP NĚNIČKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. MAREK ŠTRONER, PH.D

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Filip Něnička

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie a průmyslový management (2303T005)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Tažení plechu a jeho verifikace počítačovou simulací

v anglickém jazyce:

Sheet metal drawing and its verification by computer simulation

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zajištění mechanických vlastností materiálů potřebných pro zadání do numerické simulace tvářecího procesu v programu AutoForm R2 a pro porovnání s bezkontaktním měřícím systémem Argus. Hodnocení výlisku (nebo jeho oblastí) z hlediska kritérií lisovatelnosti (ztenčení, deformace, zvlnění atd.) v programu AutoForm R2. Vyhodnocení výlisku vzhledem k limitním hodnotám v FLD diagramu. Vyhodnocení reálných výsledků tažení získaných analýzou deformačních sítí pomocí bezkontaktního měřícího systému Argus. Porovnání výsledků získaných pomocí numerické simulace v programu AutoForm R2 a bezkontaktním měřícím systémem Argus.

Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce je určení odchylky mezi numerickou simulací tažení v programu AutoForm R2 a reálnými výsledky zjištěnými pomocí bezkontaktního měřícího systému Argus

Seznam odborné literatury:

1. DVOŘÁK, Milan., GAJDOŠ, František., NOVOTNÝ, Karel. Technologie tváření : plošné a objemové tváření. 2. vyd. Brno : CERM, 2007. 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.
2. FOREJT, Milan. Teorie tváření a nástroje. 1. vyd. Brno : VUT, 2001. 187s. ISBN 80-214-0294-6.
3. HAŠEK, Vladimír. Kování. 1. vyd. Praha : SNTL, 1980. 730 s. TISK. ISBN 04-233-65.
4. NOVOTNÝ, Karel. Tvářecí nástroje. 1. vyd. Brno : VUT, 1992. 186 s. ISBN 80-214-0401-9.
5. MACHÁČEK Zdeněk a NOVOTNÝ Karel. Speciální technologie I. -Plošné a objemové tváření. 1.vyd. Brno: VUT-FSI, 1986, 168s. 55-552/1-86

Vedoucí diplomové práce: Ing. Marek Štroner, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 18.11.2011

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

Licenční smlouva

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá stanovením odchylky mezi numerickou simulací procesu tažení provedenou za pomoci softwaru AutoForm R2 od švýcarské firmy AutoForm Engineering a reálnými výsledky zjištěnými pomocí bezkontaktního měřicího systému Argus od německé firmy GOM. Pro srovnání byl použit materiál DC06, jehož mechanické vlastnosti byly stanoveny na Technické Univerzitě v Liberci pomocí bezkontaktního optického systému od německé firmy GOM. Výsledkem je srovnání simulací spočítané a reálné tloušťky plechu.

Klíčová slova

AutoForm, Argus, hluboké tažení, hlubokotažné oceli, pattern, numerická simulace

ABSTRACT

This thesis engages on the differences between the numerical simulations of sheet metal drawing process performed using AutoForm software from AutoForm Engineering, Swiss company and actual results measured using non-contact measurement system Argus from German GOM company. This work used DC06 material (whose mechanical properties were determined at Technical University of Liberec) for comparison. The calculated results of simulations were compared to measured results of actual plate thickness.

Key words

Autoform, Argus, deep drawing, deep drawing steel, pattern, numerical simulation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NĚNIČKA, F. *Tažení plechu a jeho verifikace počítačovou simulací*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 71 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marek Štroner, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Tažení plechu a jeho verifikace počítačovou simulací vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

25.5.2012

.....
Bc. Filip Něnička

Poděkování

Děkuji tímto zejména vedoucímu této diplomové práce Ing. Marku Štronerovi Ph.D. za cenné rady a připomínky při vypracování diplomové práce.

Děkuji tímto Ing. Ottovi Kučerovi za jeho odborný dohled a cenné rady k diplomové práci. Dále děkuji za podělení se o své zkušenosti z oblasti tváření, které mně velmi pomohli při sepsání této práce.

Děkuji tímto Ing. Tomáši Pilvouškovi a Ing. Milanovi Dvořákovi za pomoc při vypracování teoretické a hlavně experimentální části této práce. Děkuji jim za odborné rady a za trpělivost.

Děkuji tímto Ing. Lukáši Horákovi za odborné připomínky při vypracování diplomové práce.

V neposlední řadě děkuji svým rodičům, kteří mi umožnili studium na VUT v Brně. Dále všem rodinným příslušníkům, kamarádům a všem, kteří mě podporovali ve studiu.

--

OBSAH

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah.....	8
Úvod	10
1 Vývoj lisovacího nástroje	11
1.1 Lisovatelnost.....	11
1.2 Metodický plán – vytvoření tahového modelu	12
1.3 Konstrukce nástroje	12
1.4 Zapracování	13
2 Deformační chování materiálu.....	14
2.1 Krystalografická struktura kovů.....	14
2.1.1 Poruchy krystalické mřížky	15
2.1.2 Bodové poruchy.....	15
2.1.3 Čárové poruchy	16
2.1.4 Plošné poruchy	16
2.2 Elastická a plastická deformace	17
2.2.1 Elastická deformace.....	17
2.2.2 Plastická deformace.....	18
3 Sortiment plechů používaných v automobilovém průmyslu.....	20
3.1 Vlastnosti plechů	20
3.2 Hlubokotažné oceli	21
3.2.1 Hlubokotažné plechy z ocelí uklidněných hliníkem	21
3.2.2 Plechy z IF (Interstitials Free) ocelí bez intersticií.....	22
3.2.3 Oceli s BH (Bake hardened) efektem	22
3.2.4 Oceli se zvýšeným obsahem titanu, resp. niobu.....	22
3.2.5 Oceli se zvýšeným obsahem uhlíku.....	22
3.3 Vysokopevnostní materiály	22
3.3.1 DP(Dual Phase) oceli	23
3.3.2 TRIP(Transformation Induced Plasticity) oceli.....	23
3.3.3 TWIP(TWinning Induced Plasticity) oceli	24
3.3.4 CP (Complex Phase) oceli.....	24
3.3.5 Martenzitické oceli.....	24
4 Bezkontaktní optické systémy – fotogrammetrie	25
4.1 Princip fotogrammetrie	25
4.2 Měření optickými systémy	26
4.2.1 Měřicí systém Argus	26
4.2.2 Měřicí systém ARAMIS	28
5 Diagramy mezního přetvoření	30
5.1 Ukazatele diagramů mezních přetvoření.....	30
5.2 Způsoby zjišťování diagramů mezních přetvoření	31
5.2.1 Zkouška hloubením podle Erichsena	32
5.2.2 Kalíškový test (zkouška AEG nebo Schmiedtova)	32
5.2.2 Kalíškový test s přidržením příruby podle Gross – Engelhardta.....	33
6 Numerická simulace tvářecího procesu	34
6.1 Využití numerické simulace	34

6.3 AutoForm	34
6.4 Vyhodnocování numerických simulací	35
7 Experimentální část	38
7.1 Cíle diplomové práce	38
7.2 Použitý materiál	38
7.2.1 Zadání mechanických hodnot do systémů AutoForm a Argus	39
7.3 Měření skutečných hodnot ϕ_3	41
7.3.1 Výběr oblasti zájmu	41
7.3.2 Nanášení deformační sítě	41
7.3.3 Import deformační sítě - Argus	41
7.3.4 Lisování plechu, focení deformační sítě, výpočet	42
7.4 Porovnání hodnot ztenčení pomocí vybraných bodů	43
7.4.1 Porovnání hodnot ztenčení pomocí bodů oblast 1	45
7.4.2 Porovnání hodnot ztenčení pomocí bodů oblast 2	49
7.4.3 Porovnání hodnot ztenčení pomocí bodů oblast 3	51
7.4.4 Porovnání hodnot pomocí bodů oblasti 4	54
7.5 Porovnání hodnot ztenčení pomocí řezů	58
7.5.1 Porovnání hodnot ztenčení pomocí řezu v oblasti 1	59
7.5.2 Porovnání hodnot ztenčení pomocí řezu v oblasti 2	60
7.5.3 Porovnání hodnot ztenčení pomocí řezu 1 v oblasti 3	61
7.5.4 Porovnání hodnot ztenčení pomocí řezu 2 v oblasti 3	62
7.5.5 Porovnání hodnot ztenčení pomocí řezu 1 v oblasti 4	63
7.5.6 Porovnání hodnot ztenčení pomocí řezu 2 v oblasti 4	64
Závěr	65
Seznam použitých zdrojů	67
Seznam použitých zkratk a symbolů	69
Seznam příloh	71

ÚVOD

Automobilový průmysl je nyní ve fázi dynamického vývoje. Počet kmenových zaměstnanců v automobilovém průmyslu v České republice překročil v roce 2011 hranici 110 000 lidí. Je patrné, že automobilový průmysl tvoří významnou část ekonomiky České republiky, stejně jako v dalších vyspělých státech orientujících se na automobilový průmysl.[2]

Vzhledem k rostoucí konkurenci je pro automobilky důležitý vývoj nových technologií, především takových, které povedou ke zvyšování kvality výrobku zároveň se snížením výrobních nákladů.

Jednou z oblastí, která se dynamicky vyvíjí, je technologie plošného tváření. Technologie plošného tváření je jednou z nejprogresivnějších výrobních metod. V automobilovém průmyslu se využívá především pro lisování vnějších dílů karoserie.

Velký důraz je kladen na kvalitu výlisků, především vnějších pohledových dílů, což zvyšuje poptávku po vývoji stále přesnějších numerických simulačních programů. Ty napomáhají dosažení kvalitních výsledků v kratším čase. Mezi tyto programy patří např. AutoForm, Pam-stamp a další, díky nimž je možné zajistit vyrobitelnost a jistou úroveň kvality výlisku již na prototypovém nářadí bez nutnosti velkých konstrukčních zásahů. Ve výsledku vedou numerické simulace ke snížení výrobních nákladů lisovacího nářadí.

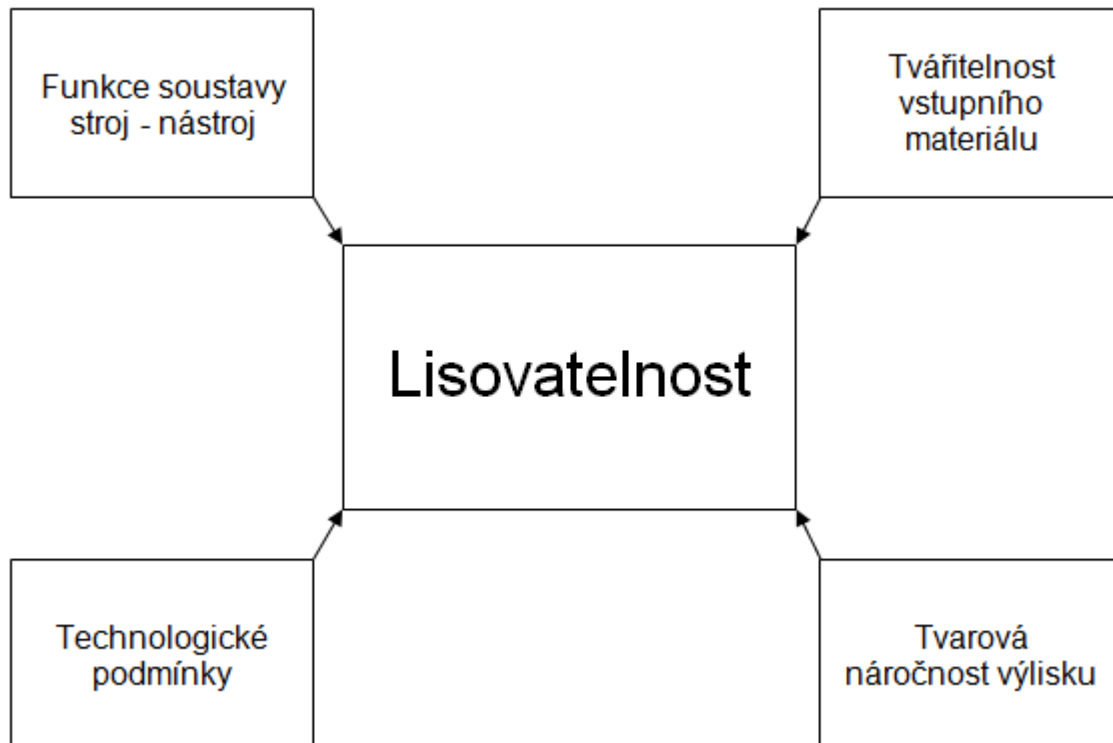
Cílem této diplomové práce je určení odchylky mezi numerickou simulací tažení v programu AutoForm R2 a reálnými výsledky zjištěnými pomocí bezkontaktního měřicího systému Argus.

1 VÝVOJ LISOVACÍHO NÁSTROJE

Uvádění nového nástroje do provozu je velice složitá a časově náročná záležitost. Vývoj lisovacího nástroje začíná posouzením lisovatelnosti plechového dílu. Na posouzení lisovatelnosti navazuje tvorba metodického plánu. Po schválení metodického plánu je vytvořen 3D model nástroje pomocí programu Catia V5 od francouzské firmy Dassault Systemes. Po výrobě nástroje je nutné jeho zapracování. Poté je nástroj připraven na nasazení do systému výroby.[25]

1.1 Lisovatelnost

Tažení výlisku nepravidelných tvarů představuje z technologického hlediska velice širokou problematiku. Při vývoji lisovacího nástroje je nejprve nutné řešit „lisovatelnost“. Tento pojem v sobě zahrnuje celou řadu prvků vlastního procesu lisování. V lisovatelnosti se posuzuje tvářitelnost vstupního materiálu, tvarová náročnost výlisku, technologické podmínky a rovněž funkce soustavy stroj – nástroj. [25]



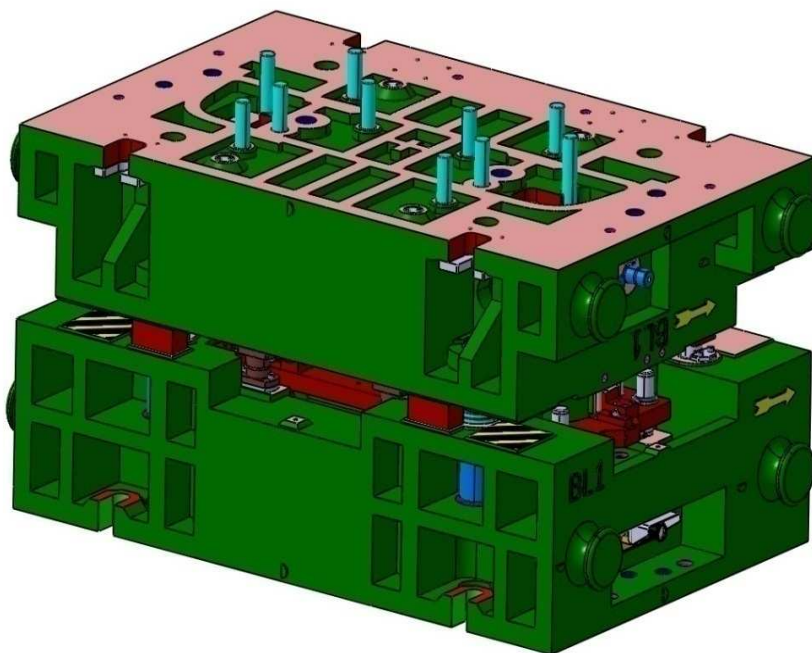
Obr. 1.1 Lisovatelnost [24]

1.2 Metodický plán – vytvoření tahového modelu

V této fázi vývoje je vytvořena konstrukce tahového modelu v programu Catia V5. Jsou vytvořeny CAD data pro simulaci tažení a simulaci tváření v dalších operacích. Po simulacích v programu AutoForm R2 od švýcarské firmy AutoForm Engineering je simulace vyhodnocena dle kritérií uvedených v kapitole 6.4 a jsou provedeny úpravy. Simulace se několikrát opakuje až do požadovaného výsledku. Poté je metodický plán posouzen grémiem odborníků a po případných opravách je převzat. [25]

1.3 Konstrukce nástroje

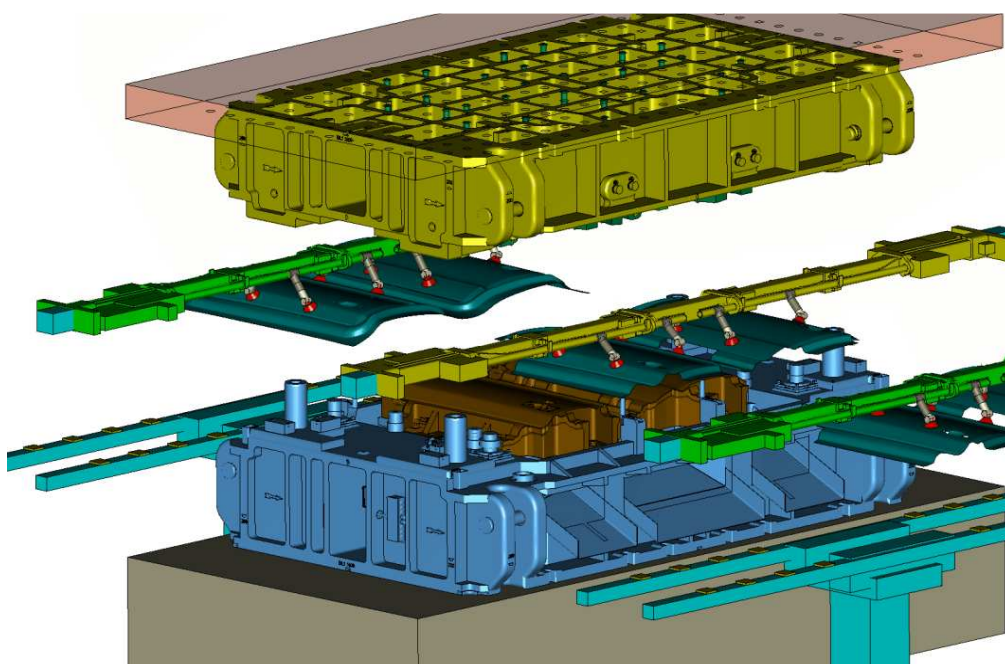
Tvorba nástroje probíhá většinou modifikací parametrů referenčního nástroje pomocí programu Catia V5. Konstrukce je tvořena v montážních celcích (vrchní díl, spodní díl, přídržovač, klíny atd.). Pro každý montážní celek jednoho nářadí se vytváří vlastní 3D solid model s namontovanými díly. 3D solid musí splňovat nároky na bez výkresovou dokumentaci, musí obsahovat informace o způsobu opracování litiny, chemicko-tepelném zpracování atd. [25]



Obr. 1.1 3D solid nástroje [25]

Následuje kontrola z hlediska pevnosti lisovacího nástroje při přenášení. Kontrolní výpočet je proveden pomocí programu Catia V5 a jeho modulu Generativ Structural Analysis. Cílem těchto kontrol je úspora materiálu v případě předimenzování materiálu a zamezení havárie při poddimenzování materiálu. [25]

Poté je provedena simulace kinematiky nástrojů – stamping. Při této simulaci dojde k prověření a detekování kolizních míst při pohybu dílů nástroje a při průchodu výlisku lisovací linkou. [25]



Obr. 1.2 Simulace průchodu výlisku lisovací linkou [25]

1.4 Zapracování

Zapracování je proces uvádění nového nástroje do provozu. Je to velice komplikovaná, obtížná a časově náročná záležitost. Nejdůležitější činností zapracování je tušírování. Je to slícování tvarových a rovinných ploch broušením. Vzájemný dotyk ploch se určuje otiskem jedné části na druhou. Nástroj musí vykazovat dokonalý otisk v celém rozsahu záběru činných částí. Cílem zapracování je spolehlivě fungující nástroj, který po celou svou životnost vykazuje minimální zmetkovitost. [25,28]

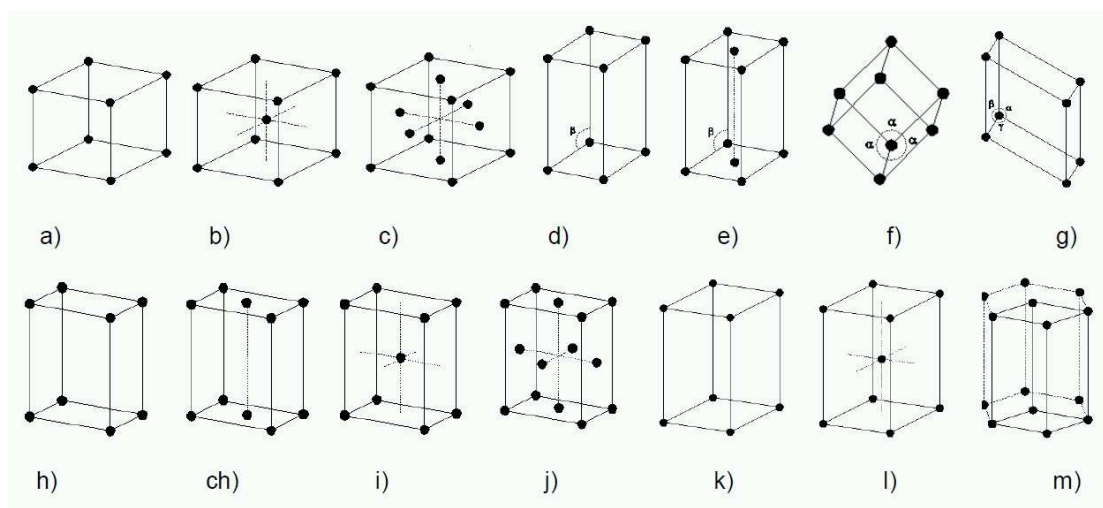
2 DEFORMAČNÍ CHOVÁNÍ MATERIÁLU

Deformační chování je typické pro veškerý materiál. Vlivem vnějšího působení sil dochází ke změně tvaru tělesa – deformaci. U kovových materiálů nejdříve dochází k elastické deformaci, která je vratná. Po překročení meze elasticity dochází k plastické deformaci, která je nevratná. [2]

2.1 Krystalografická struktura kovů

U většiny kovů a jejich slitin jsou atomy v prostoru uspořádány pravidelně. Toto uspořádání se nazývá krystalografická struktura. Základním stavebním prvkem krystalografické struktury kovů je krystalická mřížka. Krystalická mřížka je množina bodů. Každý bod reprezentuje atom. Geometrické uspořádání atomů v krystalické mřížce je definováno třemi základními podmínkami: principem nejmenšího objemu, principem nejvyšší souměrnosti a principem nejkratších spojnic.[1,2,3]

V trojrozměrném prostoru existuje 14 krystalických mřížek (viz. Obr. 2.1), které jsou uspořádány v 7 krystalografických soustavách. Většina technicky používaných kovů je uspořádána ve třech krystalografických soustavách: mřížka kubická prostorově centrovaná, mřížka kubická prostá, hexagonální těsně uspořádaná struktura.[1,2,3]



Obr. 2.1 Krystalografické mřížky [4]

a) kubická prostá, b) kubická prostorově centrovaná, c) kubická plošně centrovaná, d) monoklinická prostá, e) monoklinická bazálně centrovaná, f) romboedrická prostá, g) triklinická prostá, h) ortorombická prostá, ch) ortorombická bazálně centrovaná,

i) ortorombická prostorově centrovaná, j) ortorombická plošně centrovaná,
k) tetragonální prostá, l) tetragonální prostorově centrovaná, m) hexagonální bazálně
centrovaná

2.1.1 Poruchy krystalické mřížky

Některé vlastnosti krystalu jsou závislé nejen na uspořádání atomů v prostoru a druhu jejich vazby, ale i na porušení pravidelnosti jejich uspořádání v krystalické mřížce a na chování těchto vad. Tyto vady mají vliv na mechanické vlastnosti materiálu a jsou nežádoucí. V případě dislokací toto neplatí. Vznik, pohyb a zánik dislokací usnadňuje proces plastické deformace. Tyto poruchy jsou proto důležité pro proces tváření. Poruchy krystalové struktury dělíme podle prostorového hlediska na poruchy bodové, čárové, plošné a prostorové. [1,2,9]

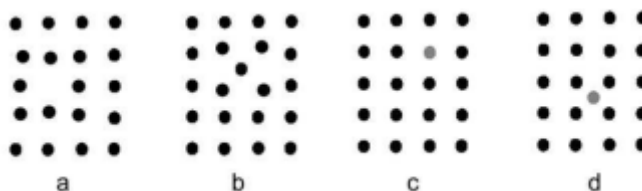
2.1.2 Bodové poruchy

Do základních bodových poruch v čistých kovech řadíme vakance a intersticiály. Tvarově podobné jsou ještě substituční a intersticiální příměsi. V okolí bodových poruch dochází k vzniku elastických napětí mřížky. [1,2]

Vakance vzniká neobsazením uzlové polohy mřížky. Koncentrace vakanců je závislá na teplotě a s rostoucí teplotou jejich koncentrace roste.

