

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav strojírenské technologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vliv deformační rychlosti na stabilitu lisovacího procesu
karosářských výlisků

Autor: Bc. Michal Valeš

Studijní program: Výrobní a materiálové inženýrství

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

Praha 2016

ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro Bc. Michala VALEŠE

Program: Strojní inženýrství

Obor: Výrobní a materiálové inženýrství

Název: Vliv deformační rychlosti na stabilitu lisovacího procesu karosářských výlisků

Název anglicky: The influence of strain rate on the stability of the stamping process.

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky tváření a vlivu rychlosti deformace, popis současného stavu problematiky
2. Popis problematiky využití materiálových modelů a numerických simulací
3. Sledování vlivu rychlosti deformace na tvařitelnost, výtípnování vhodných karosářských výlisků
4. Ověření metodiky pomocí vhodného experimentu
5. Shrnutí výsledků a závěrečné zhodnocení

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Františka Tatíčka, Ph.D., a že jsem použil podklady uvedené v seznamu literatury.

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

V Praze dne 11. 8. 2016

.....

Bc. Michal Valeš

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu práce Ing. Františku Tatíčkoví, Ph.D., za vedení při vypracování diplomové práce, poskytnutí cenných rad, odborné literatury a ochotu konzultovat danou problematiku. Poděkování patří také společnosti ŠKODA AUTO, a.s., bez které by realizace práce nebyla možná. Zároveň bych chtěl poděkovat zaměstnancům oddělení PSW-P a PFS-K, jmenovitě pak Ing. Tomáši Pačákovi za faktické připomínky a vstřícnou pomoc.

Anotace

Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Název bakalářské práce:	Vliv deformační rychlosti na stabilitu lisovacího procesu karosářských výlisků
Akademický rok:	2015/2016
Autor:	Bc. Michal Valeš
Vedoucí práce:	Ing. František Tatiček, Ph.D.

Abstrakt:

Předmětem diplomové práce „Vliv deformační rychlosti na stabilitu lisovacího procesu“ je ověření vlivu deformační rychlosti na deformační chování vybraných karosářských výlisků. Teoretická část práce pojednává o problematice tvářecího procesu, deformační rychlosti a současnému stavu výzkumu. Experimentální část práce je zaměřena na sledování vlivu deformační rychlosti během reálného lisovacího procesu. Za tímto účelem byly dva vybrané díly virtuálně a fyzicky lisovány při různých rychlostech lisovacího taktu. Získané výsledky jsou hodnoceny a komentovány.

Klíčová slova: plošné tváření, rychlost deformace, lisovací proces, numerická simulace

Rozsah práce a příloh

Počet stran	67
Počet obrázků	45
Počet tabulek	15

Annotation

University:	Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Department of Manufacturing Technology
Title of work:	The influence of strain rate on the stability of the stamping process
Academic year:	2015/2016
Author:	Bc. Michal Valeš
Supervisor:	Ing. František Tatiček, Ph.D.

Abstract:

The subject of this diploma thesis „ The influence of strain rate on the stability of the stamping process” is to verify effect of strain rate on behavior of car body parts. The introductory part of this thesis deals with theories of metal forming, strain rate and the present situation in research. The practical part is focused on finding of strain rate impact on real stamping process. In order to achieve set goal, two selected body car parts were virtually and physically stamped at different stroke rate. Each experiment is evaluated and commented.

Keywords: sheet metal forming, strain rate, stamping process, numerical simulation

Volume of work

Number of pages	67
Number of pictures	45
Number of tables	15

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk.....	- 10 -
1 Úvod.....	- 11 -
2 Problematika tvářecího procesu	- 12 -
2.1 Faktory ovlivňující proces výroby výlisku	- 12 -
2.2 Hluboké tažení	- 13 -
2.3 Materiály používané v plošném tváření	- 16 -
2.3.1 Ploché výrobky k tváření za studena (D).....	- 16 -
2.3.2 Ploché výrobky válcované za studena z ocelí s vyšší mezí kluzu k tváření za studena (H).....	- 16 -
2.4 Lisy používané v automobilovém průmyslu	- 18 -
2.5 Ukazatel tvařitelnosti a zkoušky tvařitelnosti	- 20 -
2.6 Problematika ve zkušebnictví	- 22 -
3 Typy selhání a vad.....	- 23 -
4 Problematika deformační rychlosti.....	- 25 -
4.1 Definice deformační rychlosti.....	- 25 -
4.2 Vliv deformační rychlost na mechanické vlastnosti	- 26 -
4.3 Exponent deformační rychlosti, m	- 26 -
4.4 Stanovení exponentu deformační rychlosti	- 27 -
5 Popis problematiky využití matematických modelů a numerických simulací ...	- 28 -
5.1 Software pro numerickou simulaci	- 29 -
5.2 Aplikace materiálových dat do výpočtu.....	- 31 -
5.3 Nelineární koeficient tření.....	- 32 -
6 Měření deformací výlisků.....	- 34 -
6.1 Metoda měrných sítí.....	- 34 -
6.2 Optické systémy pro měření deformací plechu.....	- 34 -

6.2.1	Optické posouzení.....	- 36 -
6.3	Diagram mezního přetvoření.....	- 37 -
	Experimentální část.....	- 38 -
7	Návrh metodiky pro sledování vlivu rychlosti deformace na tvařitelnost	- 38 -
7.1	Vytipování vhodných výlisků	- 38 -
7.2	Popis vybraných materiálů.....	- 39 -
7.2.1	DC04 + ZE50/50-B-PO	- 39 -
7.2.2	HX220BD + Z100-M-C.....	- 40 -
8	Ověření metodiky pomocí vhodného experimentu s využitím numerické simulace .-	41 -
8.1	Díl 1, spodní páté dveře vozu Seat Ateca	- 41 -
8.1.1	Vyhodnocení numerické simulace vzhledem k rychlosti lisování.....	- 43 -
8.2	Díl 2, blatník vozu Škoda Superb	- 44 -
8.2.1	Vyhodnocení numerické simulace vzhledem k rychlosti lisování.....	- 44 -
8.3	Dílčí závěr	- 45 -
9	Experiment reálného lisovacího procesu.....	- 46 -
9.1	Příprava nástřihů	- 46 -
9.2	Lisování dílů.....	- 46 -
9.3	Měření a vyhodnocení deformace	- 47 -
9.4	Díl 1, spodní páté dveře vozu Seat Ateca	- 49 -
9.4.1	Výsledky ARGUS.....	- 50 -
9.4.2	Dílčí závěr.....	- 51 -
9.5	Díl 2, blatník vozu Škoda Superb	- 52 -
9.5.1	Výsledky ARGUS.....	- 53 -
9.5.2	Dílčí závěr.....	- 53 -
10	Společná analýza numerické simulace a reálných zkoušek.....	- 54 -
10.1	Díl 1, spodní páté dveře vozu Seat Ateca	- 54 -

10.2	Díl 2, blatník vozu Škoda Superb	- 55 -
11	Závěr	- 57 -
	Seznam použité literatury	- 59 -
	Seznam obrázků	- 63 -
	Seznam tabulek	- 65 -
12	Seznam příloh na CD	- 66 -

Seznam použitých symbolů a zkratk

Značka	Jednotka	Veličina
L_e	mm	měřená délka průtahoměru
A	%	tažnost v procentech
$\dot{\epsilon}_{L_e}$	s^{-1}	deformační rychlost
$\dot{\epsilon}_{L_c}$	s^{-1}	deformační rychlost odhadnutá ze zkoušené délky
v_c	$mm \cdot s^{-1}$	rychlost posuvu příčnicku
F	N	zatížení
E	MPa	modul pružnosti
R_m	MPa	mez pevnosti v tahu
R_e	MPa	mez kluzu
σ	MPa	hodnota přetvárného odporu
r	[-]	součinitel plastické anizotropie
n	[-]	exponent deformačního zpevnění
m	[-]	exponent deformační rychlosti
ϵ	[-]	Skutečná deformace
φ_1	[-]	hlavní deformace
φ_2	[-]	vedlejší deformace

KUT		Komplexní ukazatel tvařitelnosti
LVDT		Linear Variable Differential Transformer
DIC		Digital Image Correlation
FOL		Front of Line
EOL		End of Line
FLD		diagram mezních přetvoření
FLC		křivka mezních přetvoření
OP xx		lisovací operace č. xx
SR		deformační rychlost (Strain Rate)
SRS		exponent deformační rychlosti (Strain Rate Sensitivity)

1 Úvod

Automobilový průmysl vyžaduje stále dokonalejší výrobu karosářských výlisků používaných pro konstrukci automobilů. Vyšší požadavky jsou kladeny z hlediska kvality výlisků a času potřebného pro jejich výrobu. Navyšování výrobního taktu, snižování zmetkovitosti a výroba geometricky složitých výlisků však vyžaduje důkladnou znalost chování materiálu. Trvalým zájmem je zároveň snižování hmotnosti karoserie, které vede k nižší produkci skleníkových plynů a spotřebě paliva. Snižování hmotnosti lze docílit redukcí tloušťky použitého materiálu, případně jeho nahrazením materiálem s nižší měrnou hmotností.

Všechny uvedené požadavky nutí nastavení lisovacího procesu na hranici jeho stability, je proto nutné detailně identifikovat veškeré vstupující parametry a jejich vliv. Jedním z parametrů, ovlivňujících chování materiálu, je rychlost deformace. Vliv rychlosti deformace byl dříve sledován především u středně a vysoce pevných materiálů a technologie tváření za tepla. Současný stav poznání však vyžaduje rychlost deformace zohledňovat a dále zkoumat i ve výrobě karosářských výlisků. Problematika je řešena ze strany dodavatelů materiálu i výrobních podniků.