Intersticiál vzniká umístěním atomu do polohy mezi mřížkovými atomy. Obdobně jako u vakanců, koncentrace intersticiálů roste s rostoucí teplotou. Vakance i intersticiály jsou rovnovážné poruchy. Při každé teplotě je jejich koncentrace rovnovážná. [1,2]

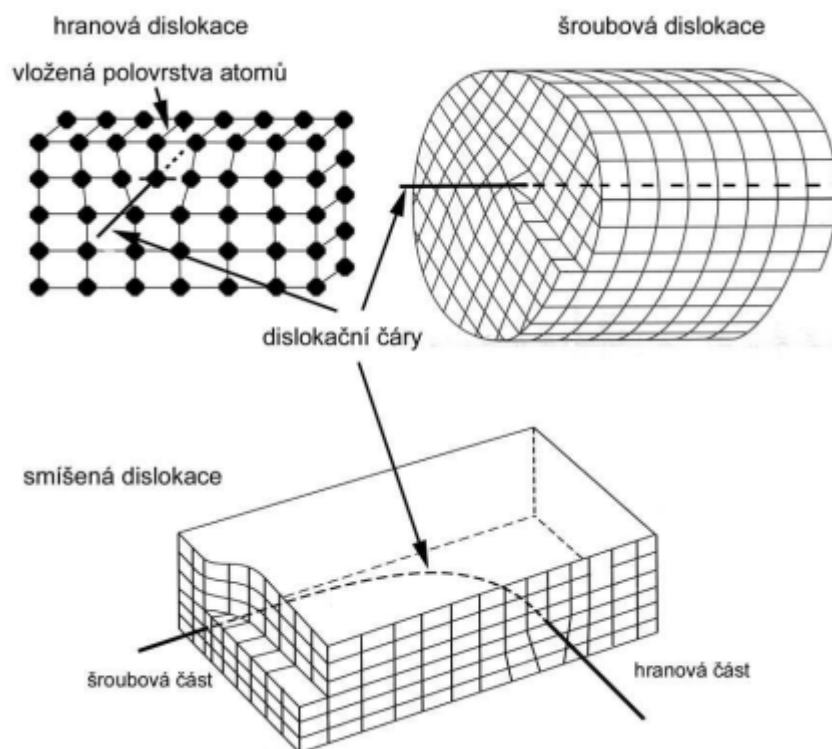
Bodové poruchy se mohou pohybovat krystalem. Vakance se pohybují diskrétními přeskoky z jednoho uzlového bodu do druhého. Intersticiály se pohybují přeskoky mezi intersticiálními polohami. [1,2]



Obr. 2.2 Bodové poruchy krystalové struktury: a) vakanec, b) intersticiál, c) substituce, d) intersticiál příměsí[1]

2.1.3 Čárové poruchy

Čárové poruchy vznikají přesunutím určitého množství atomů při skluzovém pohybu vzhledem k sousední vrstvě. Tyto poruchy se nazývají dislokace. Dislokace jsou přítomny vždy a vznikají již za tuhnutí kovů. Dislokace se dělí na hranové a šroubové. Hranovou dislokaci si můžeme představit jako okraj polovrstvy atomů vložené do krystalu. Šroubovou dislokaci si můžeme představit tak, že krystal ve tvaru válce nařizneme rovnoběžně s osou až k jeho středu. Čistě hranové a šroubové dislokace se v reálných krystalech nevyskytují, ale obvykle bývají smíšeného typu. Pohyb dislokací je spojen s plastickou deformací kovů. Dislokace se mohou pohybovat skluzem a šplháním.[1,2]



Obr. 2.3 Model hranové, šroubové a smíšené dislokace [1]

2.1.4 Plošné poruchy

Mezi plošné poruchy řadíme vrstevné chyby, vnitřní rozhraní (maloúhlové a velkoúhlové hranice zrn) a povrch krystalu. Hranice zrn vznikají při tuhnutí kovu. Krystalické zárodky vznikají na různých místech a krystaly rostou, až do okamžiku, kdy se vzájemně spojí. Podle velikosti desorientace sousedních krystalových mřížek rozlišujeme maloúhlové a velkoúhlové

hranice. Hranice zrn, jejichž desorientace dosahuje hodnoty asi 10° nazýváme malouhlové hranice. V případě desorientace krystalové mřížky o více než $10 - 15^\circ$, je tato hranice zrn nazývána velkouhlová. Polo ha sousedních zrn může být i taková, že některé krystalografické směry v obou směrech mohou být shodné. Takováto hranice se nazývá koincidentní. Hranice je místem zvýšené koncentrace bodových i čárových poruch. V místě hranice je proto typická zvýšená rychlost difúze. [1,2]

Plošná porucha na povrchu krystalu je tvořená plochou, která je tvořena vrstvou slaběji vázaných atomů, než je vnitřek krystalu. Na povrchu krystalu probíhá difúze rychleji než uvnitř krystalu. Při mechanickém namáhání je na povrchu materiálu tenká, silně plasticky zdeformovaná vrstva tzv. Beilbyho vrstva.[1,2]

2.2 Elastická a plastická deformace

Působením vnějších sil dochází k deformaci tělesa. Těleso mění svůj tvar. Deformace je rozdělena na deformaci vratnou (elastická deformace) a deformaci nevratnou (plastická deformace).[2]

2.2.1 Elastická deformace

Zatěžujeme - li těleso tak, že po odlehčení nabývá těleso původní tvar a objem, hovoříme o elastické (pružné deformaci). Elastická deformace je způsobena relativně malým posunem atomů kolem rovnovážných poloh v krystalické mřížce. Pro popis průběhu elastické deformace platí v případě tahového napětí a poměrné deformace Hookeův zákon[2].

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.1)$$

σ ... napětí[MPa]

E ... Yongův modul pružnosti v tahu.....[MPa]

ε ... poměrné prodloužení [-]

Poměrné prodloužení ε je dáno poměrem změny délky ΔL k původní délce tyče L_0 . [2]

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.2)$$

Mezi smykovým napětím a smykovou deformací platí vztah[2]:

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (2.3)$$

τ ... smyková složka napětí[MPa]

G ... modul pružnosti ve smyku[MPa]

γ ... zkos[-]

Hodnoty modulu pružnosti jsou závislé jednak na typu vazby a jednak na uspořádání atomů v prostoru (viz. Tab. 2.1).[2]

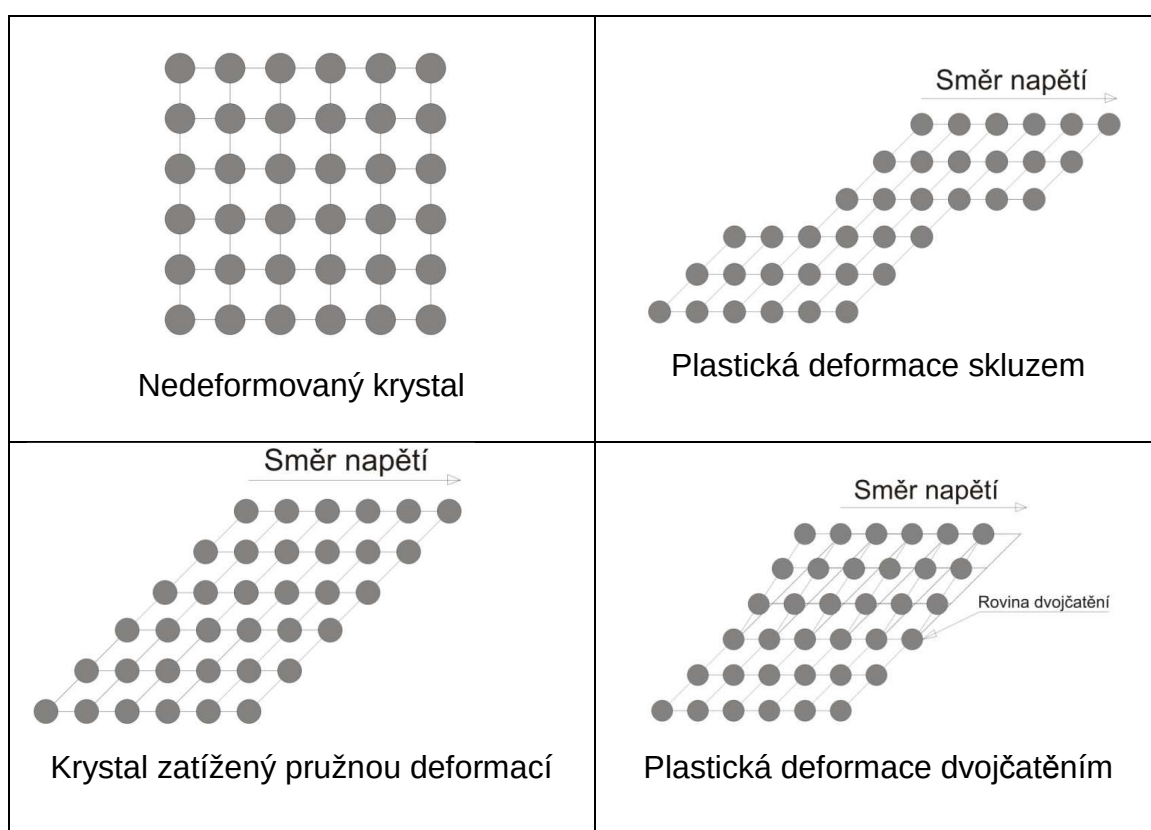
Tab. 2.1 Moduly pružnosti vybraných materiálů[2]

Materiál/typ vazby	Modul E [MPa]	Materiál/typ vazby	Modul E [MPa]
<i>Keramika / kovalentní</i>		<i>Kovy/kovová</i>	
Diamant	10^6	Wolfram	$4,1 \cdot 10^5$
Karbid wolframu	$(4,5 - 6,5) \cdot 10^5$	Molybden	$(3,2-3,6) \cdot 10^5$
Karbid křemíku	$4,5 \cdot 10^5$	Železo	$(1,9-2,1) \cdot 10^5$
<i>Keramika / iontová</i>		Měď	$(1,2-1,5) \cdot 10^5$
Korund Al_2O_3	$3,9 \cdot 10^5$	Hliník	$(6,9-7,9) \cdot 10^4$
Křemenné sklo	$9,4 \cdot 10^4$	Olovo	$1,4 \cdot 10^4$
Sodné sklo	$6,9 \cdot 10^4$	<i>Plasty/směs</i>	
<i>Keramika/sek. vazba</i>		Nylon	$(2-4) \cdot 10^3$
Led, H_2O	$9,1 \cdot 10^3$	polyetylén	$7 \cdot 10^2$
		pryže	10-100

2.2.2 Plastická deformace

U všech pevných materiálů má velikost deformace jistou mez. Za touto mezí již dochází k trvalým přeměnám materiálu, k trvalé deformaci a ke vzniku trhlin. Tuto mez nazýváme mezí elasticity.[1]

Rozlišujeme dva mechanismy vzniku plastické deformace a to vznik skluzem a dvojčatěním. Rozvíjí se vždy mechanismus, u kterého je při daných podmínkách potřeba menší energie. Skluz se realizuje pohybem dislokací ve skluzových rovinách. Je to nejčastější mechanismus plastické deformace. Mechanismus dvojčatění je realizován přesunem atomů v určité části krystalu, a to takovým způsobem, že vznikne oblast mřížky souměrná podle roviny dvojčatění s neposunutou mřížkou.[5,6]



Obr. 2.4 Plastická deformace kluzem a dvojčatěním [9]

3 SORTIMENT PLECHŮ POUŽÍVANÝCH V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU

V automobilovém průmyslu jsou ve většině případů používány oceli určené pro hluboké tažení a oceli vysokopevnostní. Stručný přehled ocelí používaných v automobilovém průmyslu je popsán v následujících kapitolách.

3.1 Vlastnosti plechů

Mezi základní faktory, které nejvíce ovlivňují tvářitelnost plechů patří chemické složení, mikrostruktura, textura materiálu, mechanické vlastnosti, stav zpracování, kvalita, typ povrchu a další.[16]

Nízkouhlíkové hlubokotažné plechy obsahují vedle uhlíku (C) a manganu (Mn) malé množství síry (S), fosforu (P), křemíku (Si) a doprovodné prvky jako chrom (Cr), nikl (Ni) a molybden (Mo). Mezi hlubokotažné oceli, v provedení neuklidněném, patří např.: DC03, DC01. Mezi hlubokotažné uklidněné oceli patří např.: DC04. Uklidněné oceli obsahují malé množství stabilizujících prvků jako hliník (Al), vanad (V), titan (Ti), niob (Nb) zirkonium (Zr) a bór (B).[16]

Na mechanické vlastnosti a tvářitelnost hlubokotažných ocelí má velký vliv charakter mikrostruktury. Základní strukturou je ferit a cementit. Na tváření má největší vliv velikost a tvar feritického zrna a množství, tvar a rozložení cementitu a vměstků. Nejprůmyslnější stav je takový, při kterém je cementit vyloučen ve formě globulí a je co nejrovnoměrněji rozložen v základní feritické fázi. Nejvýhodnější tvar feritických zrn u hlubokotažných uklidněných ocelí je zploštělý tvar zrna. Nerovnoměrná velikost zrn způsobuje nerovnoměrnou deformaci tvářeného plechu. Velikost feritického zrna udává norma ČSN EN ISO 643.[16]

Při tváření plechů se nejčastěji sledují tyto parametry: mez kluzu (R_e), smluvní mez kluzu ($R_{p0,2}$), mez pevnosti (R_m), tažnost (A_{80mm}), kontrakce (Z), tvrdost (HV), hloubka vtisku podle Erichsena, exponent zpevnění (n), hodnoty plošné (Δr) a normálové (N) anizotropie, poměr R_e/R_m , minimální poloměr ohybu (R_{min}), a součinitel tažení.[16]

U hlubokotažných ocelí se k dosažení dobré tváritelnosti plechů doporučují tyto hodnoty: $R_e \leq 190 \text{ MPa}$, $R_m \geq 270 \text{ MPa}$, $A_{80\text{mm}} \geq 36\%$, poměr $R_e/R_m \leq 0,7$. [16]

Na tváření má také vliv průběh závislosti prodloužení na zatížení u tahové zkoušky. Optimální průběh tahové zkoušky je bez výrazné horní a dolní meze kluzu. U plechů určených k lisování je požadována co nejmenší hodnota tvrdosti. [16]

3.2 Hlubokotažné oceli

3.2.1 Hlubokotažné plechy z ocelí ukladných hliníkem

Hlubokotažné plechy z ocelí uklidných hliníkem jsou rozděleny podle kvality do několika skupin.[21]

- **CQ (Comercial Quality)** – plechy běžné kvality
- **DQ (Drawing Quality)** – tažné plechy
- **DDQ (Deep Drawing Quality)** – hlubokotažné plechy
- **EDDQ (Extra Deep Drawing Quality)** – zvlášť hlubokotažné plechy
- **EDDQ – S (Extra Deep Drawing Quality - Super)** – super hlubokotažné plechy

Ve výrobě se hlubokotažné oceli navíc označují dle charakteristiky mechanických vlastností viz. Tab. 3.1.

Tab. 3.1 značení charakteristické a vlastnosti hlubokotažných ocelí uklidných uhlíkem [9]

Označení	$R_{p0,2}$ [MPa]	$A_{80\text{mm}}$ [%]	r_α [-]	n [-]	UH [-]	KUT [-]
DX 51 D (DDQ)	240-260	26-30	1,0-1,2	0,14-0,16	1,2-1,3	30-40
DX 52 D (DDQ)	220-240	30-36	1,2-1,4	0,16-0,18	1,3-1,4	40-50
DX 53 D (DDQ)	200-220	36-38	1,4-1,6	0,18-0,20	1,4-1,5	50-57
DX 54 D (EDDQ)	180-200	38-40	1,6-1,8	0,20-0,22	1,5-1,67	57-67
DX 56 D (EDDQS)	<180	>40	>1,8	>0,22	>1,67	>67

Hlubokotažné oceli uklidněné hliníkem nacházejí uplatnění pro lisování tvarově složitých výlisků.[9]

3.2.2 Plechy z IF (Interstitials Free) ocelí bez intersticií

Tyto plechy jsou mikrolegované titanem, respektive niobem, nebo kombinací obou prvků. Tyto legury vyčistí feritické matrice od intersticiálních atomů uhlíku a dusíku. Toto legování zvyšuje pevnost a tvářitelnost plechů. Plechy obsahují velmi malé množství volného uhlíku a dusíku. Jsou odolné proti stárnutí. Mez pevnosti R_m se pohybuje mezi 120 – 290 MPa. Díky svým mechanickým vlastnostem jsou plechy z IF ocelí využívány na tvarově složitě díly, jako jsou např. blatníky, rámy dveří apod.[9,21]

3.2.3 Oceli s BH (Bake hardened) efektem

Ocel s BH efektem je jakákoliv vysokopevnostní ocel, u které dochází ke zvýšení pevnosti v důsledku kombinace deformace a stárnutí při teplotách a časech typických pro lakování automobilů. Během vypalování laku karoserie dochází k precipitaci karbidů a nitridů a zvyšuje se mez kluzu o 40 – 70 MPa. Vysoký vliv na BH efekt mají prvky manganu, křemíku a fosforu. Oceli s BH efektem jsou velice dobře tvářitelné za studena a nacházejí uplatnění u velkoplošných výlisků (střecha, dveře, kapota). [9,22]

3.2.4 Oceli se zvýšeným obsahem titanu, resp. niobu

Díky legujícím prvkům titan (Ti) a niob (Nb), které jsou obsažené pouze v takovém množství, aby část intersticiálně rozpuštěného uhlíku zůstala i po válcování za tepla nevázána na vzniklé karbidy legur. Díky tomu probíhá BH efekt při nižších teplotách [9]

3.2.5 Oceli se zvýšeným obsahem uhlíku

U těchto ocelí se téměř nevyskytuje intersticiální uhlík ve formě tuhého roztoku. Díky tomu se tyto oceli vyznačují vynikající hlubokotažností.[9]

3.3 Vysokopevnostní materiály

Rostoucí automobilový průmysl a poptávka po nižší spotřebě paliva a snižování emisí motivuje automobilový průmysl k produkci více efektivních automobilů. Jednou z cest jak toho dosáhnout je redukce váhy automobilu.

Tuto redukci umožňují vysocepevnostní materiály, které kombinují vysokou pevnost, tváritelnost a nižší hmotnost.

3.3.1 DP(Dual Phase) oceli

DP oceli jsou nízkouhlíkové oceli, které obsahují feritickou matici (70-90%) a oblast martenzitu (10 – 30 %). Materiál obsahuje větší množství uhlíku pro lepší kalitelnost a legury manganu, chromu, vanadu a niklu. Tyto oceli jsou dobře tváritelné. Vyznačují se vysokou pevností. Mez pevnosti R_m se pohybuje v rozmezí 200 – 600 MPa, v závislosti na obsahu martenzitu. [9, 21]

Označení ocelí a mechanické vlastnosti jsou v Tab. 3.2.