Za účelem ověření vlivu rychlosti deformace na výrobu karosářských výlisků bude v rámci diplomové práce provedena série zkoušek ve spolupráci se společností ŠKODA Auto, a.s. Při různých rychlostech lisovacího taktu budou v operaci hlubokého tažení lisovány dva vybrané díly. Analýza deformace těchto dílů bude provedena za pomoci bezkontaktního měřicího systému ARGUS. Vliv rychlosti deformace bude sledován také pomocí numerických simulací, vytvořených v programu AutoForm R6. Přetvoření dílů bude v obou případech hodnoceno na základě hlavní deformace, vedlejší deformace, redukce tloušťky a FLD diagramů. Získané výsledky budou zpracovány a okomentovány.

Pochopení vlivu deformační rychlosti na stabilitu lisovacího procesu povede k finanční úspoře v předvýrobní fázi výroby lisovacích nástrojů a eliminaci vzniku neshody numerické simulace a reálného lisovacího procesu.

2 Problematika tvářecího procesu

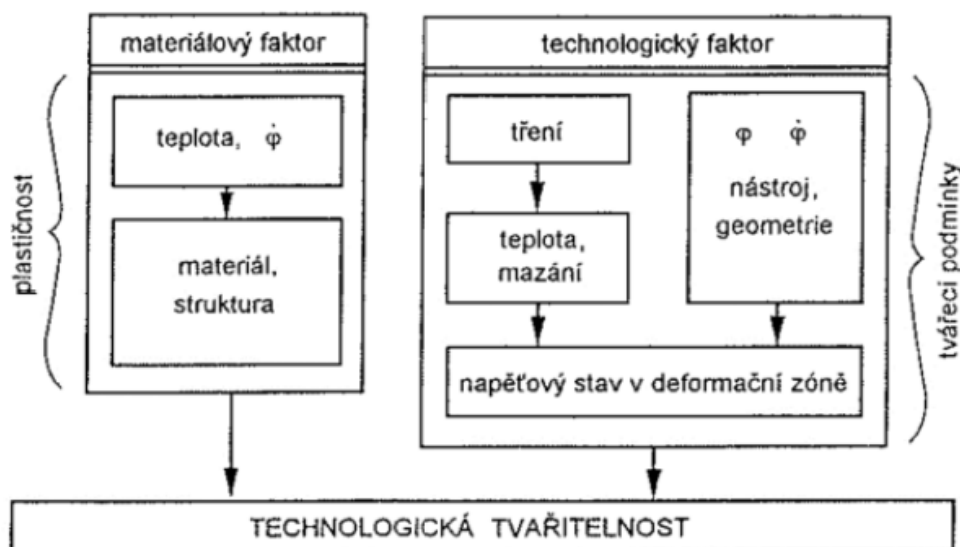
Tváření je technologický proces, při kterém se působením vnějších sil mění tvar, rozměry a vlastnosti polotovaru v důsledku plastické deformace bez porušení soudržnosti materiálu. Technologii tváření lze vzhledem k teplotě, při které je těleso tvářeno, dělit na tváření za tepla, za poloohřevu a za studena. Tváření za studena probíhá pod rekrystalizační teplotou ($0,35 - 0,4 T_T$). Tvářením za studena se materiál zpevňuje, zrna se deformují ve směru tváření a dochází k anizotropii mechanických vlastností. Tvářet za studena lze materiál jen do chvíle, kdy je vyčerpána zásoba plasticity. [1, 2]

Ke vzniku plastické deformace je nutné překročit hodnotu meze kluzu materiálu působením vnějších silových nebo energetických účinků. Nastane trvalý posuv atomů o vzdálenost větší, než je hodnota mřížkového parametru tvářeného materiálu. K posuvu atomů dochází smykem nebo dvojčatěním. [1]

2.1 Faktory ovlivňující proces výroby výlisku

Technologická tvařitelnost vyjadřuje schopnost materiálu plasticky se deformovat, aniž dojde k porušení soudržnosti. V průběhu výroby výlisku se vyskytuje velké množství faktorů a parametrů, které ovlivňují technologickou tvařitelnost. Z hlediska struktury je pro tváření vhodná především čtvercová plošně středěná krystalová mřížka (FCC). Obecně nejméně vhodnou je šesterečná těsně uspořádaná mřížka (HCP), jelikož tvařitelnost klesá s počtem kluzových rovin. Lepší tvařitelnost vykazují chemicky čisté kovy a materiály s malou velikostí zrna. Velikost vlivu jednotlivých faktorů a parametrů je také závislá na konkrétní tvářecí operaci a geometrii dílu. Souhrnný přehled nejdůležitějších faktorů je znázorněn na obrázku 2-1. Je vhodné podotknout, že na tvařitelnost má vliv i funkce soustavy lis-nástroj, interakce nástroj-plech a tvar výlisku. [3]

Tato práce je zaměřena na vliv rychlosti deformace na stabilitu lisovacího procesu. K navýšení deformační rychlosti dochází především zvýšením lisovacího taktu. Lze předpokládat, že změna lisovacího taktu má v konečném důsledku vliv i na hodnotu tření, teploty, relativní rychlosti posuvu plechu a nástroje, případně i dalších parametrů.



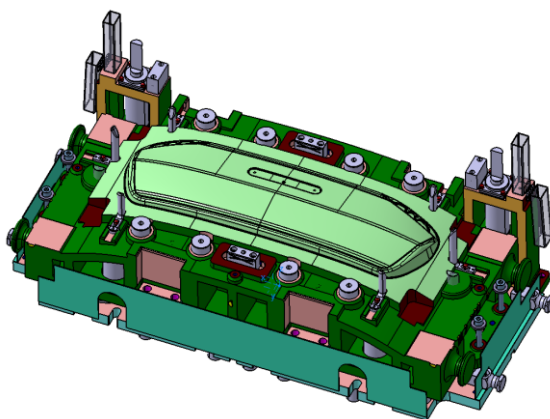
Obrázek 2-1, faktory ovlivňující technologickou tvařitelnost [3]

2.2 Hluboké tažení

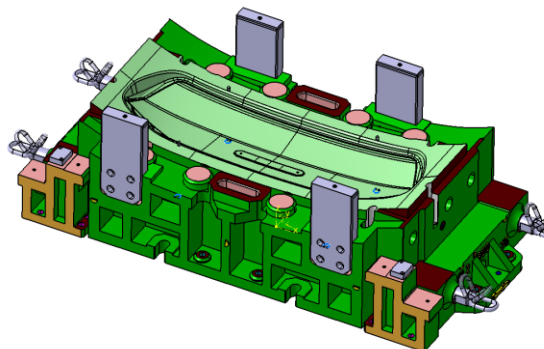
Hluboké tažení je jednou z nejrozšířenějších metod tváření plechu. Mezi odvětví, v němž se tato metoda používá, patří výroba karosářských dílů v automobilovém průmyslu. Jedná se o metodu střídavého tváření (tahem a tlakem), při kterém se rovný nástřih plechu přetváří na jednostranně otevřené duté těleso nebo vytlačené duté těleso na duté těleso s menším průřezem. Vliv deformační rychlosti můžeme pozorovat především v této lisovací operaci. [4]

Metody hlubokého tažení lze dělit podle druhu vedení síly na tři typy: hluboké tažení pomocí nástrojů, hluboké tažení pomocí účinných médií, hluboké tažení pomocí účinné energie. V automobilovém průmyslu je hluboké tažení prováděno především pomocí pevných nástrojů, pozornost je proto věnována pouze tomuto způsobu.

Na obrázcích 2-2 a 2-3 jsou znázorněny pevné nástroje, používané k výrobě spodních pátých dveří vozu Seat Ateca. Nástroje se skládají z tažníku, tažnice a přídržovače. U hlubokého tažení se po vložení nástřihu plechu zavírá nejprve přídržovač. Plech má pod přídržovačem oboustranný kontakt s nástrojem. Funkcí přídržovače je brždění odtoku plechu při tažení a eliminace tvorby zvlnění v oblasti pod přídržovačem. Jedná-li se o zakřivený přídržovač, dochází již v této fázi k tvarování nástřihu. [5]