Tab. 3.2 značení a charakteristické vlastnosti DP ocelí

Materiál	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80mm} [mm]	n [-]	C_{max} [%]	Si+Al_{max} [%]
DP – K	270 - 350	>500	>25	0,16	0,14	-
DP – K	380 – 460	>600	>18	0,12	0,14	-
DP – W600	330 - 450	580	24	0,15	0,015	2

3.3.2 TRIP(Transformation Induced Plasticity) oceli

Trip oceli jsou nízkouhlíkové oceli s feriticko – bainitickou maticí, obsahující zbytkový austenit (6-10%), který se při deformaci transformuje na martenzit. Jsou legovány chromem (9-13%), niklem (8-9%) a dále molybdenem, manganem, křemíkem. Tyto oceli se vyznačují vysokou pevností R_m až 2000 MPa.[21]

Tab. 3.3 značení a charakteristické vlastnosti TRIP ocelí [21]

Materiál	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80mm} [mm]	n [-]	C_{max} [%]	Si+Al_{max} [%]
RA – K38/60	≥380	≥600	26	≥0,20	0,22	2,2
RA – K42/80	≥420	≥800	22	≥0,18	0,22	2,2

3.3.3 TWIP(TWinning Induced Plasticity) oceli

Je to skupina uhlíkových ocelí se zcela austenitickou strukturou při všech teplotách. TWIP oceli obsahují 15 – 20 % manganu a jsou dolegovány hliníkem a křemíkem. Vyznačují se extrémními hodnotami tažnosti (řádově 80 – 100 %) a velmi vysokou pevností R_m až 800 MPa. Základním deformačním mechanismem u TWIP ocelí je dvojčatění. [21]

3.3.4 CP (Complex Phase) oceli

Jsou to nízkouhlíkové oceli se základní feritickou matricí a strukturními složkami bainitu a martenzitu. Tyto oceli jsou mikrolegovány niobem, titanem či Vanadem. Vyznačují se vysokou mezí pevnosti, R_m až 800 MPa, vysokým deformačním zpevněním a vysokou absorpcí energie. [21]

3.3.5 Martenzitické oceli

U martenzitických ocelí je téměř všechno austenit transformován na martenzit. Jsou legovány manganem, křemíkem, chrómem, molybdenem, bórem, vanadem a niklem. Tyto oceli se vyznačují vysokou pevností, R_m až 1500 MPa. Nejsou vhodné pro tváření tvarově složitých dílů. Tyto oceli jsou tvářené za tepla. [9,21]

Tab. 3.4 Značení a charakteristiky Martenzitických ocelí

Materiál	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80mm} [mm]	n [-]	C_{max} [%]	Si [%]
CPW 900	min. 700	880 - 1050	min. 10	$\geq 0,20$	0,18	0,8
MSW 1200	min. 900	1200 - 1450	min. 5	-	0,18	1,0

4 BEZKONTAKTNÍ OPTICKÉ SYSTÉMY – FOTOGRAMMETRIE

Fotogrammetrii můžeme definovat jako vědní obor, jenž se zabývá zpracováním informací na fotografických snímcích. Počátky fotogrammetrie sahají hluboko do historie. Leonardo da Vinci jako první popsal a sestrojil dírkovou komoru, která umožňovala překreslení pozorovaného objektu pomocí centrální projekce. Za zakladatele fotogrammetrie je považován Francouz Aime Laussedat (1819 – 1907), který krátce po vynálezu fotografie začal fotografie používat pro měřičské účely. Velmi brzy došlo k uvědomění si významu fotogrammetrie a v letech 1893-1897 byla zmapována oblast Vysokých Tater. Velký rozmach zažívá fotogrammetrie během válečných konfliktů, kdy za pomoci leteckých snímků byly zjišťovány strategické informace o nepříteli. Dochází k velmi rychlému vývoji fotogrammetrických kamer a také vyhodnocovacích strojů. S rozvojem výpočetní techniky se do popředí vyhodnocování snímků dostává analytická metoda. Díky rychlému vývoji počítačových technologií v 80. letech vznikla nová oblast fotogrammetrie – digitální fotogrammetrie. V dnešní době je fotogrammetrie využívána prakticky ve všech oborech. [8]

4.1 Princip fotogrammetrie

Základní dělení fotogrammetrie je dělení podle polohy stanoviště, ze kterého byl snímek pořízen na fotogrammetrii pozemní a leteckou. Při pozemní fotogrammetrii je fotografický přístroj umístěn na pevném bodě. Dosah pozemní fotogrammetrie se pohybuje kolem 500 metrů. Pozemní fotogrammetrie není tak náročná na technické a fotogrammetrické vybavení jako letecká fotogrammetrie. Při letecké fotogrammetrii je stanoviště umístěno na pohybujícím se nosiči (letadlo, vrtulník). Při letecké fotogrammetrii se za jednotku času zpracuje mnohem větší území než při pozemní fotogrammetrii.[8]

Dále rozdělujeme fotogrammetrii na jednosnímkovou a dvousnímkovou. Jednosnímkovou metodou lze měřit pouze rovinné souřadnice. Její využití je především ve stavebnictví a architektuře. Pomocí dvousnímkové fotogrammetrie lze vyhodnotit z dvojice snímků prostorové souřadnice objektu.

Dvousnímková fotogrammetrie je vzhledem ke svým universálním vlastnostem hojně využívána v dnešní době.[8]

Obrazový záznam lze provádět dvěma základními metodami – metodou analogovou a metodou digitální.[8]

Analogové fotografie vznikají exponováním materiálu (film – negativ) a zpracováním materiálu v laboratořích. Exponovaný materiál se osvítl a tím dojde k záznamu obrazu.[8]

Základní funkcí digitálního fotografování je snímání obrazů do podoby fotografie, která umožňuje další zpracování pomocí výpočetní techniky. Jádrem digitálního přístroje je světlocitlivá plocha CCD (Charged – Coupled Device). Pomocí systému optických čoček je obraz promítán na tuto plochu. Výsledný datový soubor je uložen na datové úložiště v podobě paměťové karty.[8]

4.2 Měření optickými systémy

4.2.1 Měřicí systém Argus

Systém ARGUS dodává na náš trh firma GOM a.s. ARGUS je bezkontaktní optický systém pro měření 3D deformací plechu při lisovacím procesu. Původně byl vyvinut pro automobilku Renault. [11]

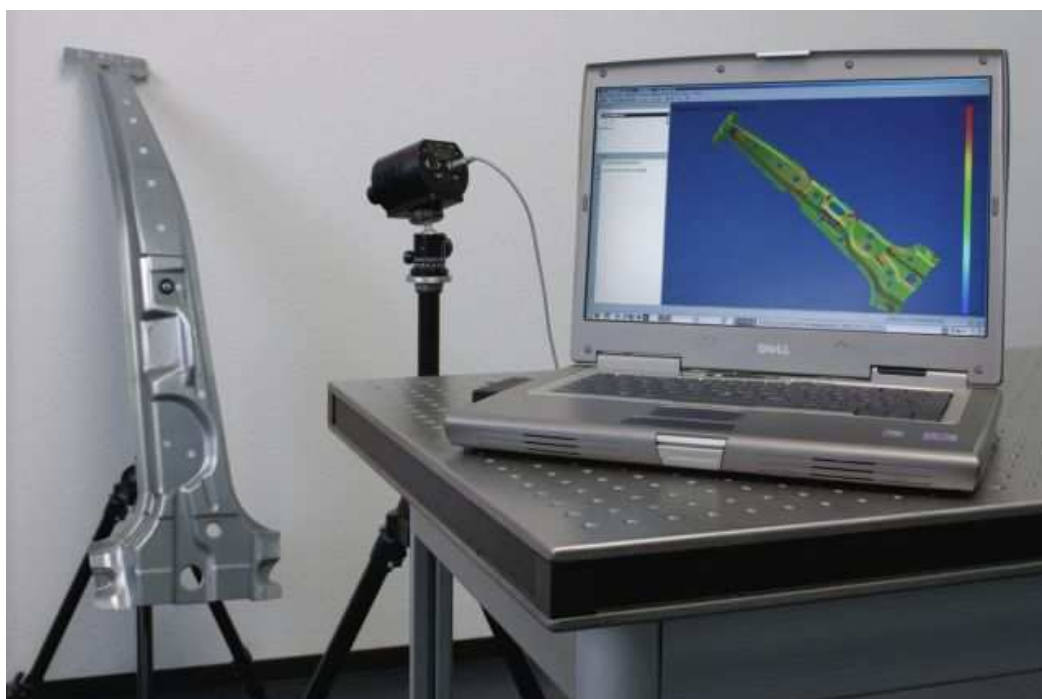
Tento systém je tvořen snímací kamerou, výpočetní jednotkou a dodatečnými přípravky a dokáže na základě optického snímání rozlišovat a postupně vyčíslit hlavní a vedlejší napětí (hlavní a vedlejší deformace). Výsledné hodnoty lze zobrazit pomocí přednastavených modů do následných napěťových (deformačních) polí, které umožňují vytvořit si představu o průběhu a velikosti hlavních a vedlejších napětí (hlavní a vedlejší deformace), která vznikla při samotném tvářecím pochodu v lisovací lince. [12]

Proces měření pomocí systému Agrus je následující: na měřený objekt je elektrochemicky vyleptána síť bodů (rozměr bodů je standardně 1-6 mm), poté je mřížka deformována současně s vylisováním plechového dílu. Následně je plech snímán kamerou s CCD čipem a pomocí image processingu jsou vypočteny souřadnice bodů mřížky. Na základě zachování konstantního

objemu je vypočteno rozložení hlavní a vedlejší deformace, ztenčení materiálu a rozložení deformací v diagramu mezních přetvoření. [11,12]

Oblasti využití systému Argus

- Ověřování a optimalizace simulace tažení plechů
- Optimalizace procesu tváření
- Detekce oblastí s kritickou deformací
- Optimalizace lisovacích nástrojů
- Zkoušky materiálu[11]



Obr. 4.1 Měřicí systém ARGUS [11]

4.2.2 Měřicí systém ARAMIS

Systém ARAMIS dodává na náš trh firma GOM a.s. ARAMIS je bezkontaktní optický systém pro měření 3D deformací plechu při lisovacím procesu. Je vhodný zejména pro trojrozměrné měření deformace při statickém nebo dynamickém zatížení, za účelem analýzy na reálných konstrukčních prvcích. Tento systém je tvořen dvěma CCD kamerami, které mohou zaznamenat až 4000 snímků za sekundu, výpočetní jednotkou a dodatečnými přípravky. [11,12]

Proces měření systémem ARAMIS je následující: na objekt je pomocí spreje nanesen kontrastní vzor (tzv. pattern), tento pattern je deformován současně s deformovaným objektem. Tento objekt je pro každou úroveň zatížení sejmuto 2 CCD kamerami. Pomocí image processingu jsou vypočteny prostorové souřadnice bodů ležících na povrchu objektu. Systém vypočítá 3D posuvy a následně tvar deformovaného objektu a 3D deformace porovnáním odpovídajících si bodů v jednotlivých úrovních zatížení. [11,12]

Oblasti využití systému ARAMIS:

- Dimenzování součástí
- Zkoušky materiálů
- Testování nových materiálů
- Výpočty stability
- Zkoumání materiálů v nelineárních oblastech deformace
- Optimalizace procesu tváření
- Zjišťování materiálových vlastností
- Charakteristika procesu tečení
- Charakteristika procesu stárnutí [11]



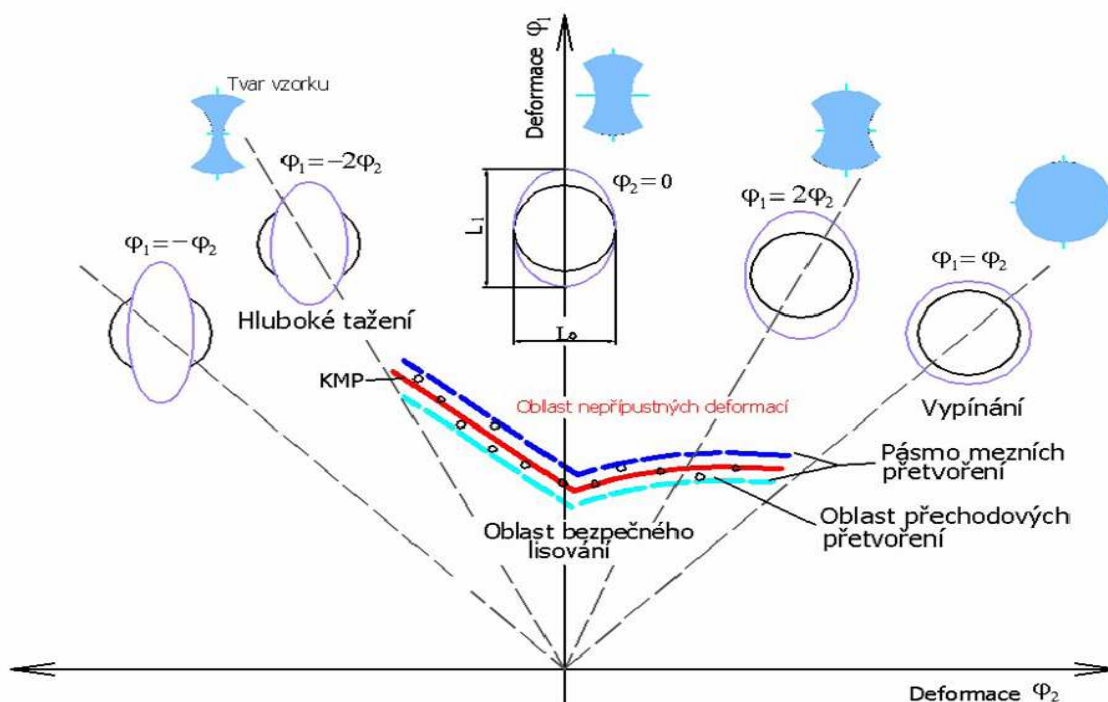
Obr. 4.2 Měřicí systém ARAMIS [17]

5 DIAGRAMY MEZNÍHO PŘETVOŘENÍ

Rozvoj produkce nových dílů a nastavení tvářecích operací vedlo k nutnosti dobré znalosti dosažitelných tvářecích limitů. Bylo nezbytné definovat maximální limit tvářitelnosti materiálů, nad kterým se objeví zúžení a trhliny. Koncept diagramu mezních přetvoření byl představen Keelerem (1964) a Goodwinem (1968). Byl představen jako první kritérium bezpečnosti pro operaci hlubokého tažení. [13,14]

5.1 Ukazatele diagramů mezních přetvoření

Nejznámější diagram mezních přetvoření je Goodwin-Kellerův diagram.[16]



Obr. 5.1 Diagram mezních přetvoření – Forming limit diagram (FLD) [24]

Hodnoty největších tahových logaritmických deformací φ_1 jsou vyneseny na svislou osu, na vodorovnou osu jsou vyneseny hodnoty deformací $\pm\varphi_2$, které jsou kolmé k φ_1 .

Z diagramu jsou patrné tři oblasti, pomocí kterých lze posoudit, zda dojde k porušení plechu:

- oblast nepřipustných deformací plechu. Všechny stavy nacházející se v této oblasti jsou nežádoucí a dochází k porušení materiálu. [16]
- oblast přípustných deformací plechu. V této oblasti nedojde k porušení plechů. [16]
- oblast mezní deformace plechu. Je to oblast, ve které začíná tvorba místního zeslabení tzn. tvorba trhlin.[16]

Pomocí Goodwin-Kellerova diagramu lze také zjistit technologickou bezpečnost operace, a to srovnáním skutečných hodnot logaritmické deformace v kritických bodech výtažku s místem v diagramu, vzhledem k oblasti mezní deformace.[16]

Na polohu křivek mezní tvářitelnosti v Goodwin – Kellerově diagramu má vliv chemické složení, metalurgické a tepelné zpracování, tloušťka materiálu, exponent deformačního zpevnění a normálová anizotropie.[16]

5.2 Způsoby zjišťování diagramů mezních přetvoření

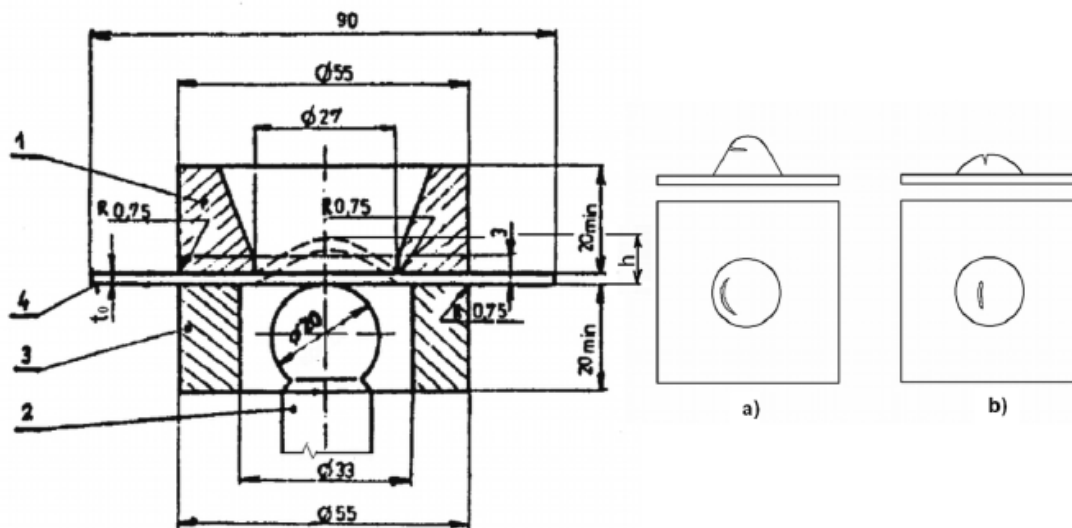
Křivky mezní tvářitelnosti lze získat dvěma způsoby a to numerickými metodami nebo experimentálně. [16]

Existuje mnoho vhodných způsobů použití numerických metod ke zjištění diagramů mezních přetvoření od mnoha různých autorů. Tyto metody jsou založené na teoretické analýze mechanických vlastností a to s pomocí teorie plasticity. Mezi tyto numerické metody patří např. teoretická Keeler-Goodwinova metoda výpočtu FLD, MK teorie objevena Marciniakem a Kuczińským, nebo Metoda kmenových křivek odvozena A.K. Ghoshem. [15]

Je nezbytné poukázat na to, že všechny numerické metody jsou založené na vysokém počtu jednoduchých předpokladů, které často mohou být velmi vzdálené od reality. Je nemožné teoreticky zvážit všechny aspekty, které mají vliv na lokální ztenčení. Teoretická determinace FLD diagramu numerickými metodami je obtížná a nepřesná. Z tohoto důvodu se nejčastěji používá experimentální metoda determinace FLD diagramu.[15]

5.2.1 Zkouška hloubením podle Erichsena

Hlubokotažnost tenkých plechů se posuzuje pomocí zkoušky hloubením podle Erichsena. Zkouška je normalizována v ČSN EN ISO 20482. Mezi přidržovač a tažnici je upnut plech. Tažník má tvar koule $\varnothing 20$ mm. Tažník je vtlačován do středu plechu až do vzniku trhliny. Kritériem hlubokotažnosti je velikost prohloubení h , při němž vznikne trhlina. [16]

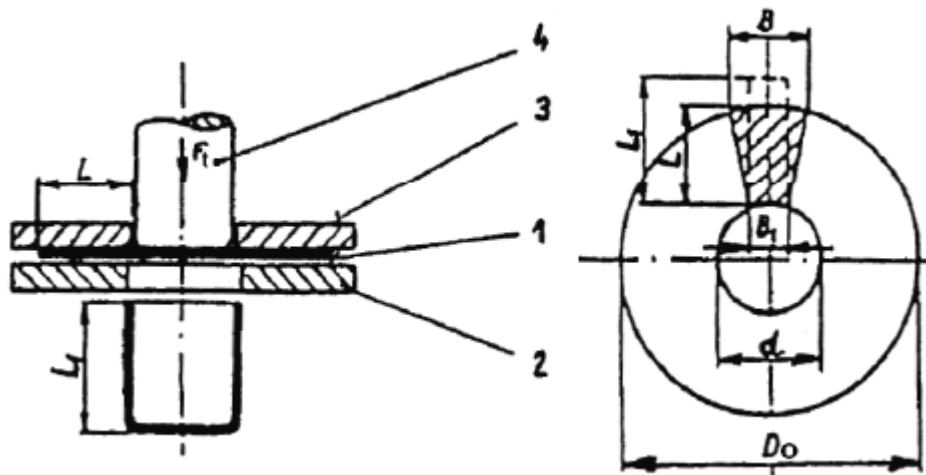


Obr. 5.2 Schéma funkční části zařízení pro Erichsenovu zkoušku

a) typický tvar pro hlubokotažný plech, b) nevhodný plech k hlubokému tažení [16]

5.2.2 Kalíškový test (zkouška AEG nebo Schmiedtova)

Hlubokotažnost tenkých plechů lze hodnotit pomocí kalíškovací zkoušky. Kritériem hlubokotažnosti plechů je hodnota $m = d/D$, kde d je průměr tažníku a D je experimentálně zjištěný maximální průměr kruhového přístřihu (rondelu) z kterého lze bez porušení získat výtažek válcového kalíšku. Zkouška se musí několikrát opakovat při postupném zvyšování průměru kruhového přístřihu. Zkušební rondel o průměru $D = d + 2L$ se táhne na kalíšek. Průměr tažníku je $d = 50$ mm. Podmínky zkoušky korespondují s tažením výtažku v praxi. Kalíškovací zkouškou lze také hodnotit anizotropii mechanických vlastností zkoušeného plechu, která se projeví jeho cípatostí. [16]



Obr. 5.3 Princip kalíškovací zkoušky[16]

1 – rondel, 2 – tažnice, 3 – přidržovač, 4 - tažník

5.2.2 Kalíškový test s přidržením příruby podle Gross – Engelhardta

Při tomto testu je měřen záznam tažné síly při zhotovení kalíšku. Zkušební vzorky jsou pásy z tenkého plechu o šířce 58 mm. V první fázi je z pásu vystřižen rondel o $\varnothing$ 52 mm. Poté se táhne s přidržovačem až do překročení tažné síly F_2 . Zbývající část příruby je poté sevřena přidržovačem a tažník se pohybuje až do úplného odtržení dna kalíšku, při tažné síle F_1 . Míru hlubokotažnosti vyjadřuje hodnota T , vypočtená podle vztahu 5.1. [16]

$$T = \frac{F_1 - F_2}{F_1} \cdot 100 [\%] \quad (5.1)$$

6 NUMERICKÁ SIMULACE TVÁŘECÍHO PROCESU

6.1 Využití numerické simulace

Navrhovat formu lisovacího nářadí lze několika způsoby. Jedním ze způsobů je klasický postup, při kterém je forma zkonstruována a vyrobena. Následně je provedeno několik iterací zkouškou na lisu a forma je upravena.[18]

Pokud se podaří nastavením parametrů výrobního procesu a menšími úpravami zabezpečit výrobu kvalitních výrobků je vše v pořádku. K výraznému prodražení a prodloužení dodacích lhůt dochází v případech, kdy je nutné provést změny většího rozsahu. V nejkritičtějších případech se musí celá forma vyrobit znovu.[18]

V důsledku co nejnižší ceny pro zákazníka, zkracování dodacích lhůt a mnoha novým tvarům výtažků, sahají výrobci lisovacího nářadí ke koupi simulačního softwaru.[18]

Vhodný simulační software musí dosahovat vysoké přesnosti, musí být snadno použitelný a musí být rychlý. Na trhu existuje několik komerčních řešení. U většiny z nich je problém jejich rychlost výpočtu a doba na přípravu dat.[18]

V automobilovém průmyslu je velmi používaný software AutoForm od švýcarské firmy AutoForm Engineering GmbH. Velkou výhodou tohoto softwaru je jeho rychlost. Kvalitní výsledky poskytuje v řádu několika minut až hodin.[18]

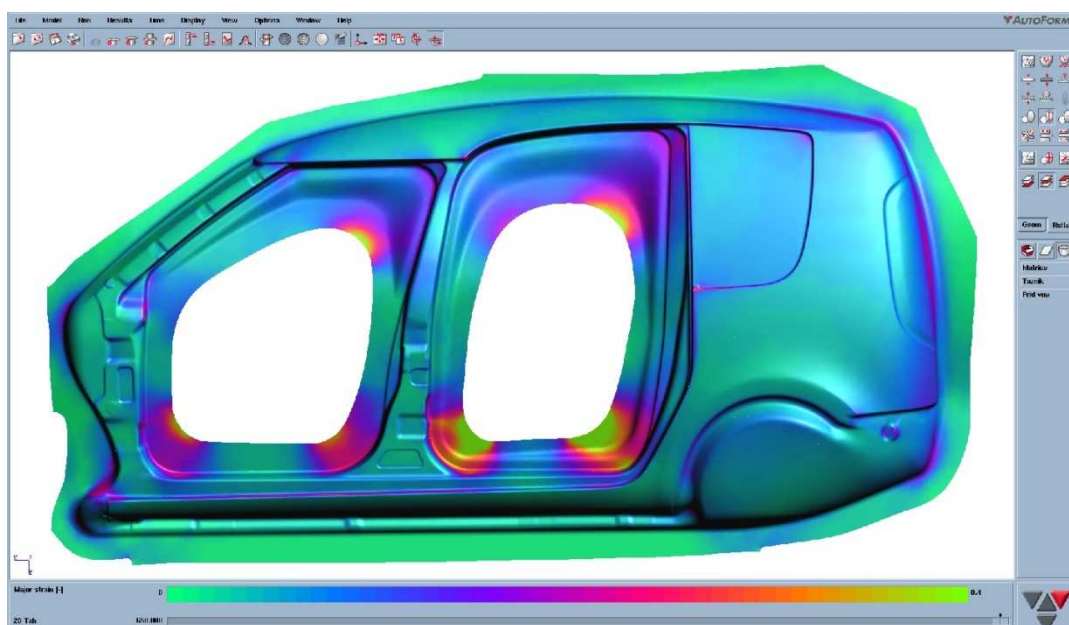
6.3 AutoForm

AutoForm od švýcarské firmy AutoForm Engineering je vysoce výkonný software používaný v oblasti tváření plechů. AutoForm umožňuje provést kompletní simulaci všech jevů vyskytujících se při hlubokém tažení plechů jako např.: gravitace, přidržení, tažení, odštížení, kalibraci, odpružení apod. Pro kompletní simulaci hlubokého tažení se používá software AutoForm Incremental^{plus}. AutoForm Incremental^{plus} rychle a přesně ověřuje všechny operace lisovacího procesu. AutoForm Incremental^{plus} umožňuje uživatelům řešit složité problémy, které vznikají v praxi, a umožňuje zvýšit

konkurenceschopnost uživatele. Vysoká rychlost tohoto softwaru poskytuje dostatečný prostor pro optimalizaci formy a procesu.[18,19,20]

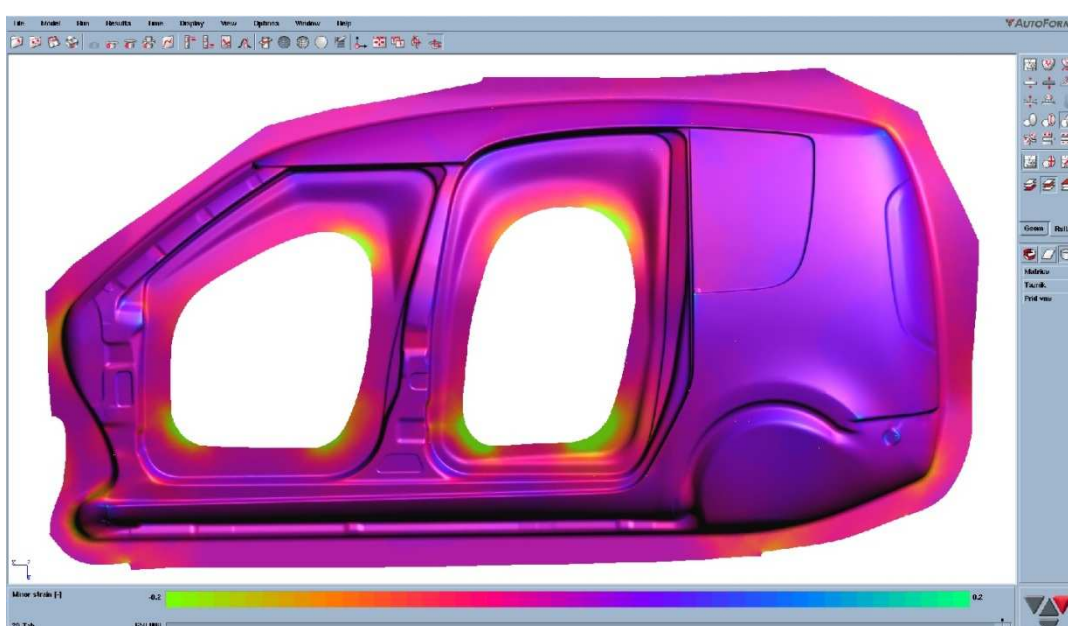
6.4 Vyhodnocování numerických simulací

Program AutoForm R2 dokáže vyhodnotit mnoho parametrů. Tato diplomová práce je v následujících kapitolách zaměřena hlavně na hodnocení hlavního napětí (major strain), vedlejšího napětí (minor strain) a ztenčení (thinning). Na Obr. 6.1 je znázorněna dokončená simulace procesu tváření v programu AutoForm a vyhodnocení hlavního napětí (major strain). Model výlisku je pokryt barevnou škálou pro umožnění identifikace hodnot hlavního napětí.

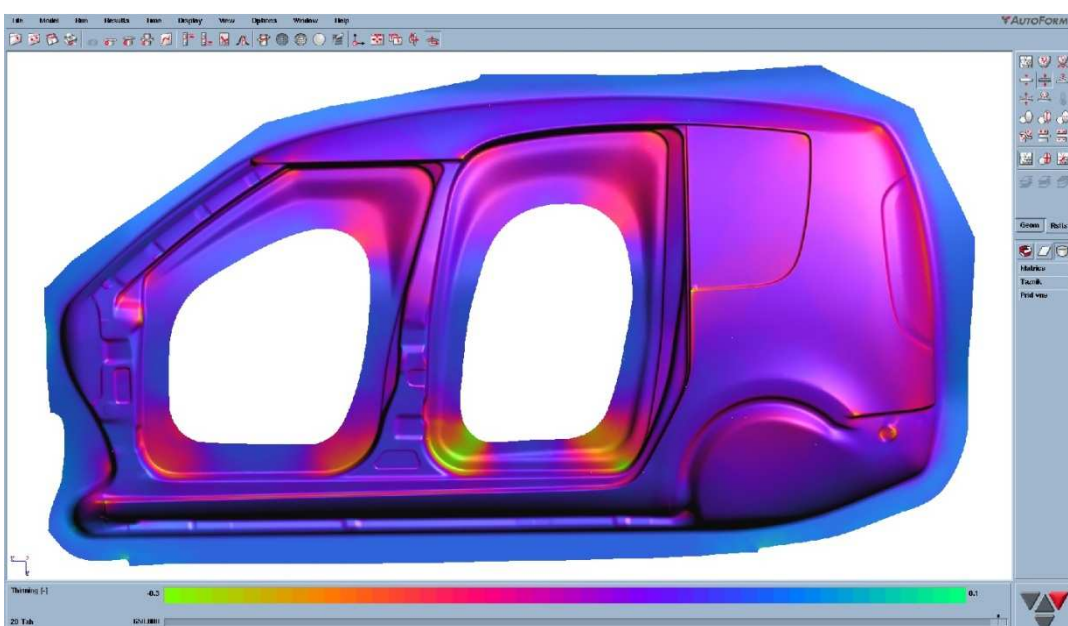


Obr. 6.1 Simulace procesu tažení – vyhodnocení hlavního napětí

Na Obr. 6.2 je zobrazena stejná simulace s vyhodnocením vedlejšího napětí (minor strain)

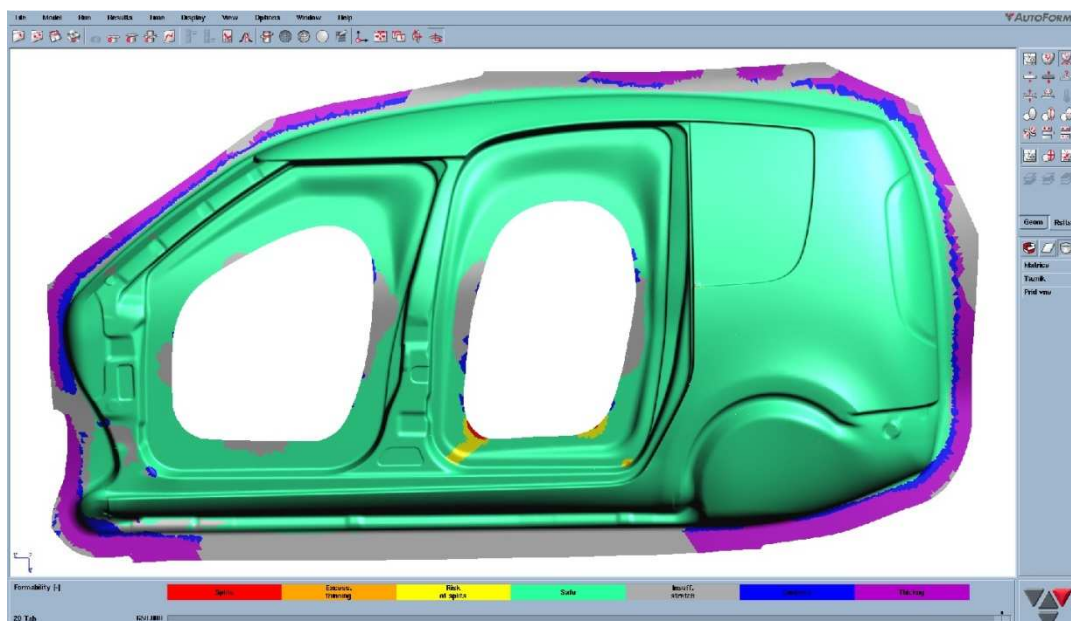


Obr. 6.2 Simulace procesu tažení – vyhodnocení vedlejšího napětí
Na Obr. 6.3 je zobrazena simulace s vyhodnocením ztenčení.



Obr. 6.3 Simulace procesu tažení – vyhodnocení ztenčení

V automobilovém průmyslu je velmi důležitý vzhled plechů, vyhlazení ploch atd. V programu AutoForm R2 toto vyhodnocuje funkce formability, neboli vypnutost. Na Obr. 6.4 je zobrazeno toto vyhodnocení. Ideální případ je takový, kdy celý vytažený plech je světle zelené barvy. Toto znamená, že plech je dobře vypnutý a nedochází u něj ke zvlnění (barva šedá a modrá) ani k riziku prasklin (barva žlutá, oranžová, červená)



Obr. 6.4 Simulace procesu tažení -vypnutost

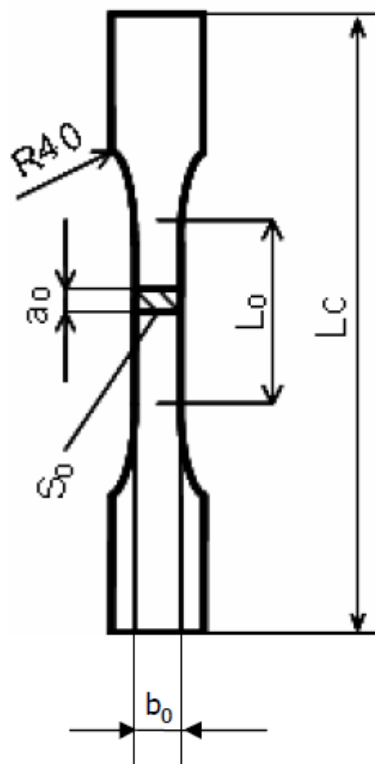
7 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

7.1 Cíle diplomové práce

Hlavním cílem této diplomové práce je určení odchylky mezi numerickou simulací tažení v programu AutoForm R2 a reálnými výsledky zjištěné pomocí bezkontaktního systému Argus. Tato diplomová práce je zaměřena na porovnání ztenčení materiálu DC06 (EN 10 152, DIN 17 163). Pro tento experiment byl použit levý rám automobilu.

7.2 Použitý materiál

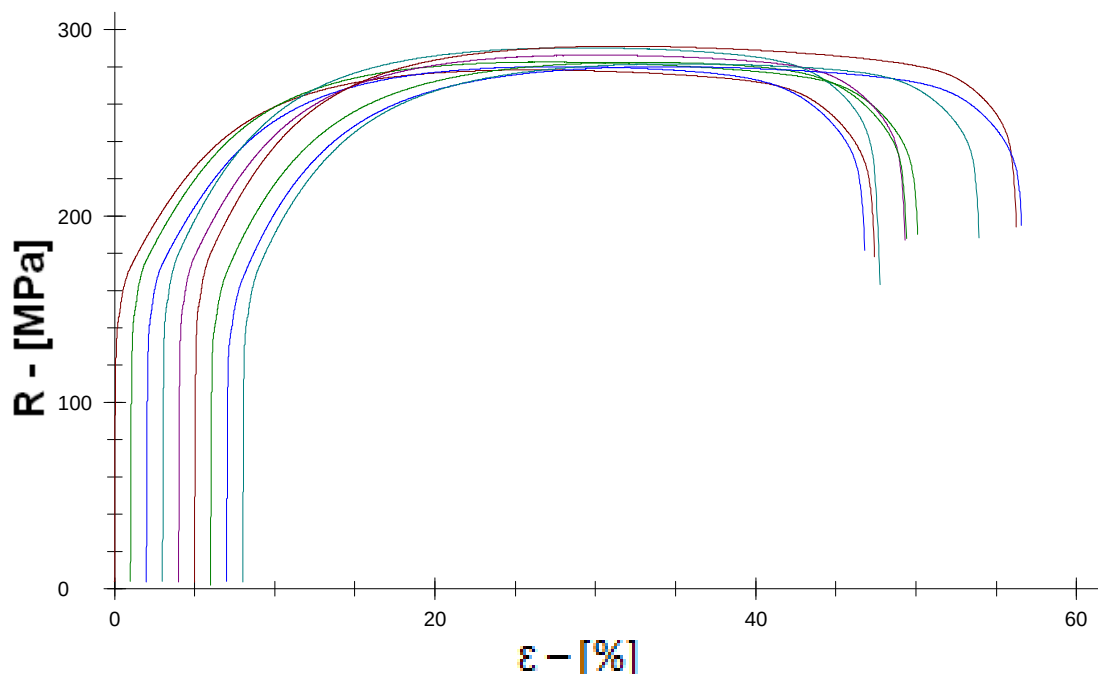
V této diplomové práci je pro experimentální účely použit materiál DC06. Tento materiál je použit na výrobu rámu dveří. Výrobcem materiálu je firma ArcelorMittel. Základní mechanické vlastnosti jsou zadány v Tab. 7.1. Na Obr. 7.2 jsou zobrazeny průběhy statických zkoušek tahem. Statická zkouška tahem byla provedena na zkušebním přístroji ZWICK Z300. Byla provedena na plochých zkušebních tyčích dle ČSN EN ISO 6892-1. Tloušťka plechu je 0,815 mm.[16]



Obr. 7.1 Zkušební tyč [25]

Tab. 7.1 Základní mechanické vlastnosti materiálu DC06

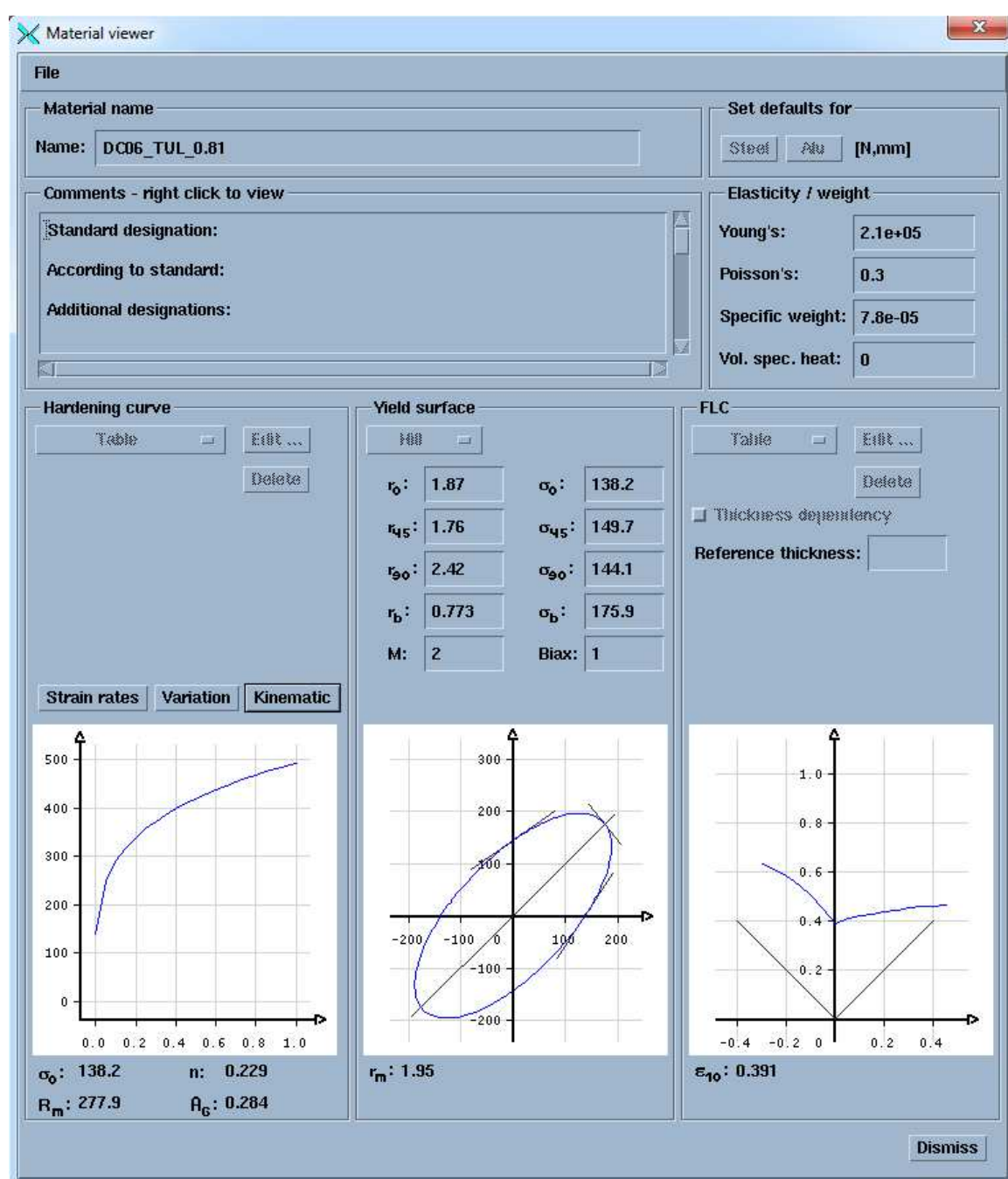
Číslo měření	Úhel [°]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80mm} [%]	n [-]	r [-]
1	90	145	278	47,3	0,235	2,32
2		149	283	49,0	0,234	2,35
3		147	280	44,7	0,234	2,27
4	45	153	290	44,7	0,233	1,67
5		152	286	45,2	0,232	1,60
6		153	291	51,2	0,234	1,69
7	0	142	282	43,3	0,242	1,84
8		138	280	49,5	0,243	1,88
9		145	282	45,8	0,238	1,91



Obr. 7.2 Průběhy tahových zkoušek

7.2.1 Zadání mechanických hodnot do systémů AutoForm a Argus

Veškeré hodnoty základních materiálových charakteristik $R_{p0,2}$, R_m , A_{80mm} , r , n byly zjištěny pomocí tahové zkoušky. Křivky zpevnění a diagramy mezních přetvoření FLD byly získány z jedné dávky materiálu systémem Aramis od německé firmy GOM. Tyto materiálové charakteristiky byly použity jak pro výpočet v programu AutoForm R2, tak pro analýzu sítí v systému Argus. Základní materiálové charakteristiky jsou zobrazeny na Obr. 7.3.

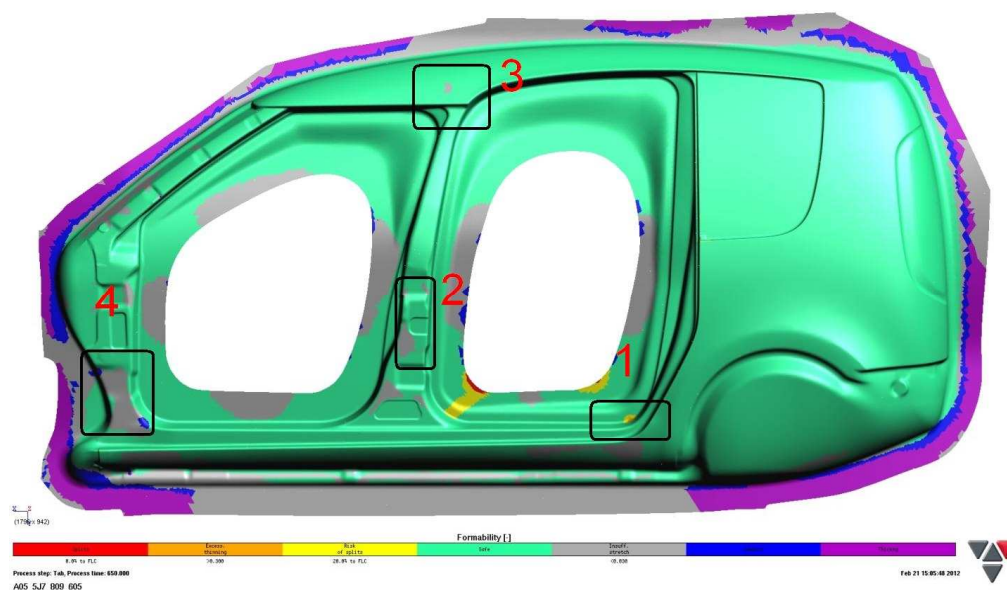


Obr. 7.3 Základní materiálové charakteristiky v programu AutoForm

7.3 Měření skutečných hodnot φ_3

7.3.1 Výběr oblasti zájmu

Na obrázku 7.3 jsou zobrazeny 4 oblasti. Tyto oblasti jsou vybrány na základě provedené simulace v programu AutoForm R2 v místech kde se ukazuje zvlnění materiálu (oblasti 2,3,4), nebo riziko vzniku prasklin (oblast 1).