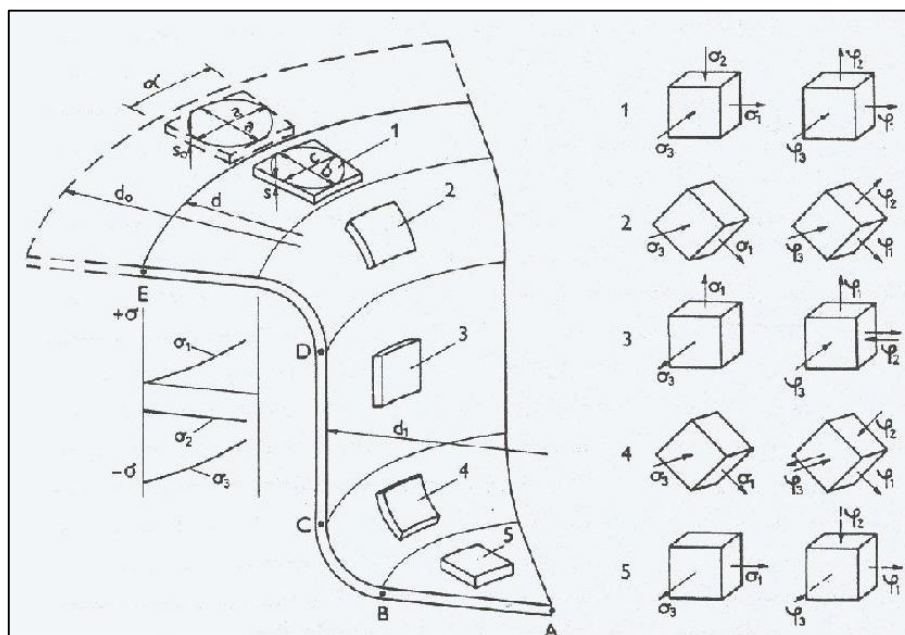


Obrázek 2-2, pevné nástroje OP20, tažník



Obrázek 2-3, pevné nástroje OP20, tažnice

Tažník vypne plech při vnoření do nástřihu přes rádius tažnice a tvaruje ho do tažnice. Síla tažníku potřebná pro tváření přitom plynule stoupá až k dolní úvratí tažníku. Při pouhém hlubokém tažení nedochází k redukci tloušťky plechu, ale pouze k protažení v rovině plechu. Během tváření dochází ke střídavému pnutí (tah a tlak) v přírubě, k tahovému napětí v zárubni a k napětí tah-tah na dně. [5]



Obrázek 2-4, napěťový stav během tažení duté nádoby [2]

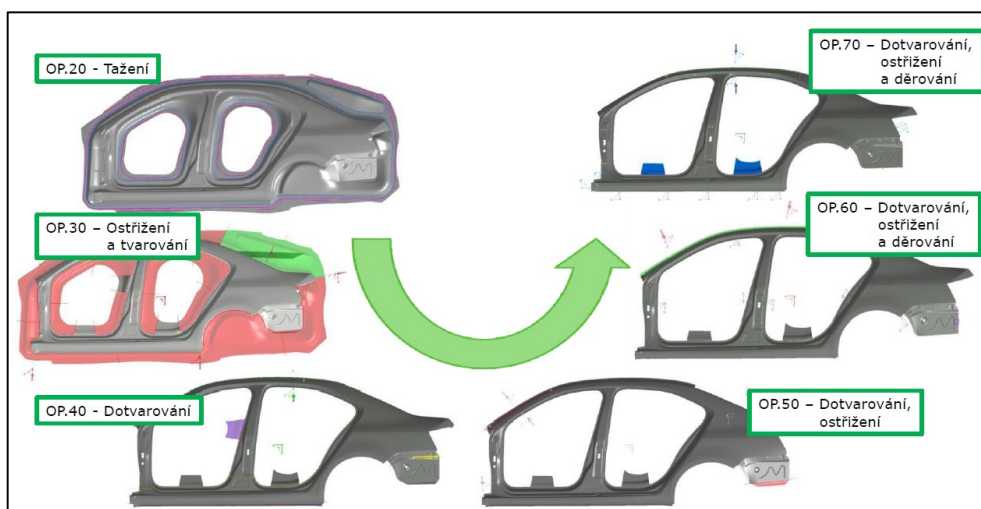
Při přetahování se plech pod přidržovačem kompletně zablokuje, to znamená, že nemůže dojít k odtoku plechu a tváření probíhá čistě formou odběru tloušťky plechu. Samotné přetahování se nasazuje pro tváření velkoplošných a pouze málo zakřivených dílů s malou hloubkou tažení (např. střechy, dveře). [5]

V praxi dochází během hlubokotažné operace u komplexních karosářských dílů ke kombinaci přetahování i hlubokého tažení. V dílu dochází k rozvoji různých dilatačních stavů, což je podmíněno komplexní geometrií. Tváření je proto skoro vždy spojeno s více či méně silným odběrem tloušťky plechu a se zpevněním plechového materiálu zastudena. Toto je třeba zohlednit při dimenzování plechových dílů. Při tažení je žádoucí co možná nejlépe přetáhnout plech bez dosažení hranic selhání materiálu (trhliny, vrásky, aj.), viz detailněji v kapitole Typy selhání a vad. [5]

Díly se vyrábějí skoro vždy ve více tvářecích operacích, protože většinou obsahují podříznutí, nebo je kvůli stupni deformace a směru pohybu nástroje nelze vyrábět v jedné operaci. Na hluboké tažení navazují operace střížné, kalibrovací, ohraňovací, nastavovací a druhé tažení. Typický sled operací pro výrobu karosářských výlisků je uveden na obrázku 2-5. Plechové díly se vyrábí na jednotlivých lisech, na lisovacích linkách nebo na transferových lisech, do kterých jsou zabudovány sady nástrojů. V současnosti se čím dál častěji využívají servo-mechanické linky. [5]

Výsledek hlubokého tažení může být z technologického hlediska ovlivněn těmito faktory:

- Silou na přidržovači
- Brzdícími drážkami
- Přístřihem (nástřihem) plechu
- Třením / mazáním
- Tažnými pomůckami (rozpěrkami), apod.



Obrázek 2-5, typický sled operací

2.3 Materiály používané v plošném tváření

Pro plošné tváření jsou využívány materiály dodávané v podobě plechů a pásů. Materiály musí vzhledem k jejich zpracování vykazovat dobrou tvařitelnost ale i svařitelnost. V souvislosti s experimentální částí této práce jsou blíže popsány pouze vybrané skupiny materiálů. Rozdělení materiálů je provedeno dle normy ČSN EN 10027-1.

2.3.1 Ploché výrobky k tváření za studena (D)

Díky nízké mezi kluzu a vysoké tažnosti je měkká hlubokotažná ocel vhodná zejména pro výrobu komplexních konstrukčních dílů. Tyto oceli se vyrábějí jako IF (bezintersticiální) oceli nebo oceli bez IF uklidněné hliníkem. Měkká IF-ocel vykazuje výbornou tvárnost a nízký obsah uhlíku a dusíku. Stabilizuje se přidáním titanu (max. 0,3 hm%) nebo niobu. [6]

2.3.2 Ploché výrobky válcované za studena z ocelí s vyšší mezí kluzu k tváření za studena (H)

Zvýšené pevnosti u oceli typu Bake hardening (B) se dosahuje vytvrzováním směsných krystalů přidáním manganu, fosforu a křemíku. Uhlík rozpuštěný v mřížce zajišťuje u oceli Bake-Hardening zvýšení meze plasticity při tepelném zpracování (např. při lakování automobilu: 170 °C, 20 minut). Tím se zlepší odolnost vnějších dílů proti vyboulení. Protože změna mechanických vlastností (mez plasticity, prodloužení po přetržení, hodnota n) probíhá značně zpomaleně i při pokojové teplotě, je skladovatelnost této oceli omezená. [7]

Vysoce pevná IF-ocel (Y) vykazuje stejně jako měkká IF-ocel extrémně nízký obsah uhlíku, je stabilizována titanem anebo niobem. Proto může být tato ocel prakticky neomezeně skladována. Vyšší pevnosti se dosahuje vytvrzením směsných krystalů přidáním manganu, fosforu anebo křemíku. Díky vyššímu zpevnění, absenci výrazné meze plasticity, vysokému specifickému prodloužení po přetržení a vysokým r -hodnotám dosahuje ocel velmi dobré tvařitelnosti. [6, 7]

Ocel legovaná fosforem (P). Pevnosti se dosahuje vytvrzováním směsných krystalů za pomoci fosforu. V rámci tvařitelnosti se tato ocel nachází v oblasti BH-ocelí a mezi mikrolegovanými a vysoce pevnými druhy IF-ocelí. [7]

Nízkolegovaná (LA) ocel se vyznačuje vysokou pevností díky legování niobem, titanem a vanadiem. Tyto legující prvky se mohou přidávat jednotlivě nebo je můžeme kombinovat. Alternativně je možné používat koncepty uhlíku a dusíku v kombinaci se zjemněním zrna. Jemné struktury této mikrolegované oceli se dosahuje většinou jemně rozptýlenými karbidy anebo nitridy ve spojení s konečným válcováním v určitém teplotním rozsahu. Jemnozrnná ocel se vyznačuje vysokou mezí únavy při kmitavém napětí v důsledku její jemné struktury zrn. [6, 7]

Ocel se dvěma fázemi (X). Mřížka oceli se dvěma fázemi se skládá z feritové matice, ve které je uložena převážně martensitická fáze ve tvaru ostrůvků. Ty zaujímají zpravidla 20-30% plochy. Při vysoké pevnosti v tahu vykazuje ocel se dvěma fázemi nízký poměr průtažnosti (R_e/R_m) a silné zpevnění za studena. Tato ocel je zejména vhodná pro tváření v oblasti přetahování plechu. [6]

Oceli TRIP (T) mají jemnozrnnou feriticky-bainitickou osnovu struktury, ve které je uložen zbytkový austenit (s možným podílem martenzitu). Při tváření se zůstatkový austenit mění na martensit a způsobuje silné zpevnění za studena. Díky tomu lze dosáhnout vysoké pevnosti v tahu při současném rovnoměrném protažení. Ve spojení s efektem Bake-Hardening lze dosáhnout vysoké pevnosti konstrukčních dílů. Oceli TRIP jsou vhodné jak pro přetahování, tak pro hluboké tažení plechů. Při tváření těchto materiálů je potřeba počítat s relativně silným odpružením. [6, 8]

Ocel s komplexními fázemi (CP) se vyznačuje rozsáhlou základní feriticky-bainitickou strukturou s částicemi martensitu, zůstatkovým austenitem a perlitem. Velmi jemné struktury se dosahuje zpožděnou rekrytalizací nebo vylučováním mikrolegujících prvků. Tato ocel se vyznačuje v porovnání s dvoufázovou ocelí větší mezí plasticity, nižším zpevněním za studena a větší možností rozšíření otvoru. [6]

2.4 Lisy používané v automobilovém průmyslu

V současných lisovnách automobilového průmyslu jsou dnes k výrobě karosářských dílů používány především lisovací linky a transferové lisy. Z hlediska diplomové práce jsou proto popsány tyto skupiny strojů.