Obr. 7.4 Oblasti zájmu

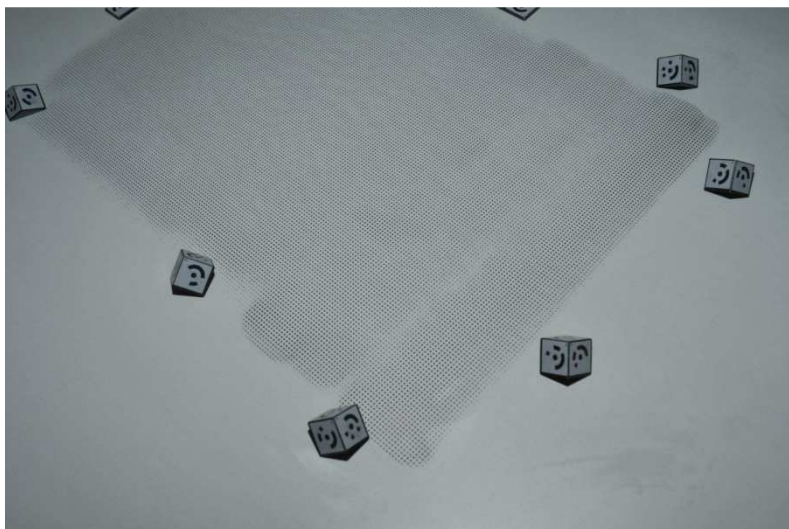
7.3.2 Nanášení deformační sítě

Před vložením plechu do lisu je nutné nanést na oblasti zájmu speciální deformační síť, takzvaný pattern. Tato síť je elektrochemicky vyleptaná na plochu přístřihu. V tomto případě byla využita síť s bodovými elementy o rozměru 1mm a roztečí 2mm.

7.3.3 Import deformační sítě - Argus

Na plech s vyleptanou deformační sítí jsou umístěny tzv. měřicí kameny a dvě měřicí tyčinky (Obr. 7.5, 7.6). Kameny a tyčinky musí být dobře zafixovány, aby nedošlo k jejich pohybu. Měřicí kameny mají tvar seříznuté krychle, na jejichž plochách jsou nalepeny měřicí značky, tak aby byly viditelné z co nejvíce úhlů. Měřicí tyčinky slouží k přesnému určení vzdálenosti. Jsou kalibrované výrobcem. Poté je plech nafocen z několika úhlů tak, aby na každé fotografii bylo vidět minimálně 5 měřících bodů. Toto focení pomocí měřících značek umožňuje zjistit systému Argus přesnou polohu

vyleptaných bodů. Tyto fotografie jsou následně importovány do pracovní stanice se systémem Argus.



Obr. 7.5 Deformační síť, měřící kameny



Obr. 7.6 Deformační síť, měřící kameny, měřící tyčinky

7.3.4 Lisování plechu, focení deformační sítě, výpočet

Po výše provedených procedurách byl plech vložen do lisovací linky za reálných lisovacích podmínek a vytažen. Po provedení operace tažení plech nepokračoval v dalších operacích. Další operace nebyly pro tuto diplomovou práci důležité. Následně byly na plech opět umístěny kameny a měřící tyčinky a plech byl nafocen za stejných podmínek jako před lisováním. Z důvodu deformace plechu a horších možností uložení kamenů, bylo nutné pořídit více fotografií z více úhlů. Následně byly fotografie opět

nahrány do pracovní stanice se systémem Argus. Systém Argus si pomocí těchto fotografií vypočítal přesnou polohu všech vyleptaných bodů. Každému bodu přiřadil souřadnice v prostoru. Na základě zákona zachování konstantního objemu systém Argus vypočítal hlavní napětí (major strain), vedlejší napětí (minor strain) a ztenčení. Čtyři oblasti našeho zájmu byly vyřezány a později použity pro další části experimentu.

7.4 Porovnání hodnot ztenčení pomocí vybraných bodů

V následujícím experimentu byly vybrány body na deformační síti na plechu v každé oblasti. Stejně body byly nalezeny na síti v systému Argus a na síti vytvořené pomocí programu AutoForm R2. Body byly vybrány v oblastech, v kterých by podle předpokladů mělo dojít k největšímu a nejmenšímu ztenčení. Tyto body byly vybrány i s ohledem na čitelnost sítě a možnosti nalezení stejných bodů jak v systému Argus tak v programu AutoForm R2. Systém Argus neumí zobrazit tloušťku materiálu v milimetrech, ale jako výstup používá hodnoty ztenčení φ_3 . Tuto hodnotu si systém Argus dopočítává na základě znalosti hlavní deformace φ_1 , vedlejší deformace φ_2 a to podle vztahu 7.1.

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (7.1)$$

Následně byla v těchto bodech změřena tloušťka plechu pomocí ultrazvukového měřiče StressTel model TM1 CD2 od firmy Ge Inspection Technologies.

Z důvodu přehlednosti a možnosti porovnání hodnot získaných pomocí simulace pomocí programu AutoForm R2 (ztenčení φ_3), hodnot získaných pomocí systému Argus (ztenčení φ_3) a hodnot získaných pomocí ultrazvuku (tloušťka plechu t_1) byly hodnoty ztenčení φ_3 převedeny na tloušťku t_1 pomocí vztahu 7.2.

$$t_1 = t_0 \cdot e^{\varphi_3} \quad (7.2)$$

Z důvodu přehlednosti hodnot zanesených do grafu bylo nutné převést hodnot naměřené ultrazvukem převést na logaritmické hodnoty pomocí vztahu 7.3.

$$\varphi_3 = \ln \frac{t_1}{t_0} \quad (7.3)$$

Původní tloušťka materiálu $t_0=0,815$ mm.

V následujícím kroku byly porovnány hodnoty změřené pomocí ultrazvuku a hodnoty zjištěné pomocí systému Argus. Obdobně byly porovnány hodnoty zjištěné pomocí numerické simulace. Porovnání u každého bodu bylo vyjádřeno procentuálně. Z těchto hodnot byl vypočten medián.

Medián můžeme definovat jako 50% kvantil, což je taková hodnota variační řady uspořádané podle velikosti, která rozděluje řadu na dvě stejně velké části co do počtu hodnot tak, že hodnoty dané proměnné v jedné části jsou menší než medián, v druhé pak větší než medián. Je to tedy prostřední hodnota variační řady souboru. Medián není přímo ovlivněn velikostí všech hodnot dané proměnné. [26]

Cílem této práce je určení odchylky mezi numerickou simulací tažení v programu AutoForm R2 a reálnými výsledky zjištěnými pomocí bezkontaktního měřicího systému Argus. Porovnání u každého bodu bylo vyjádřeno procentuálně a z těchto hodnot opět vypočten medián.

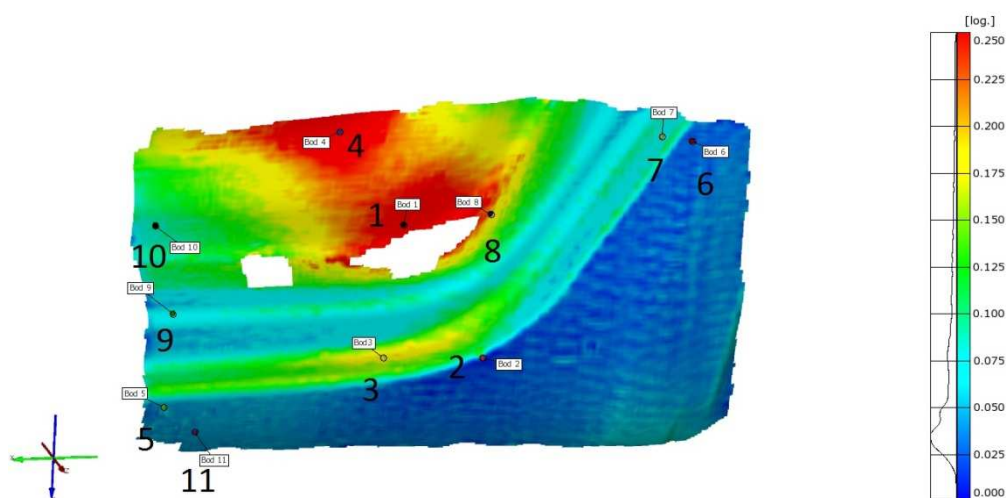
7.4.1 Porovnání hodnot ztenčení pomocí bodů oblast 1

Na obrázku 7.7 je zobrazena oblast 1 na výřezu z reálného výlisku. Na výlisku jsou vyznačeny body a řez potřebný pro další experimentální část diplomové práce.



Obr. 7.7 Oblast 1 s vyznačenými body a řezem

Na Obr. 7.8 jsou body vyznačené v systému Argus. V oblasti 1 bylo vybráno 11 bodů.



Obr. 7.8 Rozložení φ_3 v oblasti 1

V Tab. 7.2 jsou zobrazeny hodnoty tloušťky materiálu v jednotlivých bodech výlisku.

Tab. 7.2 Tloušťka materiálu v měřených bodech

Bod	Způsob měření		
	Argus	Simulace	Ultrazvuk
	[mm]	[mm]	[mm]
1	0,614	0,623	0,616
2	0,785	0,789	0,820
3	0,670	0,704	0,705
4	0,578	0,646	0,610
5	0,778	0,792	0,805
6	0,795	0,781	0,817
7	0,755	0,749	0,780
8	0,663	0,672	0,693
9	0,760	0,751	0,783
10	0,737	0,738	0,769
11	0,774	0,791	0,799

Tab. 7.3 Porovnání hodnot

Bod	Rozdíl ultrazvuk - Argus	Rozdíl ultrazvuk - simulace	Rozdíl ultrazvuk - Argus	Rozdíl ultrazvuk - simulace
	[mm]	[mm]	[%]	[%]
1	0,002	-0,007	0,31	1,18
2	0,035	0,031	4,22	3,83
3	0,035	0,001	5,00	0,20
4	0,032	-0,036	5,31	5,90
5	0,027	0,013	3,41	1,59
6	0,022	0,036	2,65	4,37
7	0,025	0,031	3,26	4,01
8	0,030	0,021	4,30	2,97
9	0,023	0,032	2,91	4,07
10	0,032	0,031	4,22	4,07
11	0,025	0,008	3,16	1,03

V Tab. 7.3 jsou zobrazeny hodnoty rozdílů hodnot zjištěných pomocí ultrazvuku a pomocí systému Argus, resp. simulací v programu AutoForm R2 v milimetrech a v procentech. Z Tab. 7.3 je patrné, že největší rozdíl hodnot nastává v bodě 4 (5,31% v případě rozdílu ultrazvuk – Argus, 5,9 % v případě rozdílu ultrazvuk – simulace). V bodě 4 dochází k největšímu ztenčení. Z hodnot rozdílů byl vypočten medián (Tab. 7.4). Z Tab. 7.4 lze usoudit, že v případě oblasti 1 jsou přesnější hodnoty zjištěné pomocí bezkontaktního měřicího systému Argus.

Tab. 7.4 Medián rozdílů

Medián rozdílů ultrazvuk – Argus	Medián rozdílů ultrazvuk - simulace
[%]	[%]
3,41	3,83

V Tab. 7.5 jsou zobrazeny hodnoty rozdílů hodnot zjištěných pomocí bezkontaktního měřicího systému Argus a hodnot zjištěných pomocí simulace v programu AutoForm R2 a to v milimetrech a v procentech. Z Tab. 7.5 je patrné, že k největší diferenci mezi hodnotami dochází v bodě 4, v kterém dochází k největšímu ztenčení.

Tab. 7.5 Porovnání Argus - simulace

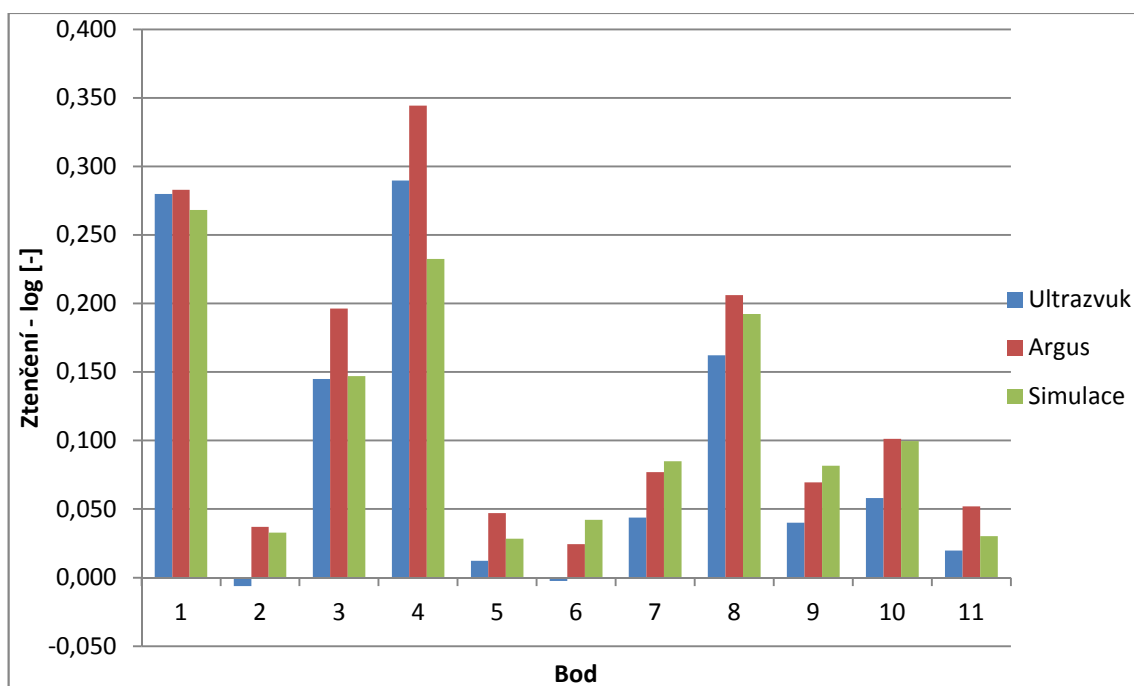
Bod	Rozdíl Argus - simulace	Rozdíl Argus - simulace
	[mm]	[%]
1	-0,009	1,49
2	-0,003	0,41
3	-0,034	5,05
4	-0,068	11,84
5	-0,015	1,88
6	0,014	1,76
7	0,006	0,78
8	-0,009	1,39
9	0,009	1,19
10	-0,001	0,15
11	-0,017	2,19

V Tab. 7.6 je zapsána hodnota mediánu z rozdílů mezi měřením pomocí bezkontaktního systému Argus a simulací v programu AutoForm R2 vyjádřena v procentech.

Tab. 7.6 Medián rozdílů Argus - simulace

Medián rozdílů Argus - simulace
[%]
1,49

V grafu na Obr. 7.9 jsou zobrazeny hodnoty ztenčení v logaritmických souřadnicích v jednotlivých bodech. Kromě bodu 4 jsou hodnoty ztenčení zjištěné pomocí bezkontaktního systému Argus a pomocí simulace v programu AutoForm R2 téměř shodné.



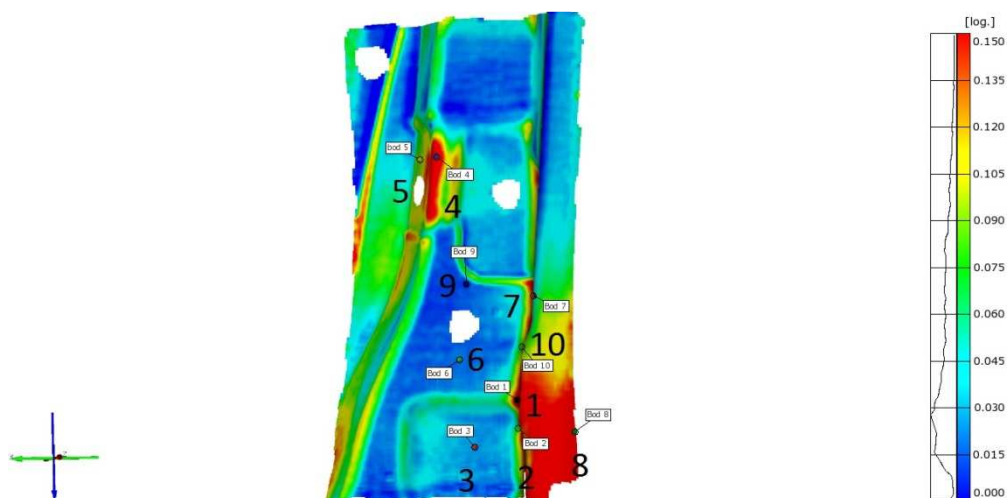
Obr. 7.9 Hodnoty ztenčení

7.4.2 Porovnání hodnot ztenčení pomocí bodů oblast 2



Obr. 7.10 Oblast 2 s vyznačenými body a řezem

Na Obr. 7.10 je zobrazena oblast 2 na výřezu z reálného výlisku. Na výlisku jsou vyznačeny body a řez potřebný pro další experimentální část diplomové práce. Na Obr. 7.11 jsou vyznačeny body v systému Argus. V oblasti 2 bylo vybráno 10 bodů.



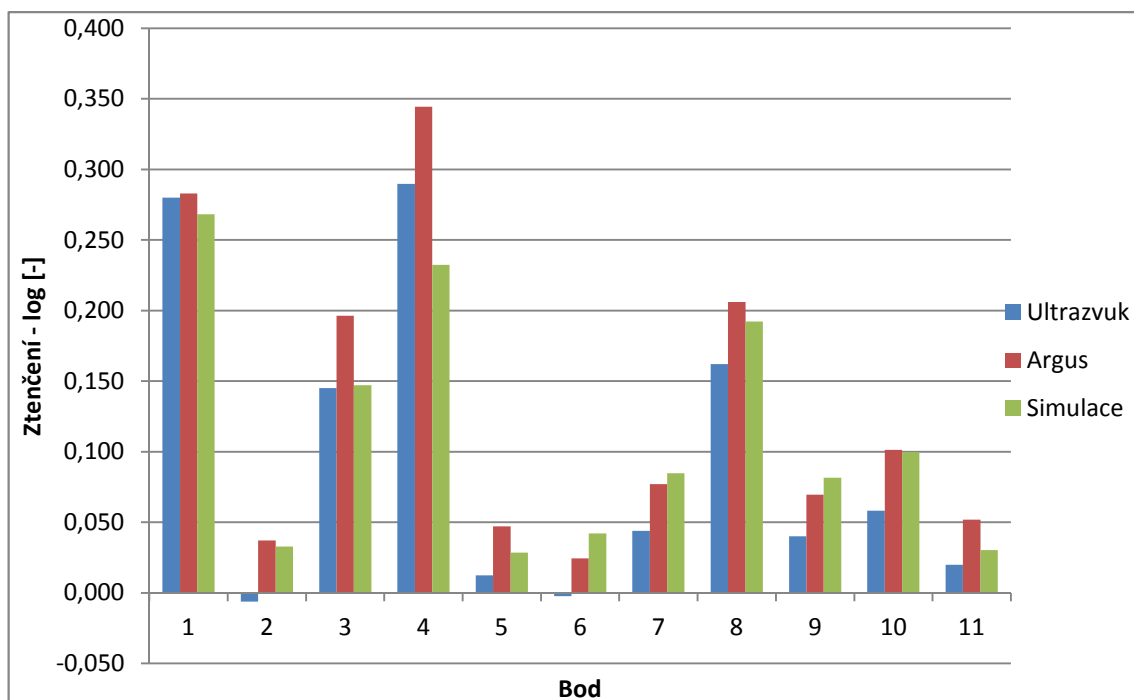
Obr. 7.11 Rozložení φ_3 v oblasti 2

V Tab. 7.2 hodnoty tloušťky materiálu v měřených bodech.

Tab. 7.7 Tloušťka materiálu v měřených bodech

Bod	Způsob měření		
	Argus	Simulace	Ultrazvuk
	[mm]	[mm]	[mm]
1	0,675	0,729	0,763
2	0,680	0,712	0,710
3	0,796	0,783	0,820
4	0,670	0,722	0,747
5	0,748	0,739	0,780
6	0,801	0,791	0,829
7	0,732	0,755	0,766
8	0,617	0,678	0,639
9	0,807	0,793	0,833
10	0,674	0,708	0,700

V grafu na Obr. 7.12 jsou zobrazeny hodnoty ztenčení



Obr. 7.12 Hodnoty ztenčení

Vyhodnocení rozdílu v oblasti 2 nebylo prováděno, z důvodu odlišných dat pro numerickou simulaci tvářecího procesu a dat naměřených bezkontaktním měřicím systémem Argus (plocha nástroje v oblasti 2 byla

V Tab. 7.8 hodnoty tloušťky materiálu v měřených bodech.

Tab. 7.8 Tloušťka materiálu v měřených bodech

Bod	Způsob měření		
	Argus	Simulace	Ultrazvuk
	[mm]	[mm]	[mm]
1	0,673	0,676	0,682
2	0,682	0,690	0,726
3	0,795	0,767	0,820
4	0,722	0,635	0,742
5	0,790	0,774	0,810
6	0,799	0,790	0,818
7	0,683	0,722	0,718
8	0,746	0,741	0,771
9	0,796	0,791	0,815
10	0,776	0,782	0,800

Tab. 7.9 Porovnání hodnot

Bod	Rozdíl ultrazvuk - Argus	Rozdíl ultrazvuk - simulace	Rozdíl ultrazvuk - Argus	Rozdíl ultrazvuk - simulace
	[mm]	[mm]	[%]	[%]
1	0,009	0,006	1,33	0,88
2	0,044	0,036	6,01	4,99
3	0,025	0,053	3,00	6,44
4	0,020	0,107	2,76	14,46
5	0,020	0,036	2,44	4,44
6	0,019	0,028	2,37	3,42
7	0,035	-0,004	4,83	0,54
8	0,025	0,030	3,19	3,85
9	0,019	0,024	2,34	2,96
10	0,024	0,018	3,05	2,21

V Tab. 7.9 jsou zobrazeny hodnoty rozdílů hodnot zjištěných pomocí ultrazvuku a pomocí systému Argus, resp. simulací v programu AutoForm R2 v milimetrech a v procentech. Z Tab. 7.9 je patrné, že největší rozdíl hodnot nastává v bodě 2 v případě rozdílu ultrazvuk – Argus (6,01%), a v bodě 4 v případě rozdílu ultrazvuk AutoForm R2 (14,46). V bodě 2 i 4 dochází k velkému ztenčení. Z hodnot rozdílů byl vypočten medián (Tab. 7.10). Z Tab. 7.10 je patrné, že v případě oblasti 3 jsou přesnější hodnoty zjištěné pomocí bezkontaktního měřicího systému Argus.

Tab. 7.10 Medián rozdílů

Medián rozdílů ultrazvuk – Argus	Medián rozdílů ultrazvuk - simulace
[%]	[%]
2,88	3,64

V Tab. 7.11 jsou zobrazeny hodnoty rozdílů hodnot zjištěných pomocí bezkontaktního měřicího systému Argus a hodnot zjištěných pomocí simulace v programu AutoForm R2 a to v milimetrech a v procentech. Z Tab. 7.11 je patrné, že k největší diferenci mezi hodnotami dochází v bodě 4, v kterém dochází k vysokému ztenčení. V Tab. 7.12 je zapsána hodnota mediánu z rozdílů mezi měřením pomocí bezkontaktního systému Argus a simulací v programu AutoForm R2 vyjádřena v procentech.