Lisovací linky

Pod pojmem lisovací linky se rozumí mechanické nebo hydraulické lisy uspořádané za sebou, vzájemně spojené pomocí odpovídajícího transportního zařízení. Lisovací linky se používají v automobilovém průmyslu od středně velkých a velkých dílů s vysokým stupněm tažení. Na jedné lisovací lince se přetvoří plechový díl z rovného nástřihu až k finálně upotřebitelnému karosářskému dílu. Počet lisů v jedné lisovací lince se řídí maximálním počtem tvářecích operací potřebných k výrobě dílů. Obvykle se lisovací linka skládá ze čtyř až šesti lisů. [5, 9]

Před lisovací linkou (FOL) je umístěn podavač nástřihů, který odebírá nástřihy a dodává je do prvního lisu. Mezi jednotlivými lisami se transportují plechové díly pomocí podavačů nebo robotů. Rozlišujeme vibrační podavače, které mají pevně daný průběh pohybu, a CNC-podavače, jejichž pohyb je libovolně programovatelný. Na konci lisovací linky (EOL) se díly automaticky nebo ručně paletizují. [5, 9]

Mechanické lisy

V moderních lisovacích linkách se používají mechanické lisy ve dvou- nebo čtyřstojanových konstrukčních typech s kloubovým pohonem. Mechanické lisy se konstruují s maximálními jmenovitými lisovacími tlaky až do 20.000 kN.

Na rozdíl od excentrických lisů je u lisů s kloubovým pohonem setkávání náraz při zavírání nástroje menší, protože beran naráží na obrobek pouze poloviční až třetinovou rychlostí. Beran dosedá na plech měkce a k dispozici je vyšší lisovací tlak nad větší pracovní oblastí. Vzhledem k tomu, že u hlubokého tažení je přípustná maximální rychlost tváření kolem 500 mm/s, je možné u lisů s kloubovým pohonem dosáhnout většího počtu zdvihů. Tím jsou dány lepší předpoklady pro výrobu vysoce kvalitních plechových dílů při vysokém počtu zdvihů. [5]

Transferové lisy

U transferových lisů jsou všechny tvářecí operace integrovány do jednoho lisu. Transferové lisy mohou být hydraulické i mechanické. Jsou využívány pro výrobu menších až středně velkých dílů. Lisy tohoto typu potřebují méně místa a vyžadují menší investiční a výrobní náklady než běžné lisovací linky. Transferový lis se osazuje nakladačem nástřihů nebo pásovým dopravníkem. Při každém zdvihnutí lisu se vyrobí jeden díl. Mezi jednotlivými pracovními stupni se díly transportují zpravidla pomocí integrovaných transportních zařízení. [5]

Lisy pro zapracování

V konstrukci nástrojů automobilového průmyslu se používá speciální druh lisu, tzv. lis pro zapracování neboli „Tryout-lis“. Pod pojmem „zapracování“ nástrojů se rozumí přizpůsobování geometrie nástroje, tvaru nástřihu a jeho polohy v nástroji, a parametrů nastavení lisu až do okamžiku dosažení požadované kvality plechových dílů při sériovém počtu zdvihů. Současně platí, že se musí odstranit eventuální trhliny, vrásky a prohlubně, které se na dílu vyskytnou. Teprve po dosažení této kvality na lisu pro zapracování probíhá definitivní zapracování na sériovém lisu za sériových podmínek. [5]

Aby se objemy spojené se zapracováním na výrobních lisech udržely co možná nejnižší, měly by se parametry lisů pro zapracování pokud možno shodovat s parametry výrobních lisů. Lisy s tak zvaným „Multi-curve“-řízením jsou schopny simulovat charakteristiku téměř každého výrobního lisu. Na lisech pro zapracování musí být nástroje opakovaně montovány a demontovány, lisy jsou proto často vybaveny posuvnými stoly a upínacími prvky usnadňujícími jejich montáž. Aby se při zapracování zabránilo práci na horním nástroji prováděné nad hlavou, mohou být lisy pro zapracování opatřeny i výkyvnou deskou beranu. [5]

2.5 Ukazatel tvařitelnosti a zkoušky tvařitelnosti

Plošné tváření je charakterizováno neustálým rovinným stavem napjatosti, který se v jednotlivých stádiích procesu mění od jednoosého tahu, přes smyk, ke kombinaci tahu-tlaku a dvouosému tahu. Vzhledem k tvarové složitosti karosářských výlisků proto nelze formulovat jednoznačný ukazatel tvařitelnosti. Technologickou tvařitelnost lze hodnotit mechanickými vlastnostmi materiálu a tzv. ukazateli tvařitelnosti. Jednotlivé mechanické vlastnosti mají různý vliv na proces plošného tváření. Soukromé společnosti často, na základě vlastních dat, vyhodnocují své komplexní ukazatele tvařitelnosti (např. $KUT = \frac{R_{p0,2}}{R_m} \cdot A \cdot 1000$). Ty lépe vypovídají o způsobilosti materiálu pro produkci jednotlivých výrobků či jejich skupin. [3, 10]

Mezi základní zkoušky tvařitelnosti je řazena zkouška tahem, skrze kterou lze získat hodnoty základních mechanických vlastností, tj. A , $R_{p0,2}$, R_m , n a r .

Poměr meze kluzu R_e (R_p) a meze pevnosti R_m lze hodnotit jako jeden ze základních ukazatelů tvařitelnosti. Oblast mezi těmito dvěma hodnotami vymezuje velikost zásoby plasticity, potřebné ke tvářecímu procesu. [3]

$$0,6 < \frac{R_e}{R_m} < 0,8$$

$\frac{R_e}{R_m} \in (0,55 \div 0,65)$, vynikající plastické vlastnosti

$\frac{R_e}{R_m} \in (0,65 \div 0,75)$, horší plastické vlastnosti

Součinitel plastické anizotropie se kvantitativně určuje jako poměr skutečné plastické deformace šířky ke skutečné plastické deformaci tloušťky zkušebního tělesa při jednoosém zatěžování. Je řazen mezi nejvýznamnější ukazatele tvařitelnosti při procesech plošného tváření.

Vážený průměr součinitele plastické anizotropie \bar{r} (ve směru tloušťky) je: [11]

$$\bar{r} = \frac{r_{0/20} + r_{90/20} + 2 \cdot r_{45/20}}{4}$$

$\bar{r} > 1,6$ vynikající

$\bar{r} = 1,25 \div 1,6$ dobrá

$\bar{r} = 1,0 \div 1,25$ uspokojivá

$\bar{r} < 1,25$ nízká

$\bar{r} < 0,7$ velmi špatná

Společně se součinitelem plastické anizotropie patří exponent deformačního zpevnění mezi nejdůležitější ukazatele technologické tvařitelnosti. Má význam jmenovitě pro vypínání (dvouosý tah). Jeho vysoká hodnota brání lokalizaci deformace a působí rovnoměrné rozdělení deformace. [3]

Směrné hodnocení tvařitelnosti:

$n_m < 0,215$ nízká tažnost

$n_m = 0,215 \div 0,25$ dobrá tažnost

$n_m > 0,25$ vynikající tažnost

Jako společný ukazatel tvařitelnosti pro r a n lze použít „index tvařitelnosti“ IT: [3]

$$IT = R_{amin} \cdot n_m$$

Společně se základní zkouškou existují i tzv. napodobující zkoušky. Smyslem napodobujících zkoušek je ověření chování materiálu při vybraných způsobech zatěžování. Nevýhodou těchto zkoušek je ovšem omezená míra napodobení a subjektivní faktor při jejich hodnocení. Přehled významných napodobujících zkoušek je uveden níže: [3]

- Klínová zkouška
- Zkouška hloubením
- Zkouška kalíškovací
- Zkouška kombinovaná - hluboké tažení a hloubení
- Zkouška tažením v kuželové tažnici - (FUKUI)
- Zkouška rozšiřováním otvoru
- Zkouška zvlnění (Conical Cup Wrinkling Test)
- Zkouška vyboulení (Yoshida Buckling Test)

2.6 Problematika ve zkušebnictví

Důležitým hlediskem pro zpřesnění tvářecího procesu je stanovení přesné metodiky zjišťování mechanických vlastností v závislosti na zkušební rychlosti. Požadavky na přesnost a správnost výsledků se proto u zkušeben neustále zvyšují. Snahu o zlepšení lze pozorovat také z hlediska reprodukovatelnosti zkoušek v jiných zkušebnách. Výsledky mechanických zkoušek lze hodnotit statisticky díky mezilaboratorním porovnávacím zkouškám (MPZ), které pomáhají odhalit chyby a nedokonalosti měření. Nejistotu charakterizuje rozptyl hodnot, který může být důvodně přisuzován k měřené veličině.