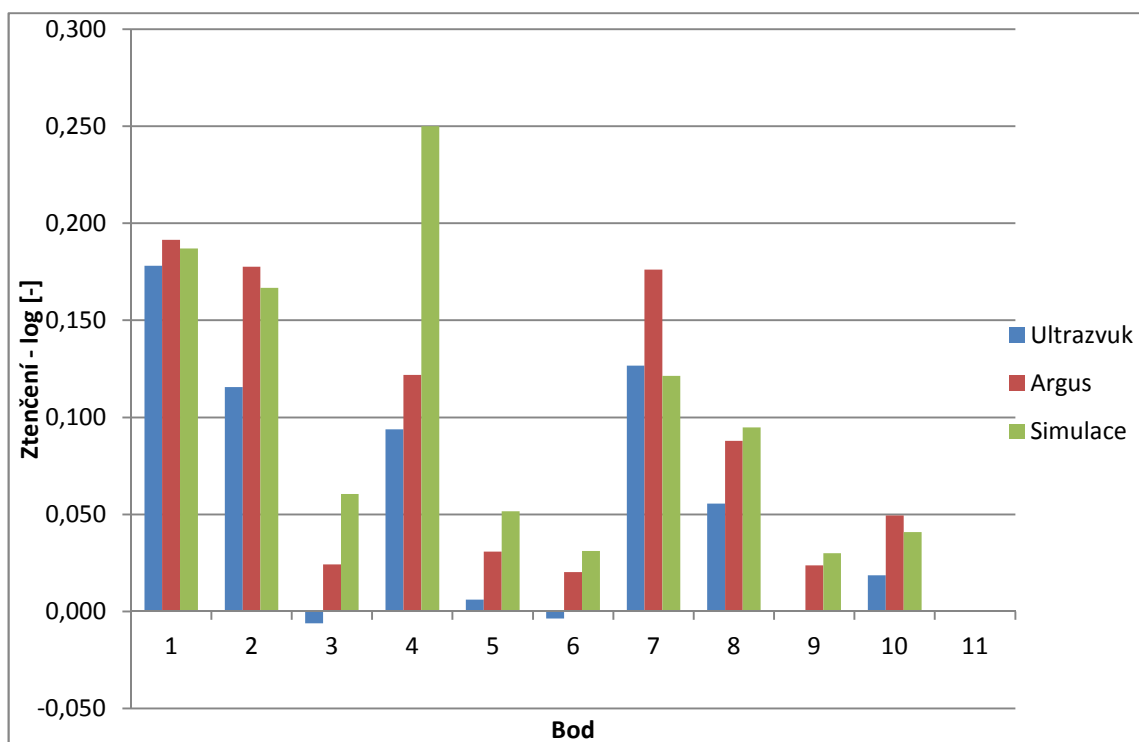
Tab. 7.11 Hodnoty ztenčení v měřených bodech

Bod	Rozdíl Argus - simulace	Rozdíl Argus - simulace
	[mm]	[%]
1	0,004	0,59
2	0,009	1,25
3	-0,036	4,55
4	-0,128	17,77
5	-0,020	2,58
6	-0,011	1,35
7	-0,037	5,37
8	-0,007	0,92
9	-0,006	0,79
10	0,009	1,11

Tab. 7.12 Medián rozdílů Argus - simulace

Medián rozdílů Argus - simulace
[%]
1,30

V grafu na Obr. 7.15 jsou zobrazeny hodnoty ztenčení



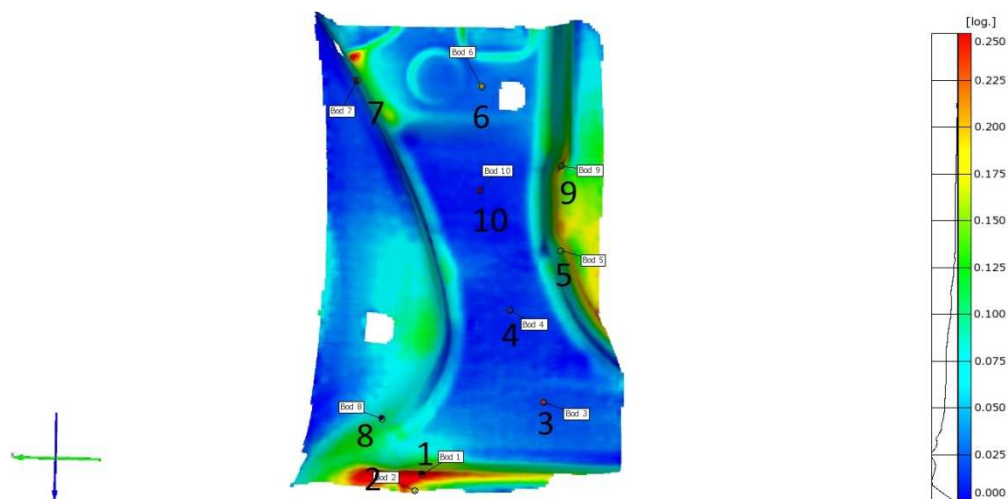
Obr. 7.15 Hodnoty ztenčení

7.4.4 Porovnání hodnot pomocí bodů oblasti 4



Obr. 7.16 Oblast 4 s vyznačenými body a řezy

Na Obr. 7.16 je zobrazena oblast 4 na výřezu z reálného výlisku. Na výlisku jsou vyznačeny body a řezy potřebné pro experimentální část diplomové práce. Na Obr. 7.17 jsou vyznačeny body v systému Argus. V oblasti 4 bylo vybráno 10 bodů.



Obr. 7.17 Rozložení ϕ_3 v oblasti 4

V Tab. 7.13 jsou hodnoty ztenčení v měřených bodech

Tab. 7.13 Tloušťka materiálu v měřených bodech

bod	Způsob měření		
	Argus	Simulace	Ultrazvuk
	[mm]	[mm]	[mm]
1	0,621	0,671	0,630
2	0,678	0,719	0,688
3	0,799	0,794	0,821
4	0,807	0,802	0,830
5	0,722	0,728	0,742
6	0,794	0,786	0,815
7	0,761	0,780	0,780
8	0,741	0,740	0,757
9	0,640	0,692	0,685
10	0,810	0,804	0,834

Tab. 7.14 Porovnání hodnot

Bod	Rozdíl ultrazvuk - Argus	Rozdíl ultrazvuk - simulace	Rozdíl ultrazvuk - Argus	Rozdíl ultrazvuk - simulace
	[mm]	[mm]	[%]	[%]
1	0,009	-0,041	1,38	6,48
2	0,010	-0,031	1,45	4,48
3	0,022	0,027	2,68	3,29
4	0,023	0,028	2,82	3,40
5	0,020	0,014	2,75	1,93
6	0,021	0,029	2,60	3,56
7	0,019	0,000	2,45	0,00
8	0,016	0,017	2,12	2,31
9	0,045	-0,007	6,56	0,97
10	0,024	0,030	2,84	3,64

V Tab. 7.14 jsou zobrazeny hodnoty rozdílů hodnot zjištěných pomocí ultrazvuku a pomocí systému Argus, resp. simulací v programu AutoForm R2 v milimetrech a v procentech. Z Tab. 7.14 je patrné, že největší rozdíl hodnot nastává v bodě 9 v případě rozdílu ultrazvuk – Argus (6,56%), a v bodě 1 v případě rozdílu ultrazvuk AutoForm R2 (6,48%). V bodě 9 i 1 dochází k velkému ztenčení. Z hodnot rozdílů byl vypočten medián (Tab. 7.10). Z Tab. 7.15 lze usoudit, že v případě oblasti 4 jsou přesnější hodnoty zjištěné pomocí bezkontaktního měřicího systému Argus.

Tab. 7.15 Medián rozdílů

Medián rozdílů ultrazvuk – Argus	Medián rozdílů ultrazvuk - simulace
[%]	[%]
2,64	3,35

V Tab. 7.16 jsou zobrazeny hodnoty rozdílů hodnot zjištěných pomocí bezkontaktního měřicího systému Argus a hodnot zjištěných pomocí simulace v programu AutoForm R2 a to v milimetrech a v procentech. Z Tab. 7.16 je patrné, že k největší diferenci mezi hodnotami dochází v bodě 9, v kterém dochází k vysokému ztenčení. V Tab. 7.17 je zapsána hodnota mediánu z rozdílů mezi měřením pomocí bezkontaktního systému Argus a simulací v programu AutoForm R2 vyjádřena v procentech.

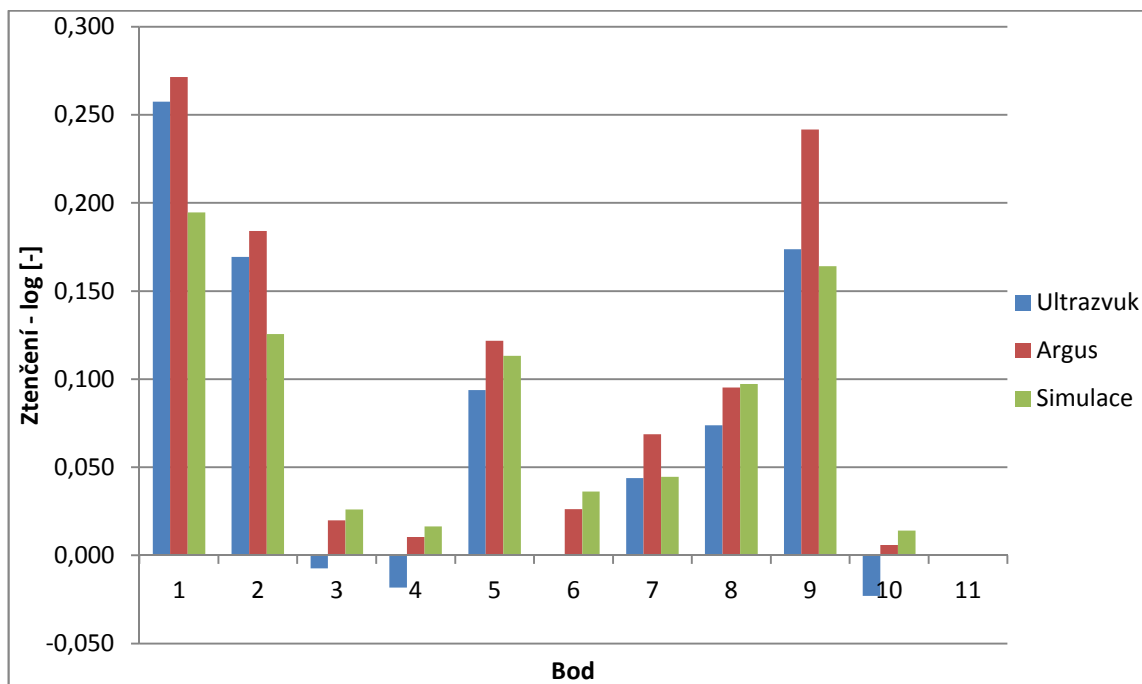
Tab. 7.16 Tloušťka materiálu v jednotlivých bodech

Bod	Rozdíl Argus - simulace	Rozdíl Argus - simulace
	[mm]	[%]
1	-0,050	7,97
2	-0,041	6,01
3	0,005	0,63
4	0,005	0,60
5	-0,006	0,84
6	0,008	1,00
7	-0,019	2,45
8	0,001	0,19
9	-0,052	8,06
10	0,007	0,82

Tab. 7.17 Medián rozdílů

Medián rozdílů Argus - simulace
[%]
0,92

V grafu na Obr. 7.18 jsou zobrazeny hodnoty ztenčení



Obr. 7.18 Hodnoty ztenčení

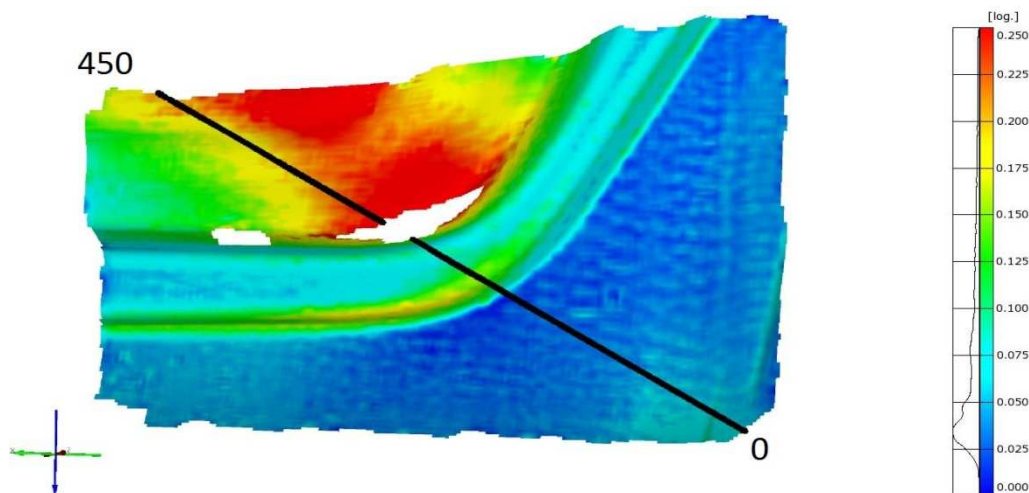
7.5 Porovnání hodnot ztenčení pomocí řezů

V následujícím experimentu bylo provedeno měření ztenčení pomocí řezů. V systému Argus byl proveden řez. Stejný řez byl proveden v simulaci programu AutoForm R2. Následně byl tento řez vyznačen na reálném výtažku. Tento řez byl rozdělen na body, které byly od sebe vzdáleny 20 mm. V těchto bodech byla změřena hodnota ztenčení v mm pomocí ultrazvukového měřiče StressTel model TM1 CD2 od firmy Ge Inspection Technologies. Naměřená hodnota byla převedena na logaritmické hodnoty pomocí vztahu 7.4. Původní tloušťka materiálu $t_0=0,815\text{mm}$.

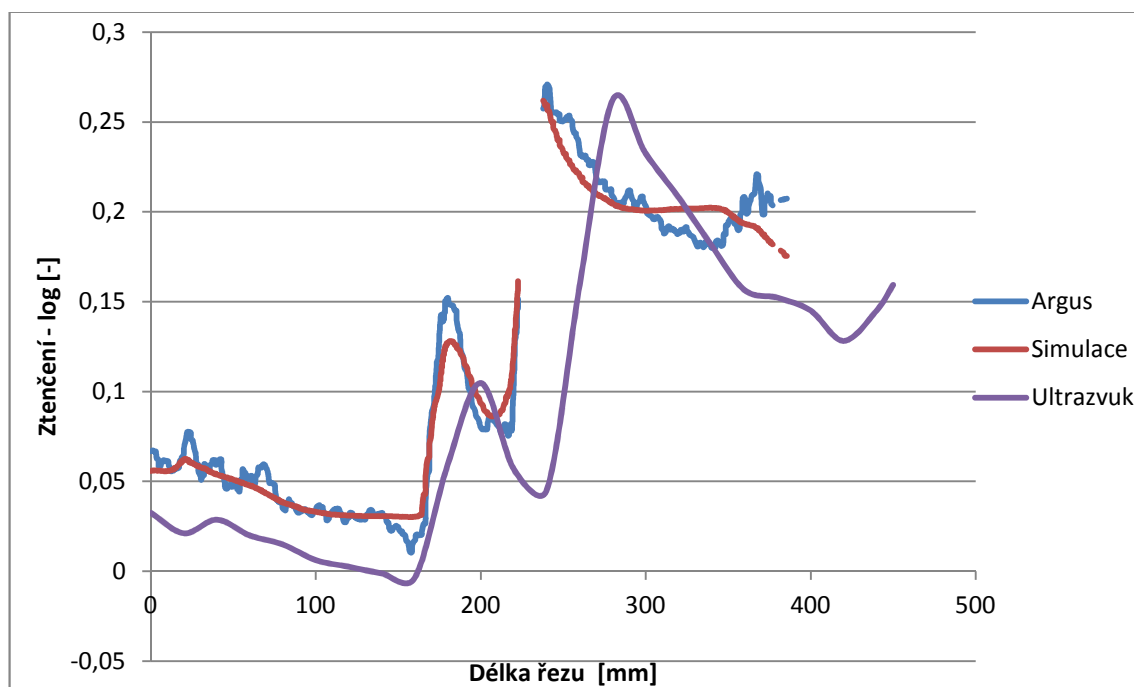
$$\varphi_3 = \ln \frac{t_1}{t_0} \quad (7.4)$$

7.5.1 Porovnání hodnot ztenčení pomocí řezu v oblasti 1

Na Obr. 7.7 je zobrazen řez na reálném výlisku. Na Obr. 7.19 je zobrazen řez v systému Argus.



Obr. 7.19 Řez v oblasti 1

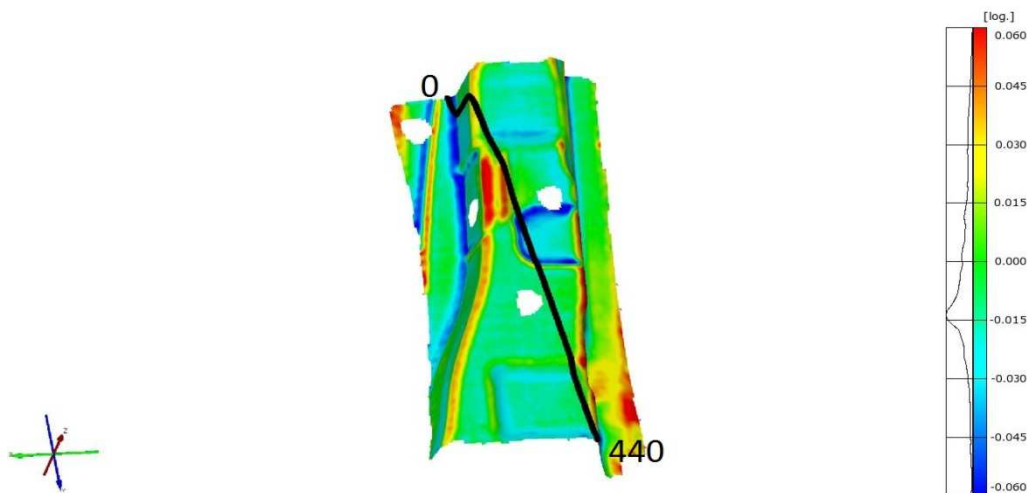


Obr. 7.20 Závislost ztenčení na délce řezu

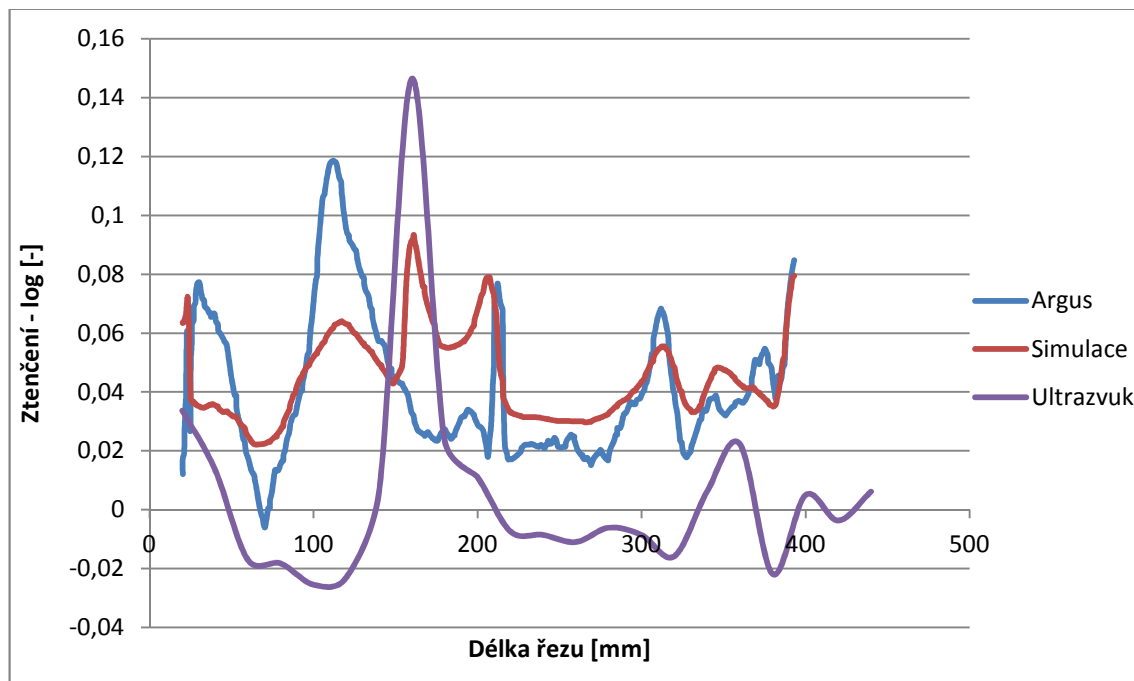
Graf na Obr. 7.20 zobrazuje závislost ztenčení v logaritmických souřadnicích na délce řezu vedeného výliskem. Je zjevné, že křivky zjištěné pomocí bezkontaktního optického systému Argus a pomocí simulace v programu AutoForm R2 spolu korespondují. V oblastech vysokého ztenčení (200-400 mm) je vidět větší rozdíl mezi oběma křivkami.

7.5.2 Porovnání hodnot ztenčení pomocí řezu v oblasti 2

Na Obr. 7.10 je zobrazen řez na reálném výlisku. Na Obr. 7.21 je zobrazen řez v systému Argus.



Obr. 7.21 Řez v oblasti 2

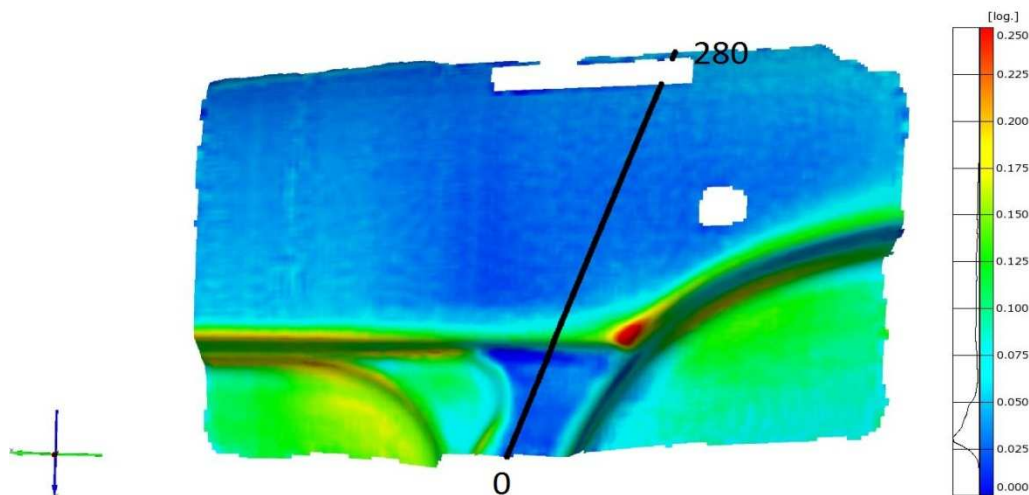


Obr. 7.22 Závislost ztenčení na délce řezu

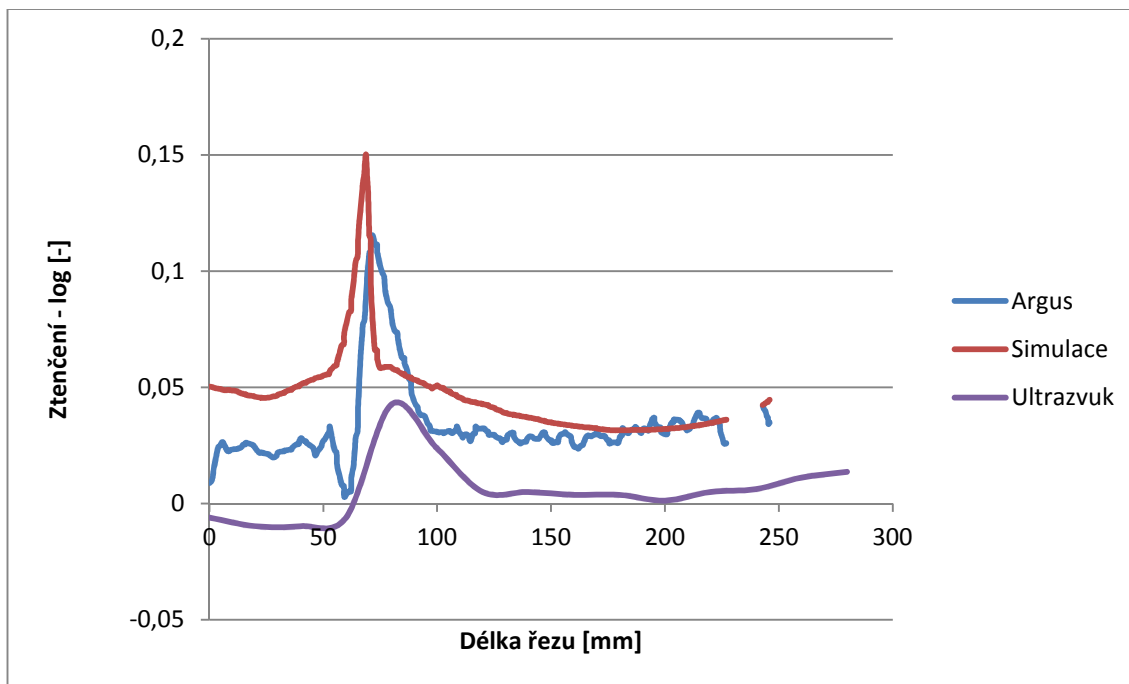
Porovnání hodnot ztenčení v oblasti 2 nebylo provedeno, z důvodu odlišných dat pro numerickou simulaci tvářecího procesu a dat naměřených bezkontaktním měřícím systémem Argus (plocha nástroje v oblasti 2 byla dodatečně upravena a tato změna nebyla zpětně zanesena do dat pro numerickou simulaci).

7.5.3 Porovnání hodnot ztenčení pomocí řezu 1 v oblasti 3

Na Obr. 7.13 je zobrazen řez 1 na reálném výlisku. Na Obr. 7.23 je zobrazen řez v systému Argus.



Obr. 7.23 Řez 1 v oblasti 3

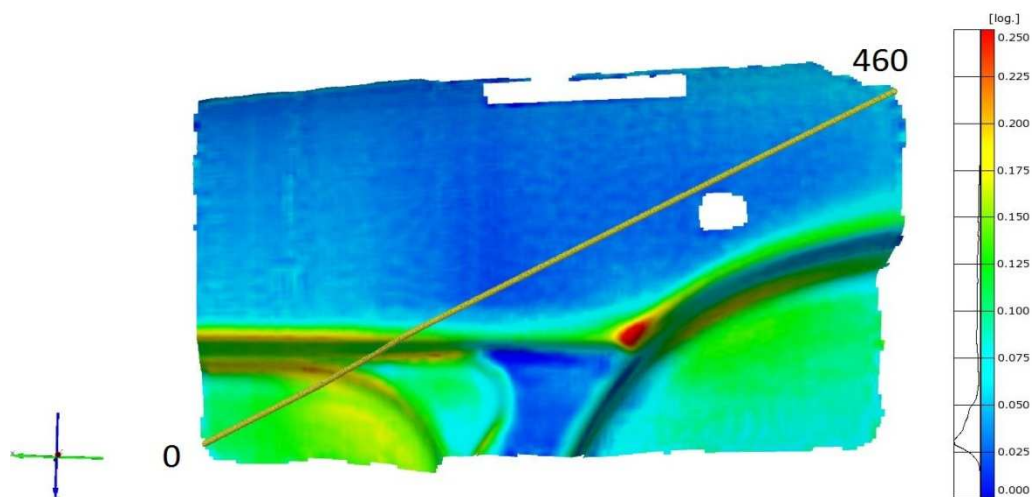


Obr. 7.24 Závislost ztenčení na délce řezu

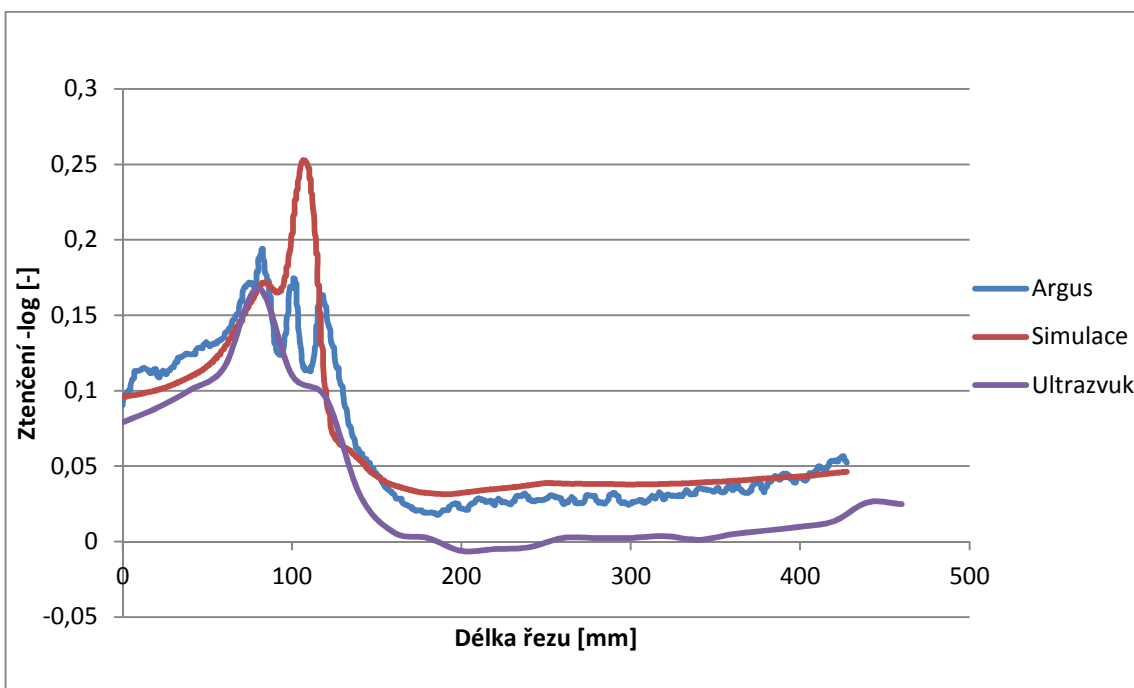
V grafu na Obr. 7.24 je zobrazena závislost ztenčení v logaritmických souřadnicích v závislosti na délce řezu vedeného výliskem. Z grafu vyplývá částečná shoda křivky zjištěných pomocí bezkontaktního systému Argus a pomocí simulace v programu AutoForm R2. Z grafu je zjevné, že shoda je menší než u řezu v oblasti 1.

7.5.4 Porovnání hodnot ztenčení pomocí řezu 2 v oblasti 3

Na Obr. 7.13 je zobrazen řez 2 na reálném výlisku. Na Obr. 7.25 je zobrazen řez v systému Argus.



Obr. 7.25 Řez 2 v oblasti 3

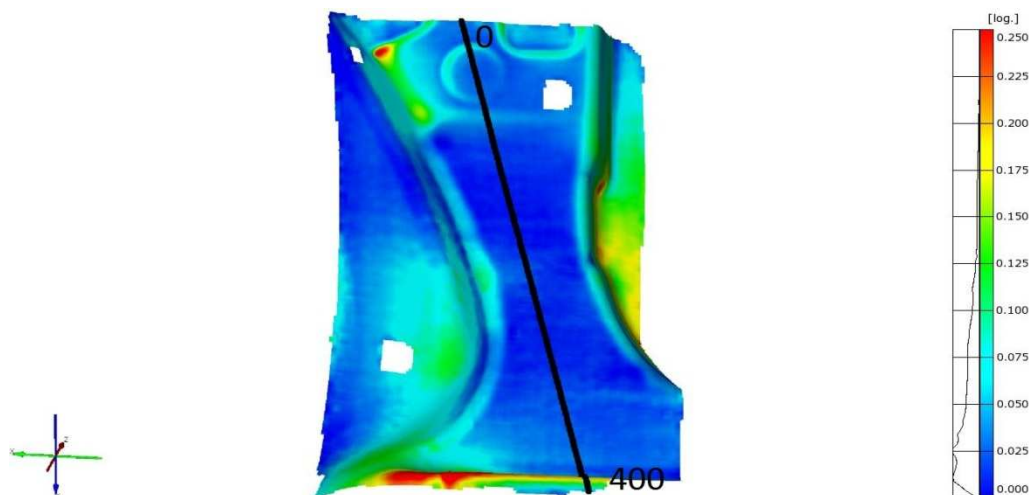


Obr. 7.26 Závislost ztenčení na délce řezu

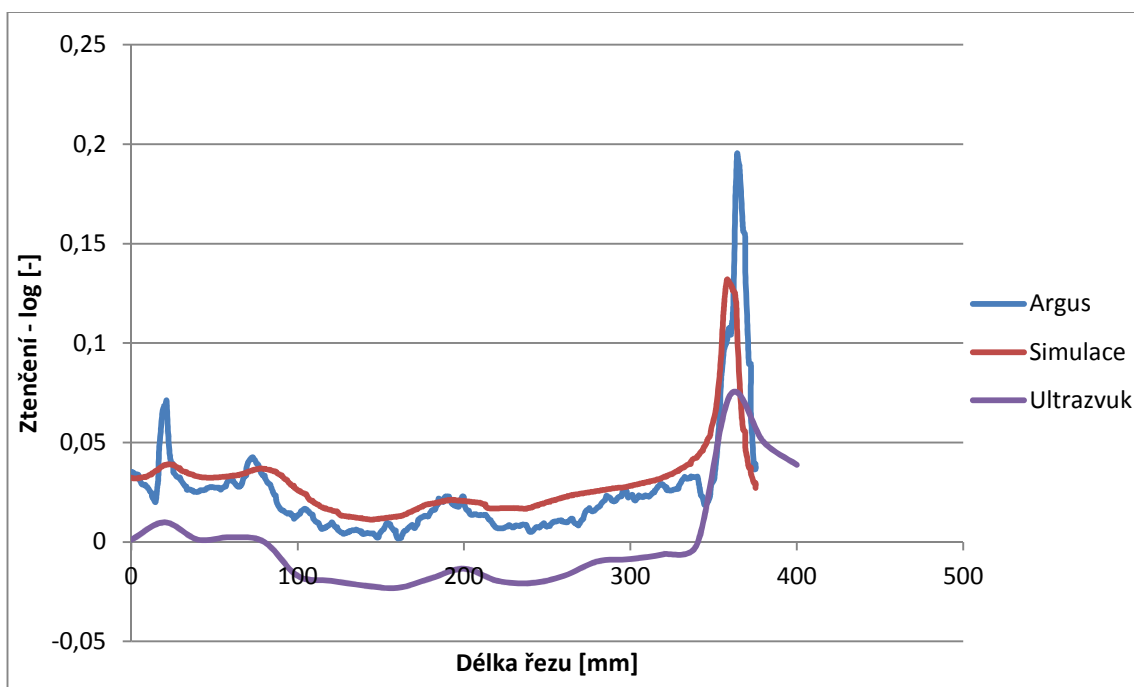
Na Obr. 7.26 je zobrazen graf závislosti ztenčení v logaritmických souřadnicích v závislosti na délce řezu vedeného výliskem. Z grafu je patrná shoda křivek zjištěných pomocí bezkontaktního měřicího systému Argus a pomocí simulace v programu AutoForm R2. Diference jsou patrné v oblastech velkého ztenčení (80-150mm).

7.5.5 Porovnání hodnot ztenčení pomocí řezu 1 v oblasti 4

Na Obr. 7.16 je zobrazen řez 1 na reálném výlisku. Na Obr. 7.27 je zobrazen řez v systému Argus.



Obr. 7.27 Řez 1 v oblasti 4

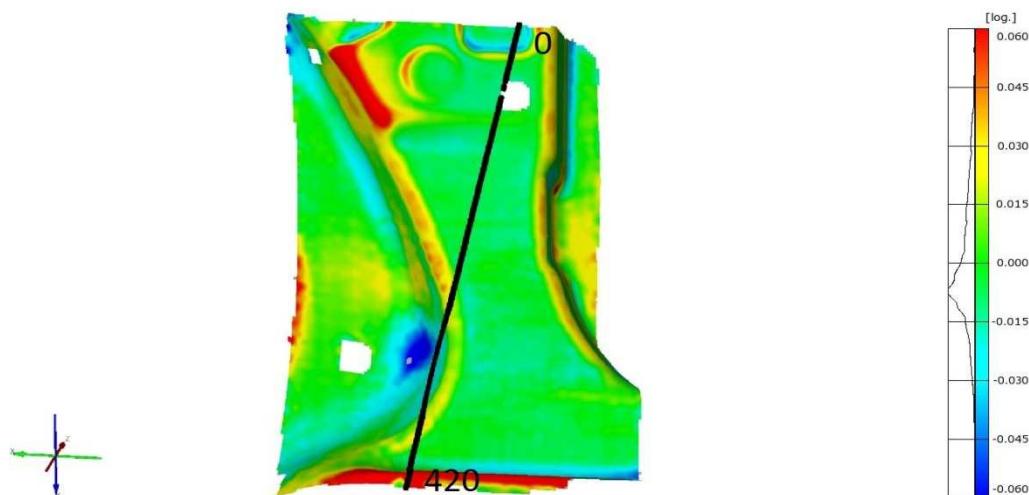


Obr. 7.28 Závislost ztenčení na délce řezu

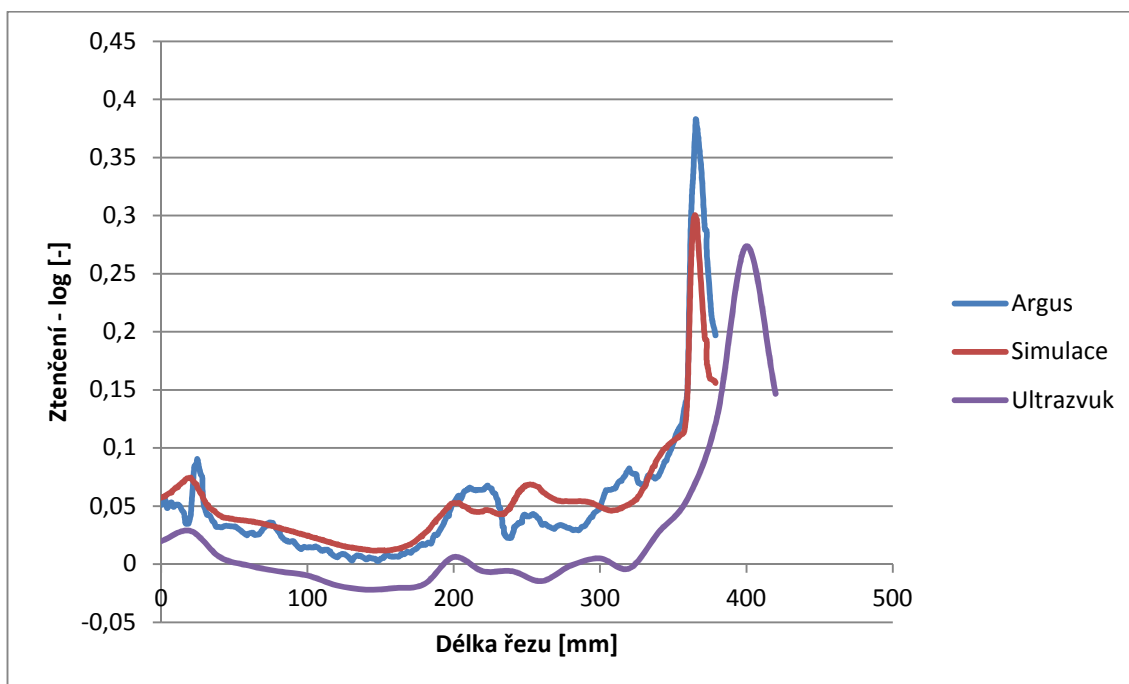
Na grafu na Obr. 7.28 je zobrazena závislost ztenčení v logaritmických souřadnicích na délce řezu, který je vedený výliskem. Na grafu je vidět vzájemná korespondence křivek zjištěných pomocí bezkontaktního měřicího systému Argus a pomocí simulace v programu AutoForm R2.

7.5.6 Porovnání hodnot ztenčení pomocí řezu 2 v oblasti 4

Na Obr. 7.16 je zobrazen řez 1 na reálném výlisku. Na Obr. 7.29 je zobrazen řez v systému Argus.



Obr. 7.29 Řez 2 v oblasti 4



Obr. 7.30 Závislost ztenčení na délce řezu

V grafu na Obr. 7.30 je zobrazena závislost ztenčení v logaritmických souřadnicích na délce řezu vedeného výliskem. Z grafu vyplývá shoda mezi křivkou zjištěnou pomocí bezkontaktního systému Argus a pomocí programu AutoForm R2.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo určení odchylky mezi numerickou simulací tvářecího procesu v programu AutoForm R2 a reálnými výsledky zjištěnými pomocí bezkontaktního měřicího systému Argus.

Materiál DC06 zvolený pro měření patří do skupiny hlubokotažných ocelí běžně používaných pro stavbu automobilové karoserie. Potřebné mechanické vlastnosti materiálu se naměřily pomocí statické zkoušky tahem. Diagram mezních přetvoření byl naměřen ve spolupráci s Technickou Univerzitou v Liberci pomocí bezkontaktního měřicího systému Aramis. Numerická simulace tvářecího procesu proběhla v programu AutoForm R2. Na reálném výlisku byly zvoleny čtyři oblasti s rizikem vzniku trhlin, nebo zvlnění. Na zvolené oblasti se pomocí elektrochemického leptání zhotovila deformační síť, potřebná pro vyhodnocení tvářecího procesu měřícím systémem Argus. Vytvořená deformační síť byla fotografována a následovalo lisování plechu. Po lisování následovalo další vyfotografování již přetvořeného dílu. Fotografie nanesené deformační sítě před a po lisování byly následně importovány do systému Argus a proběhl výpočet. V každé ze čtyř oblastí se zvolilo deset bodů, ve kterých se po lisování měřila tloušťka plechu (výlisku). Tloušťka plechu ve vybraných bodech se měřila v systému Argus, v simulaci v programu AutoForm R2 a pro kontrolu ultrazvukem na reálném výlisku. Naměřené tloušťky ve vybraných bodech pro všechny zvolené oblasti v závislosti na poloze bodu a způsobu měření jsou uvedeny v grafech v diplomové práci.

V oblasti 1 je největší odchylka tloušťky materiálu (výlisku) mezi numerickou simulací tvářecího procesu a měřením v systému Argus v bodě 4, rozdíl tloušťky v tomto případě činí 11,84 %. Medián odchylek ze všech měřených bodů v oblasti 1 je 1,49 %.

Vyhodnocení rozdílů tloušťky materiálu oblasti 2 nebylo možné provést z důvodu dodatečné úpravy tažného nástroje. Skutečný tvar tažného nástroje neodpovídal technickým datům použitým v numerické simulaci tvářecího procesu.

V oblasti 3 vykazuje největší odchylku 17,77% hodnota naměřena v bodě 4. Medián všech odchylek naměřených hodnot tloušťky materiálu v oblasti 3 je 1,30 %.

Poslední měřená oblast 4 vykazovala největší odchylku v bodě 1 a to 7,97%. Medián odchylek všech naměřených bodů v oblasti 4 je 0,92%.

Na základě zjištěných výsledků je patrné, že simulace tvářecího procesu v programu AutoForm R2 a výpočet bezkontaktním měřicím systémem Argus vykazuje minimální odchylky ve výpočtu ztenčení materiálu. Největší rozdíly jsou dle předpokladů v místech největší deformace. V těchto místech dochází k velkému ztenčení materiálu a lokalizaci napětí. Průměrný rozdíl tloušťky materiálu v měřených bodech mezi simulací a měřicím systémem Argus je 1,23% . I přes na první pohled zanedbatelnou odchylku může toto číslo v reálném procesu lisování znamenat (ve vysoce namáhaných oblastech) hranici mezi dobrým a špatným výliskem. S přihlédnutím k tomu, že v počátečních etapách každého dílu se provádějí numerické simulace tvářecího procesu, kde v hraničních oblastech výlisku může každé procento ztenčení rozhodnout o správnosti tahového modelu.

Program AutoForm R2 umožňuje s vysokou přesností vypočítat simulaci tvářecího procesu. Pouze v místech výlisku, s velkými deformacemi za mezí pevnosti jsou hodnoty mezi simulací a reálným stavem odlišné. Na základě těchto zjištění lze usoudit, že AutoForm R2 ve spojení se zkušeným konstruktérem, je vhodný nástroj pro simulaci tažení plechu. Doporučuji více využívat bezkontaktního systému Argus pro ověření správnosti simulace tvářecího procesu již ve fázi zapracovávání nástroje. Optimalizací současného využívání těchto metod dojde ke snížení času potřebného k zapracování nástroje, což může přinést významné úspory v nákladech na výrobu lisovacích nástrojů.

Firma AutoForm Engineering GmbH vyvíjí nové verze výpočtového modelu programu AutoForm doporučuji proto podobným způsobem testovat nové verze programu AutoForm.