Literatura [12] se vyjadřuje ke zdrojům chyb při zjišťování meze kluzu, meze pevnosti, prodloužení i tažnosti. Z hlediska stanovení meze kluzu se pak jako nejvýraznější parametr jeví rychlost zkoušení a tuhost zkušebních strojů. Příčinou problému je nejednoznačnost metodického postupu zkoušky. Vyšší rychlostí posuvu příčnicku je možné u zkoušky dosáhnout až o 40÷50 MPa rozdílné hodnoty meze kluzu. Bylo poukázáno na zásadní rozpor v kompatibilitě rychlostí zkoušení do meze kluzu, definovaných v původní normě EN10002-1 jako napěťová rychlost a rychlost deformační. [12]

V úvodu normy ČSN EN ISO 26203-1, Kovové materiály – metoda zkoušení tahem při vysokých rychlostech deformace – Část 1: Systémy typu pružné tyče, je dále poukazováno na šum při měření signálu zatížení, bezdotykové metody měření posunutí s rychlou odezvou (metoda DIC, Digital Image Correlation) a nehomogenní zatížení po průřezu podél zkušebního tělesa. Současná měřicí zařízení (Dopplerův extenzometr, LVDT) nejsou při vysokých rychlostech dostatečně přesná a spolehlivá. [13, 14]

3 Typy selhání a vad

Trhliny

Trhliny jsou jedním z nejčastějších případů selhání při hlubokém tažení. Tyto vady se vyskytují v momentě vyčerpání tvářecích schopností materiálu. Typickými stavy protažení, ve kterých k trhlinám dochází, jsou oblasti jednoosého tahu za rovinné napjatosti, dvouosého tahu a oblast tahu-tlaku. Mezi místa se zvýšeným výskytem trhlin patří kulové a kufrové geometrie (dvouosý tah), rohové oblasti pod přídržovačem (tah-tlak) a hrany přístřihů (jednoosý tah). K výskytu trhlin dochází také kvůli přílišnému ztenčení materiálu. [5, 15]

Zvlnění

Zvlnění (tzv. vrásky) se u hlubokého tažení vyskytuje v oblastech s napětím tah-tlak. Jeho tvorba souvisí s působením tangenciálního tlakového napětí vznikajícího při zatahování nástřihu a tažení. Vznik tohoto zvlnění můžeme ovlivnit silou na přídržovači, případně lokálním prolisováním. Rizikem při jeho vzniku je zdvojení materiálu, které znemožňuje úplné uzavření nástroje. Výskyt lze tolerovat pouze v malé míře a v oblastech, které budou dále ostříženy. [5]

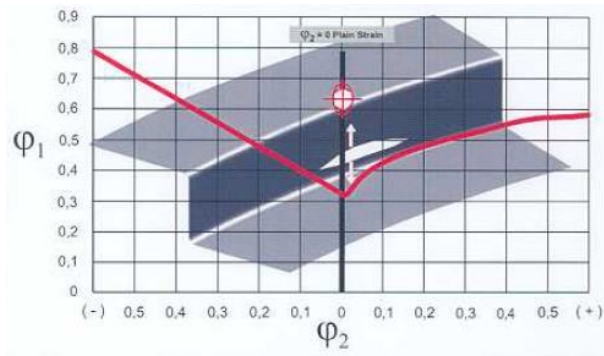
Přetažené hrany

Přetažené hrany vznikají relativním pohybem plechu a nástroje v místě s malým poloměrem - od určitého úhlu opásání kolem poloměru nástroje (hrana razníku, feature line). Jedná se o povrchové narušení plechového dílu, které je nepřijatelné. Řešení problému bývá dosaženo přidáním brzdících lišt, případně změnou konstrukce nástroje. [5]

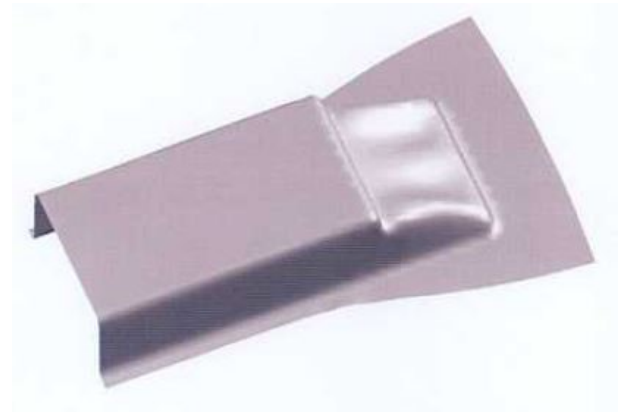
Lokální propadliny

Jedná se o minimální lokální odchylky od požadované geometrie většinou v oblastech slabého zakřivení. Propadliny mohou vznikat z důvodu nedostatečné plastické deformace v centru ploché geometrie. Takto vzniklé propadliny je možné odstranit buďto odpovídajícím provedením tažného zařízení nebo velkoplošným překlenutím geometrie nástroje (bombírování) nebo takzvaným dlážděním (lokálním překlenutím). Propadliny mohou vznikat také v oblastech kolem prolisů (madlo, směrovky)

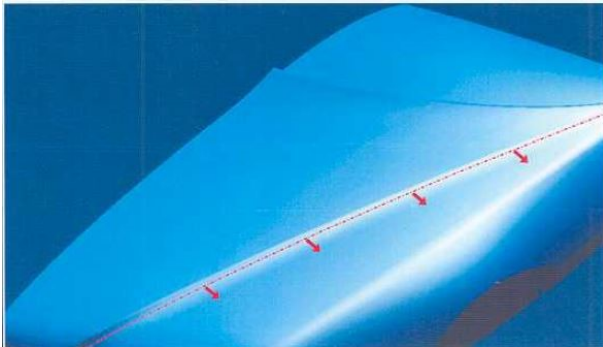
jakožto výsledek vyplývajících napětí po tváření. Propadliny jsou podmíněny geometrií a je proto velmi obtížné jim zcela zabránit. [5]



Obrázek 3-1, příklad trhliny



Obrázek 3-2, příklad zvlnění



Obrázek 3-3, příklad přetažené hrany



Obrázek 3-4, příklad lokálních propadlin

4 Problematika deformační rychlosti

Cílem této kapitoly je přiblížení pojmu deformační rychlosti a jejího vlivu na změnu mechanických vlastností. Blíže popsán je také exponent deformační rychlosti společně se stanovením jeho hodnoty.

4.1 Definice deformační rychlosti

Deformační rychlost je definována jako přírůstek deformace v čase. Ve vztahu ke zkoušce tahem je definována jako, $\dot{\epsilon}_{L_e}$ [s^{-1}]: přírůstek deformace v čase měřený průtahoměrem na měřené délce průtahoměru, L_e . [16]

Vzorec deformační rychlosti je pro zkoušku tahem odvozen následovně:

$$\epsilon = \ln \frac{l_1}{l_0} \quad [-]$$

$$d\epsilon = d\left(\ln \frac{l_1}{l_0}\right) \quad [-]$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\left(\ln \frac{l_1}{l_0}\right)}{dt} \quad [s^{-1}]$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{dl_1}{dt} \quad [s^{-1}]$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{v}{l_0} \quad [s^{-1}]$$

Společně s deformační rychlostí je v normě definována i deformační rychlost odhadnutá ze zkoušené délky (*estimated strain rate over the parallel length*), $\dot{\epsilon}_{L_c}$ [s^{-1}].

Hodnota rychlosti deformace vychází v reálném lisovacím procesu z rychlosti posuvu příčnicku, geometrie nástroje a s tím souvisejícím způsobem vzniku deformace.

4.2 Vliv deformační rychlost na mechanické vlastnosti

Vliv rychlosti deformace na hodnotu přetvárného odporu je již dlouho zkoumán při tváření součástí za tepla. Vzniklo také mnoho prací, které tento fenomén sledují z hlediska vyrobitelnosti i deformační charakteristiky součástí z ocelí se zvýšenou hodnotou meze kluzu.

Vzhledem k aktuálnímu stavu výroby a snaze o maximální snížení tloušťky karosářských výlisků však roste význam tohoto jevu i u tváření hlubokotažných plechů. Lze říci, že s rostoucí hodnotou rychlosti deformace narůstá odpor materiálu proti rozvoji plastické deformace: hodnota meze kluzu roste výrazněji než hodnota meze pevnosti, klesá hodnota tažnosti i exponentu deformačního zpevnění (klesá zásoba plasticity). Tyto závěry lze uvádět například pro výsledky tahové zkoušky, v reálném lisovacím procesu má změna zmíněných mechanických vlastností vliv na okolní oblasti plechu a tím i celý lisovací proces. [17]

Mechanické hodnoty stanovené ze zkoušky tahem odpovídají rychlosti deformace do velikosti $0,008 \text{ s}^{-1}$, v reálném lisovacím procesu však dosahuje deformační rychlost hodnoty až o 3 řády vyšší.