Seznam použitých zdrojů

1. VOJTĚCH D.: *Kovové materiály*. 1. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006. ISBN 80-7080-600-1
2. PTÁČEK, Luděk et al. *Nauka o materiálu I*. V Brně: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001, 505 s. ISBN 80-7204-193-2.
3. KRUML, Tomáš a Jeane-Pierre MICHEL. *Krystalová struktura pevných látek* [online]. V Brně, 2009 [cit. 2012-02-28]. 49 s. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/WDD/krystalografie09.pdf>. Vysoké učení technické v Brně.
4. WASSERBAUER. *Modifikace vyhodnocování diagramů mezních přetvoření pro vysokopevnostní materiály pomocí sledování rozložení přetvoření podél měřeného vzorku*. Technická univerzita v Liberci, 2010. Technická univerzita v Liberci.
5. LENFELD, Petr. *Technologie tváření kovů* [online]. Technická univerzita v Liberci [cit. 2012-02-28]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/obsah.htm
6. Plasticita. In: [online]. [cit. 2012-03-01]. Dostupné z: ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/GS0-K/03_MS6K.ppt
7. Fotogrammetrie. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-20-02]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Fotogrammetrie>
8. BOHM, Josef. *Fotogrammetrie: učební texty*. Ostrava, 2002. Dostupné z: <http://igdm.vsb.cz/igdm/materialy/Fotogrammetrie.pdf>. Vysoká škola báňská-technická univerzita Ostrava.
9. HORÁK, Lukáš. *Zjištění křivek přetvárné pevnosti pomocí optického systému ARAMIS*. Liberec, 2011. Diplomová. Technická univerzita v Liberci.
10. VYČICHLO, Tomáš. *Soudobé využití fotogrammetri při projektování a výstavbě dálnice*. Plzeň, 2007. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni.
11. ARGUS/MCAE Systems. MCAE SYSTEMS, s.r.o. MCAE Systems: ARGUS [online]. 2012 [cit. 2012-03-01]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/>
12. SOLFRONK, Pavel a Tomáš JÍRA. *Využití optického systému ARGUS 4M v kritických oblastech karosářského výlisku*. [online]. 2010 [cit. 2012-03-05]. Dostupné z: http://www.metal2012.com/files/proceedings/metal_10/lists/papers/150.pdf
13. SLOTA, J. a E. SPÍŠÁK. *Comparision of the forming - limit diagram (FLD) models for drawing quality (QC) steel sheets*. Metalurgia 44 [online]. 2005 [cit. 2012-03-15]. ISSN 0543-5846. Dostupné z: http://public.carnet.hr/metalurg/Metalurgija/2005_vol_44x/No_4/MET_44_4_249_253_Slota.pdf
14. PEPELNJAK, T. a K. KUZMAN. *Numerical determination of the forming limits diagram: Analysis and modelling*. Journal: of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering [online]. 2007 [cit. 2012-04-01]. Dostupné z: http://journalamme.org/papers_vol20/1490S.pdf

15. SOBOTKA, Jiří. Formability of TWIP Materials and its Evaluation by Optical Systems. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2010. ISBN 978-80-7372-681-2.
16. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. Technologie tváření. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2003. ISBN 80-214-2340-4
17. POLYMER COMPETENCE CENTER LEOBEN GMBH. Polymer Competence Center Loeben [online]. 2012 [cit. 2012-03-30]. Dostupné z: <http://www.pccl.at/seite.php>
18. Návrh formy pro hluboké tažení plechů. MM průmyslové spektrum [online]. 2001, roč. 2001, č. 4 [cit. 2012-04-01]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/navrh-formy-pro-hluboke-tazeni-plechu.html>
19. AUTOFORM ENGINEERING GMBH, Schweiz. AutoForm forming reality [online]. [cit. 2012-04-01]. Dostupné z: <http://www.autoform.com/en/products/product-overview>
20. PWO UNITOOLS CZ A.S. Autoform [online]. 2006 [cit. 2012-04-01]. Dostupné z: <http://www.unitools.cz/cz/vyvoj-a-vyroba/k-autoform.php>
21. Trendy ve vývoji plechů pro automobilový průmysl. [online]. [cit. 2012-04-01]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/spt/pevnostni%20plechy.pdf
22. Ptáček, Nauka o materiálu 2
23. TSIPOURIDIS, Prodromos. Mechanical properties of Dual-Phase steels. Mnichov, 2006. Dizertační. Technischen universitat München.
24. KUČERA, Otta. Metodické plánování a konstrukce lisovacího náradí Škoda. Mladá Boleslav, 2011.
25. KUČERA, Otta. Analýza simulace tažení v programu AutoForm R2 a porovnání s reálnými výsledky získanými systémem Argus. Mladá Boleslav, 2011.
26. Střední hodnoty. FAKULTA VETERINÁRNÍHO LÉKAŘSTVÍ. [online]. [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: <http://cit.vfu.cz/stat/FVL/Teorie/Predn1/strednih.htm>
27. POPELA, Libor. Počet pracovníků v českém automobilovém průmyslu se loni zvýšil 110 735, rostla i mzda. [online]. [cit. 2012-05-08]. Dostupné z: <http://www.mediafax.cz/ekonomika/4013257-Pocet-pracovniku-v-ceskem-automobilovem-prumyslu-se-loni-zvysil-110-735-rostla-i-mzda>
28. BLAŽEK, Miroslav. Určení technologie lisování plechového dílu: Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. s.85, Ing. Jan Zouhar, PhD.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

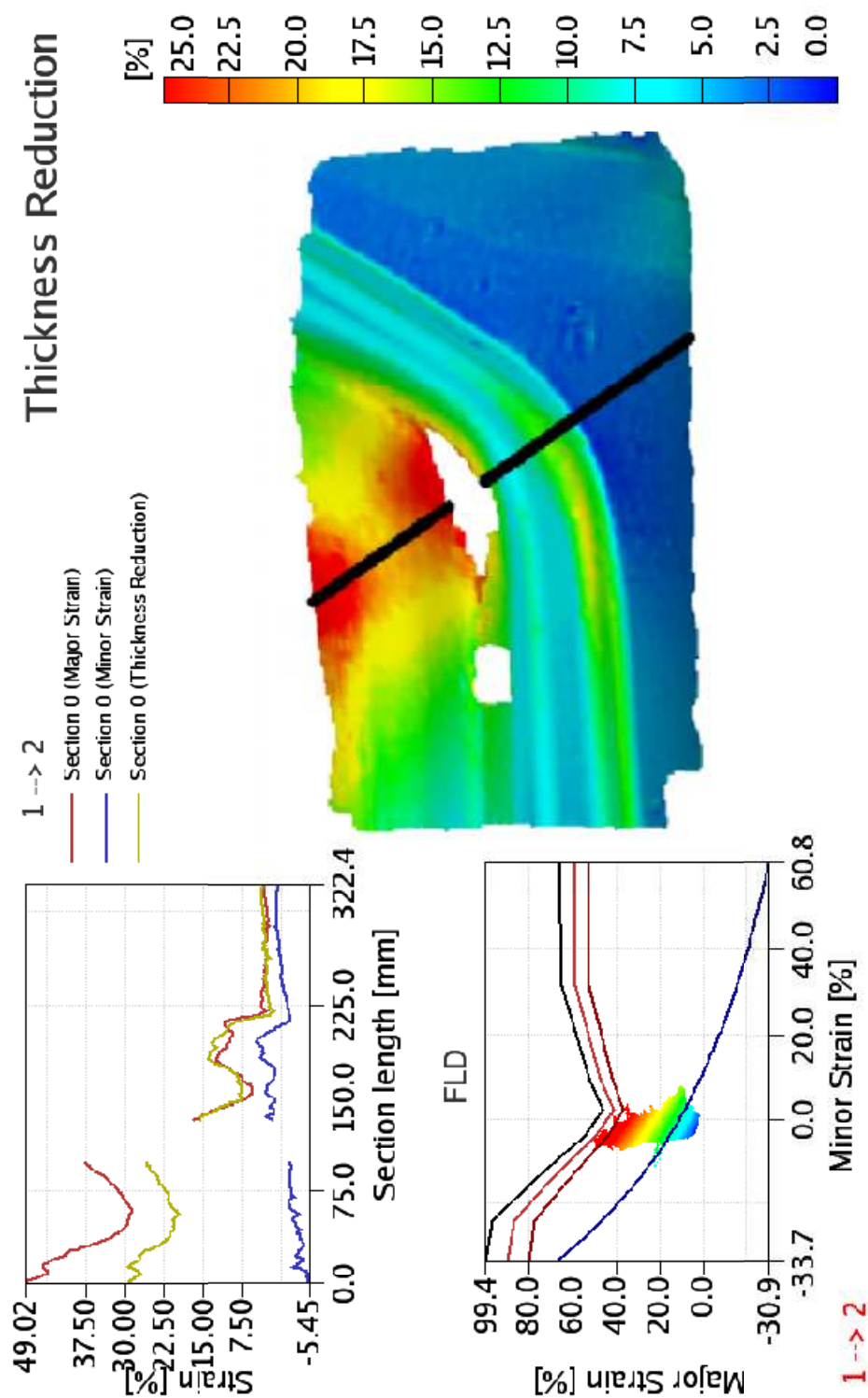
Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
CAD	[-]	Computer Aided Design
σ	[MPa]	Napětí
E	[MPa]	Yongův modul pružnosti
F	[N]	celková síla
ϵ	[-]	poměrné prodloužení
G	[MPa]	modul pružnosti v tahu
γ	[-]	Zkos
R_m	[MPa]	mez pevnosti
A_{80mm}	[%]	tažnost materiálu
Z	[%]	Kontrakce
HV	[HV]	tvrdost podle Vickerse
A	[-]	plošná anizotropie
N	[-]	normálová anizotropie
R_{min}	[mm]	minimální poloměr ohybu
R_e	[Mpa]	mez kluzu
CQ	[-]	comercial quality (plochy běžné kvality)
DQ	[-]	drawing quality (tažné plechy)
DDQ	[-]	deep drawing quality (hlubokotažné plechy)
EDDQ	[-]	extra deep drawing quality (zvlášť hlubokotažné plechy)
EDDQ-S	[-]	extra deep drawing quality – super (superhlubokotažné plechy)
R_{p0,2}	[MPa]	smluvní mez kluzu

r_{α}	[-]	normálová anizotropie
UH	[-]	ukazatel hlubokotažnosti
KUT	[-]	komplexní ukazatel hlubokotažnosti
IF	[-]	interstitials free steels
BH	[-]	baked hardened steels
DP	[-]	dual phase
$C_{\max}$	[%]	maximální obsah uhlíku
TRIP	[-]	transformation induced plasticity
TWIP	[-]	twinning induced plasticity
CP	[-]	complete phase
CCD	[-]	charged coupled devide
FLC	[-]	forming limite curve (křivky mezních přetvoření)
FLD	[-]	forming limit diagram (diagram mezních přetvoření)
$Al_{\max}$	[-]	maximální obsah hliníku
Si	[-]	Křemík
φ_1	[-]	hlavní přetvoření
φ_2	[-]	vedlejší přetvoření
φ_3	[-]	vedlejší přetvoření ve směru tloušťky
e	[-]	základ přirozeného logaritmu
ln	[-]	přirozený logaritmus
log	[-]	dekadický logaritmust
t_0	[mm]	původní tloušťka materiálu
t_1	[mm]	naměřená tloušťka materiálu

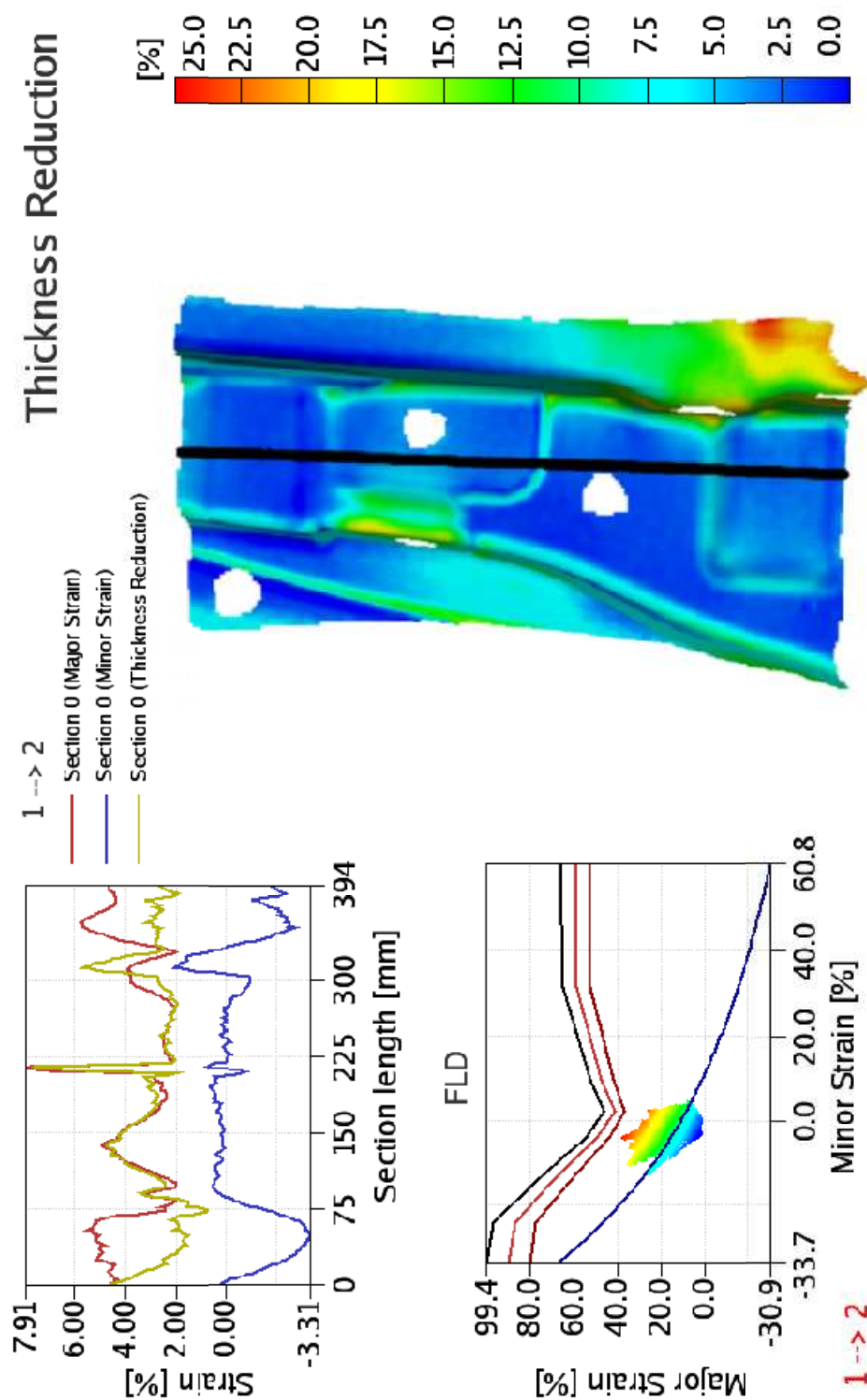
SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Celkový report bezkontaktního měřicího systému Argus oblast 1
Příloha 2 Celkový report bezkontaktního měřicího systému Argus oblast 2
Příloha 3 Celkový report bezkontaktního měřicího systému Argus oblast 3
Příloha 4 Celkový report bezkontaktního měřicího systému Argus oblast 4

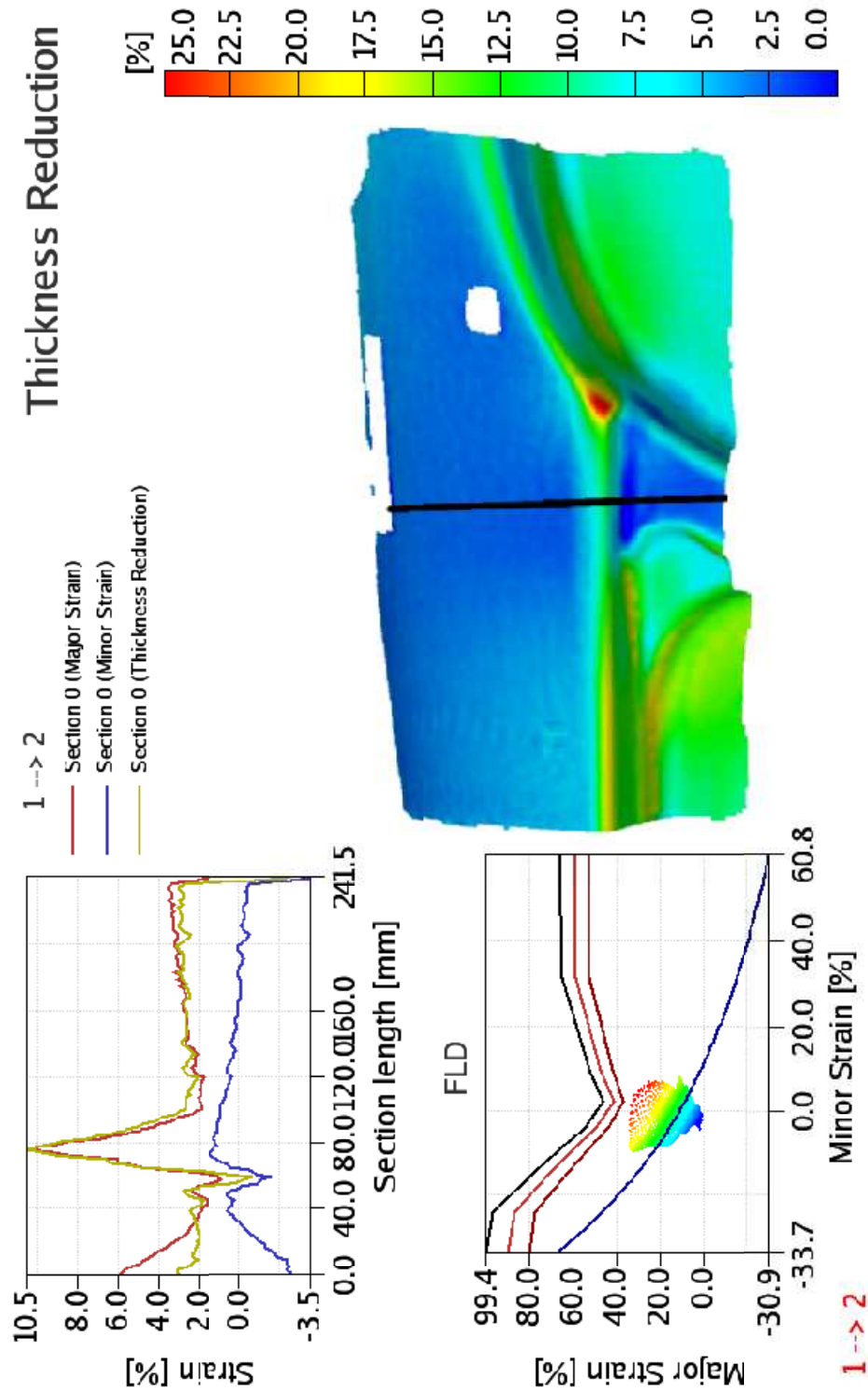
Příloha 1 - celkový report bezkontaktního měřicího systému Argus oblast 1



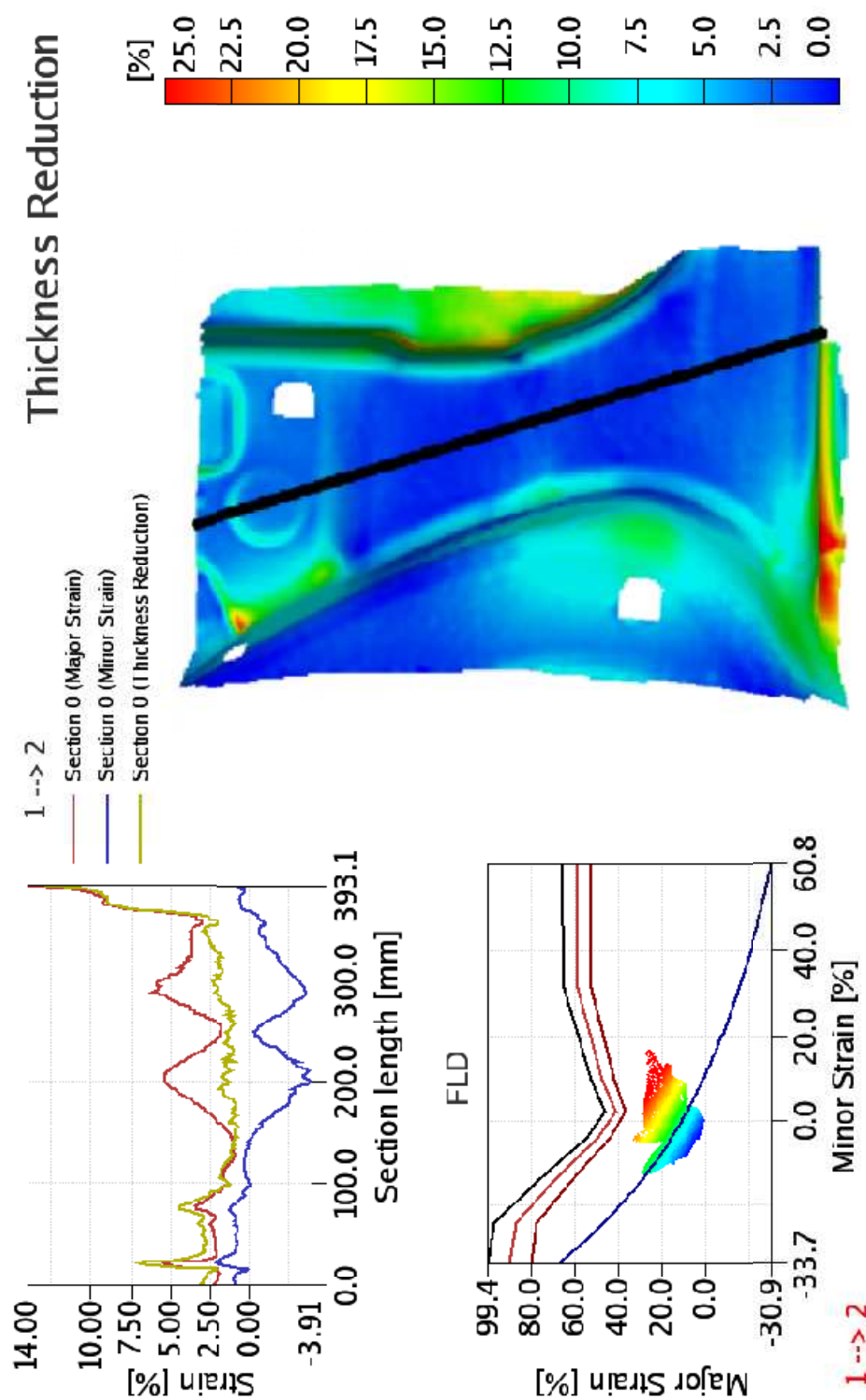
Příloha 2 - celkový report bezkontaktního měřicího systému Argus oblast 2



Příloha 3 - celkový report bezkontaktního měřicího systému Argus oblast 3



Příloha 4 - celkový report bezkontaktního měřicího systému Argus oblast 4



Skoda Auto
3/7/12

ARGUS

gom
www.gom.com