4.3 Exponent deformační rychlosti, m

Exponent deformační rychlosti (*strain rate sensitivity, SRS*) m je definován z rozšířeného Hollomonova vztahu: [3]

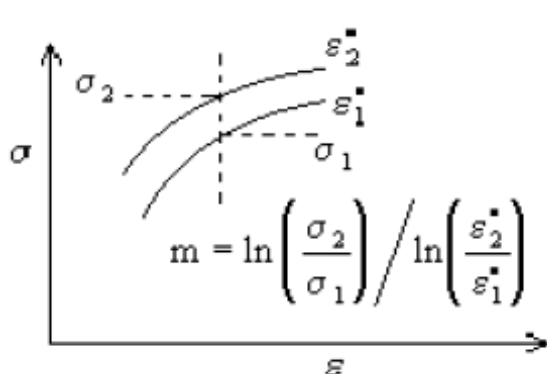
$$\sigma = k \cdot \varepsilon^n \cdot \dot{\varepsilon}^m$$

V literatuře můžeme nalézt i některé starší obecně používané vztahy, např. Ludwik, Swift, Voce. Možnou otázkou je ovšem aplikovatelnost těchto vzorců. Exponent deformační rychlosti nelze vnímat jako konstantu, jeho hodnota se mění (podobně jako u exponentu deformačního zpevnění) v závislosti na stupni přetvoření, tvářecí teplotě i samotné deformační rychlosti. SRS zároveň ovlivňuje dynamické a lomové chování a je z tohoto pohledu důležitou materiálovou charakteristikou. [13, 18]

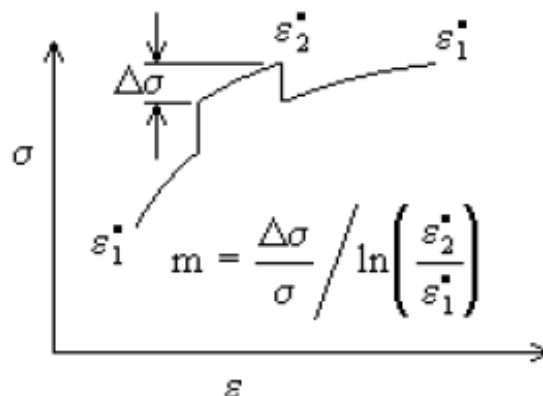
4.4 Stanovení exponentu deformační rychlosti

Pro stanovení hodnoty exponentu deformační rychlosti ze zkoušky tahem jsou nejčastěji používány 2 metody [19]:

- A) Je sledována hodnota přirozeného přetvárného odporu při dvou různých konstantních rychlostech deformace, viz obrázek 4-1. Nevýhodou metody je potřeba dvojnásobného počtu vzorků vůči metodě B.
- B) Rychlost deformace je v průběhu zkoušky změněna, na základě rozdílu napětí je pak možné stanovit velikost exponentu m , viz obrázek 4-2. Stanovení může být tudíž provedeno jen na jednom zkušebním vzorku, předpokladem je použití stroje s řízením rychlosti deformace.



Obrázek 4-1, stanovení m , metoda A [19]



Obrázek 4-2, stanovení m , metoda B [19]

5 Popis problematiky využití matematických modelů a numerických simulací

Obecně lze pro matematické řešení úloh použít analytické nebo numerické řešení. Výsledkem analytického řešení, získaného za pomoci diferenciálního a integrálního počtu, je obecný vztah pro vstupující a vystupující parametry, který umožňuje jednoduše pracovat s obdobnými typy problémů. Největším úskalím však je, že nalezení analytického řešení v uzavřeném tvaru je možné pouze pro velmi omezenou škálu úloh s jednoduchou geometrií a vysokou mírou idealizace. [20]

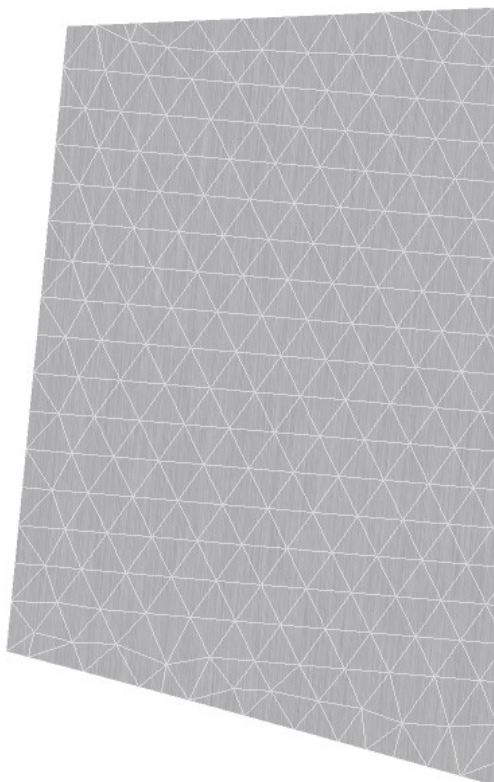
Numerické řešení je řešení přibližné. Podstatou numerického řešení je diskretizace spojitého problému. Proces je následně, za pomoci výpočetní techniky, řešen v konečném počtu kroků. Numerické řešení lze aplikovat na téměř každou matematicky popsanou úlohu, složitost úlohy limituje především výpočetní kapacita. Nevýhodou numerického řešení je nutnost opakování výpočtu v případě změny vstupních parametrů. [20]

Numerické řešení využíváme především v případě nelineárních úloh (elasticko-plastické chování). Ty se vyznačují závislostí na posloupnosti stavů, kterými systém prošel. V případě nelineárních úloh neexistují věty o existenci řešení, nelze tedy předem zjistit řešitelnost úlohy. [20]

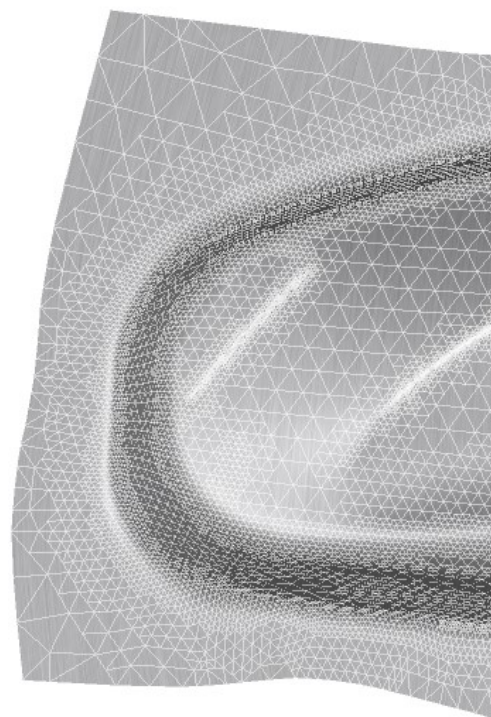
Obecně lze kategorizovat chyby při modelování následovně: [20]

- Chyba kvalitativní – Jedná se o nejzávažnější chybu, jelikož model neobsahuje všechny důležité vlastnosti. Tato chyba je těžko odhalitelná; výpočet probíhá vzhledem k zadání správně, ale úloha neřeší původně požadovaný problém.
- Chyba složitosti – Úloha obsahuje nepodstatné vlastnosti, dochází k prodloužení výpočetní doby, případně k nezískání výsledku.
- Chyba konkretizační – Model i vlastnosti správně definovány, chyba vzniká v důsledku špatně zadaných údajů. Lze ji odhalit kontrolou výsledků.

V současnosti nejrozšířenější numerickou výpočetní metodou je metoda konečných prvků (dále jen MKP). Na obrázcích č. 5-1 a 5-2 můžeme vidět elementy MKP na povrchu skutečného dílu před a po tvářecím procesu, kdy dochází v oblastech intenzivní deformace k adaptivnímu zasítování. Počáteční nastavení hustoty sítě a výpočetní metoda mají vliv na konečnou přesnost numerické simulace. [21]



Obrázek 5-1, hustota sítě před výpočtem



Obrázek 5-2, hustota sítě po výpočtu

5.1 Software pro numerickou simulaci

Nejvyužívanějšími programy pro numerickou simulaci plošného tváření jsou PAM-Stamp (ESI Group) a AutoForm. Oba distributoři společně s programy dodávají množství doplňkových modulů, vybrané moduly jsou dále blíže okomentovány.

Použitý model, způsob výpočtu a nastavení simulace hrají výraznou roli v požadované přesnosti výsledku numerické simulace a výrazně ovlivňují délku výpočetního času. V případě rychlého ověření lisovatelnosti (např. PAM-QuikStamp, implicitní numerická metoda) lze počítat řádově s minutami, v případě precizního

realistického řešení se výpočetní doba pohybuje v řádu hodin (např. PAM- Stamp, explicitní numerická metoda). [22]

V současnosti výrazným modulem je AutoForm Sigma umožňující uživateli nastavení počátečních podmínek (např. vybraný rádius součásti, povrch a síla přidržovače, brzdící drážky, ...) v libovolném rozmezí. Software následně vypočítá dané množství řešení, na základě kterého je program schopen identifikovat vliv jednotlivých parametrů. Uživatel zároveň může vliv těchto parametrů pozorovat v nastaveném rozmezí v reálném čase. V případě použití tohoto modulu tudíž není vždy nutné řešit daný úkol (po změně některých parametrů) znovu. Výše zmíněné pak může vést k úspoře času i peněz.

Úskalím numerické simulace je v současnosti nedostatečná znalost a definice okrajových podmínek. Vyplývající chyby můžeme řadit mezi chyby kvalitativní, které lze odstranit podrobnějším a přesnějším popisem vstupujících parametrů. Trend zvyšování přesnosti numerické simulace je patrný i u dodavatelů materiálu, kteří postupem času poskytují stále detailnější popis dodávaného materiálu. [23]

V rámci simulace plošného tváření můžeme v současnosti pozorovat trend zpřesňování v následujících oblastech:

- Nelineární koeficient tření
(závislý na tlaku, rychlosti, struktuře povrchu a množství maziva)
- Virtuální modifikace nástroje
- Odhalení vad na pohledových dílech
- Rychlost deformace

5.2 Aplikace materiálových dat do výpočtu

Experimentální část týkající se numerické simulaci vychází z výsledků získaných v programu AutoForm. Společnost Tata Steel, dodávající materiálová data vložená do výpočtu, nesouhlasí s výpočtem v programu AutoForm zohledňujícím parametr deformační rychlosti, výpočet v tomto ohledu není dostatečně přesný. [24]

Rovnice zpevnění používaná AutoForm: [24]

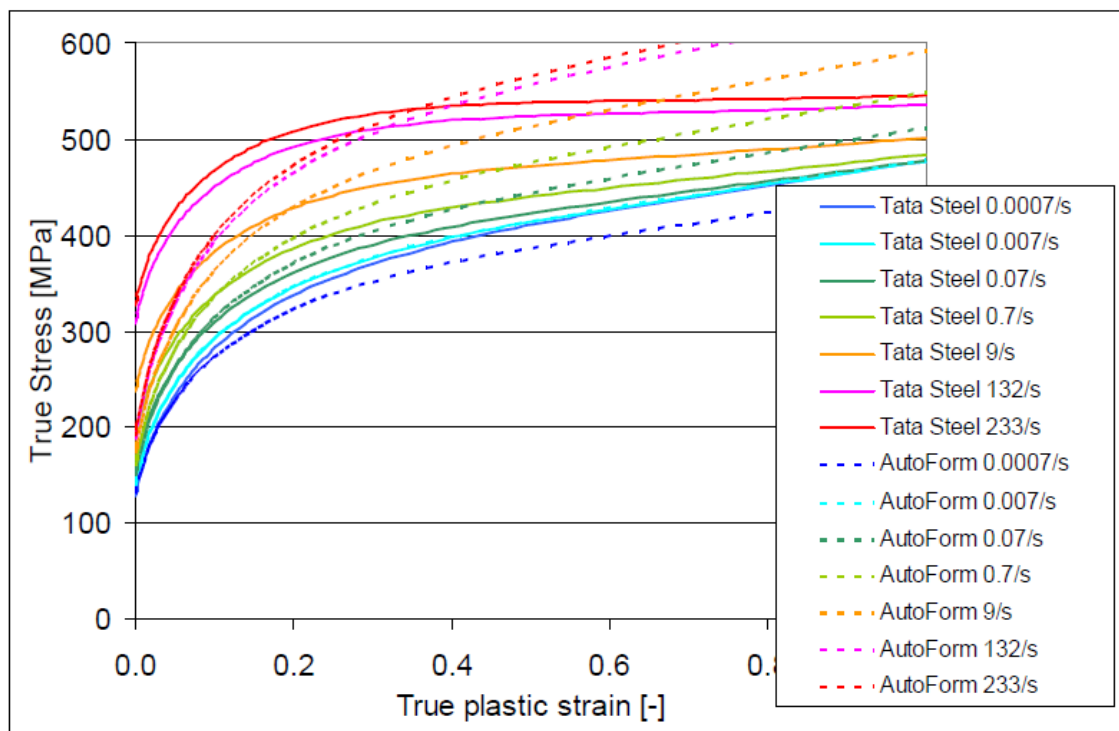
$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = \sigma_0(\varepsilon) \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{ref}} \right)^m$$

Rovnice zpevnění používaná Tata Steel: [24]

$$\sigma_f = \sigma_0(\varepsilon) + \sigma_0^* \cdot \left(1 + \frac{k \cdot T}{\Delta G_0} \cdot \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right)^{m'}$$

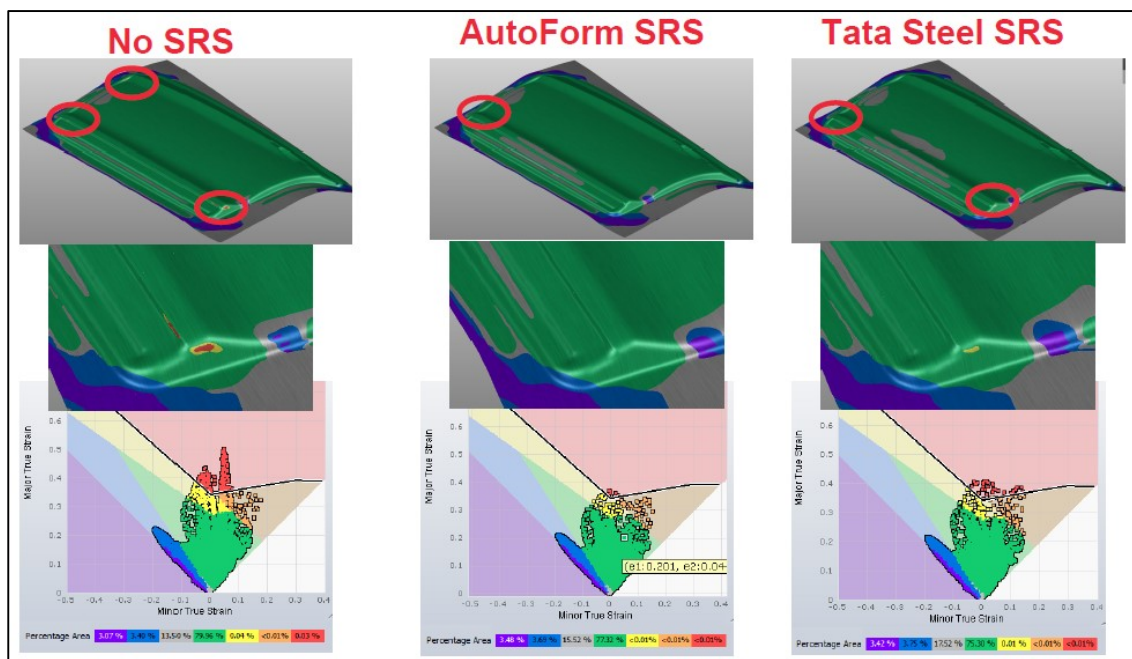
Zjednodušený vztah Tata Steel (některé parametry konstantami):

$$\sigma_f = \sigma_{static} + \sigma_{dynamic}(m', \dot{\varepsilon}, T)$$



Obrázek 5-3, porovnání křivek zpevnění, AutoForm/Tata Steel [24]

Z křivek uvedených na obrázku 5-3 lze pozorovat, že rozpětí hodnot meze kluzu je mnohem vyšší než v případě výsledků společnosti Tata Steel. Na obrázku 5-4 můžeme sledovat odlišné výsledky numerické simulace (formability) vzhledem k nastavení výpočtu.

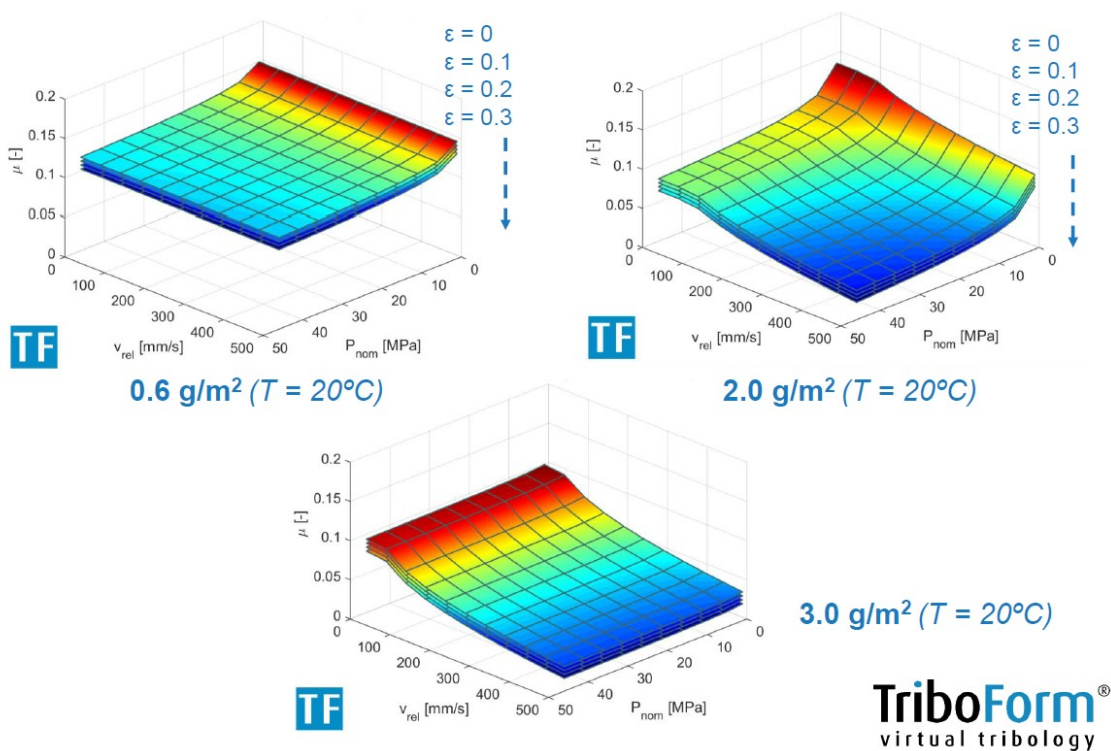


Obrázek 5-4, výsledek numerické simulace, výpočet AutoForm/Tata Steel [24]

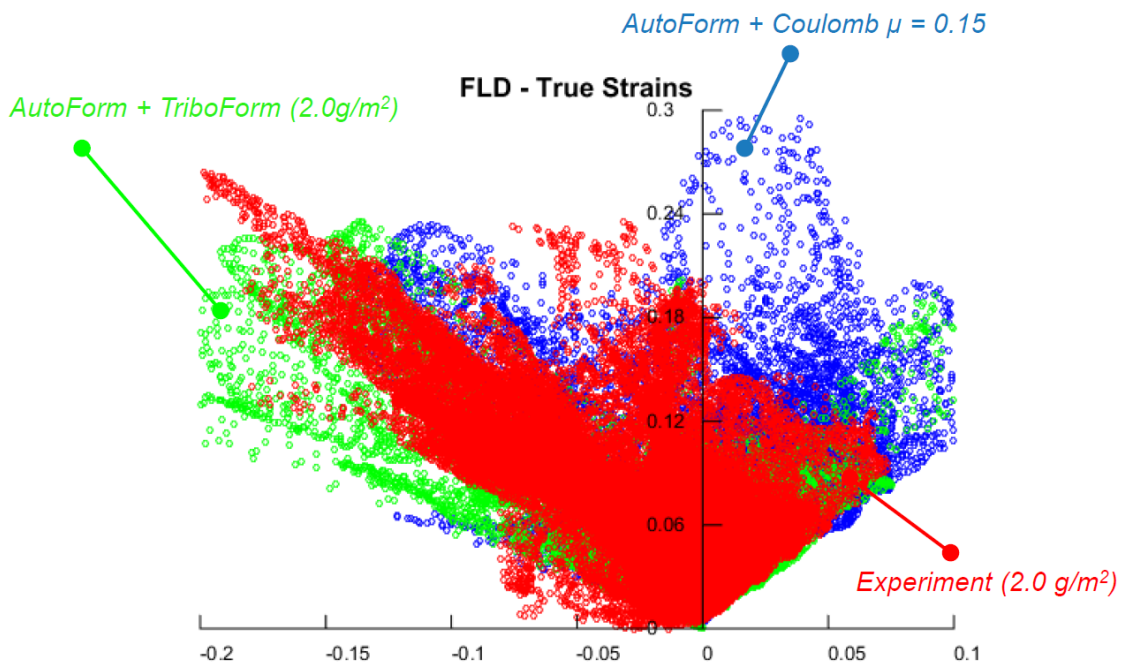
5.3 Nelineární koeficient tření

Jak již bylo zmíněno v kapitole 5.1, jednou z možností pro zvýšení přesnosti numerické simulace je použití nelineárního koeficientu tření. Současná verze softwaru AutoForm R6 a Pam-Stamp nabízí uživateli nastavení hodnoty tření skrze pouze jako hodnotu Coulombova součinitele. Výpočet může zohledňovat i tlak a relativní rychlost posuvu plechu a nástroje, výsledky ale ne vždy zcela odpovídají výsledkům reálných zkoušek.

Možností pro budoucí zlepšení je použití programu TriboForm. Program je, na základě materiálu, struktury povrchu, charakteristiky nástroje a rozhraní nástroj/plech, schopen sestavit závislost koeficientu tření na tlaku a relativní rychlosti posuvu plechu a nástroje. Příklad výstupu z programu je uveden na obrázku 5-5. Software je v současné chvíli ve fázi vývoje ve spolupráci se Škoda Auto a Volvo. Program zatím není přímou součástí programu AutoForm ani Pam-Stamp, prvotní výsledky však slibují vyšší přesnost numerické simulace, viz obrázek 5-6. [17, 25]



Obrázek 5-5, TriboForm: koeficient tření v závislosti na rychlosti a tlaku [25]



Obrázek 5-6, TriboForm, prezentace výsledků [25]

6 Měření deformací výlisků

6.1 Metoda měrných sítí

Metoda měrných sítí se využívá pro analýzu stavu protažení přetvořeného plechového dílu. Na povrch sledovaného dílu jsou před započítím lisovací operace nanášeny sítě tvořené elementy se známou velikostí. Obecně platí, že nejběžnějším a nejvhodnějším tvarem elementu je kružnice. [4]

Sítě jsou na povrch nanášeny nejčastěji elektrochemicky. Je nutné, aby síť nebyla porušena procesem lisování, vykazovala vůči původnímu materiálu dostatečný kontrast a bylo tudíž možné následné měření. Velikost elementů sítě ovlivňuje přesnost měření, která se se snižující se velikostí elementu zhoršuje. Nevýhodou velkých elementů je, že nejsou zaznamenávány nehomogenity v rámci jednotlivých elementů. [5]

Vyhodnocení deformovaných rastrů může být prováděno ručně, pomocí dílenského mikroskopu, nebo pomocí odpovídajících optických systémů. Z hlediska míry použití je blíže popsána pouze metoda optických systémů. [5]

6.2 Optické systémy pro měření deformací plechu

V případě měření velikosti deformace optickým systémem, musí být díl snímán vždy nejméně ze dvou pozic. Ze zachycených a zpracovaných snímků jsou získány 3D souřadnice bodů ležící na povrchu objektu. Ze souřadnic konkrétních elementů je možné určit jejich vzájemný posuv, tudíž i velikost deformace. Na základě změřených deformací lze zjistit polohu bodů v rámci FLD, hodnotu hlavního a vedlejšího napětí a aktuální tloušťku plechu v konkrétním místě. [26, 27]

Významnými systémy pro optické vyhodnocení velikosti deformace jednotlivých dílů jsou systémy ARGUS a ARAMIS. Oba systémy jsou vyvíjeny společností GOM a na českém trhu distribuovány společností MCAE Systems, s.r.o. Mezi společné přednosti zmíněných systémů patří jejich mobilita a rozsah měřené deformace. Systémy lze využívat pro zkoušení materiálu, ověřování a optimalizaci simulace tažení a optimalizaci lisovacích nástrojů. [26]

Systém ARAMIS

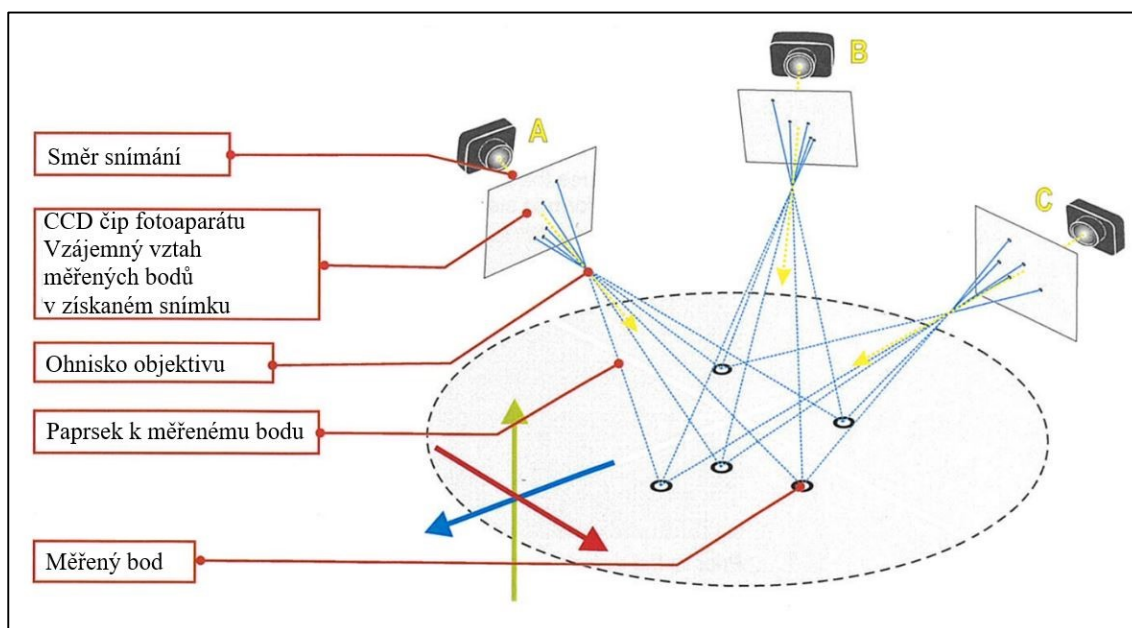
Před měřením se systémem ARAMIS je na povrch sledovaného dílu sprejem nanesen kontrastní vzor, který se deformuje zároveň s povrchem dílu. Systém je schopen pracovat s pravidelným i nepravidelným nástřikem. Pozorovaný předmět je v průběhu deformace snímán nejméně 2 CCD kamerami. Výhodou tohoto systému je, na rozdíl od systému ARGUS, poskytuje možnost charakteristiky procesu tečení a stárnutí a možnost měření deformace objektu v průběhu procesu (např. zkouška tahem). Měření mohou být díly s velikostí od 1mm do 1000mm, rozsah měřené deformace se pohybuje od 0,05% do stovek %. [27]

Systém ARGUS

Systém ARGUS využívá pro měření deformace mřížky (sítě) elektrochemicky vyleptané do povrchu součásti. Mřížka je deformována současně s povrchem dílu a následně zachycena CCD čipem z několika úhlů. Měření mohou být díly s velikostí od 100mm do několika metrů, rozsah měřené deformace se pohybuje od 0,5% do stovek %. [27]

Software umožňuje analyzovat rozdíly v geometrii, posunutí a deformaci mezi CAD modelem a reálným dílem. Tyto rozdíly jsou vyhodnoceny jako barevná deformační pole a výstupem měření mohou být jak obrázky, tak soubory ve formátu ASCII. Reálné příklady výstupu systému jsou obsaženy v experimentální části této práce.

Ze vzájemného porovnání obou systémů vyplývá, že systém ARGUS je vhodný především na měření rozměrově velkých dílů namáhaných víceosým tahem. Systém ARAMIS je schopen přesněji měřit deformace především v oblasti trhlin a deformace v řádu 0,05%, tyto atributy však nejsou v oblasti měření karosářských výlisků natolik využívány. [28]



Obrázek 6-1, Argus, princip měření [26]

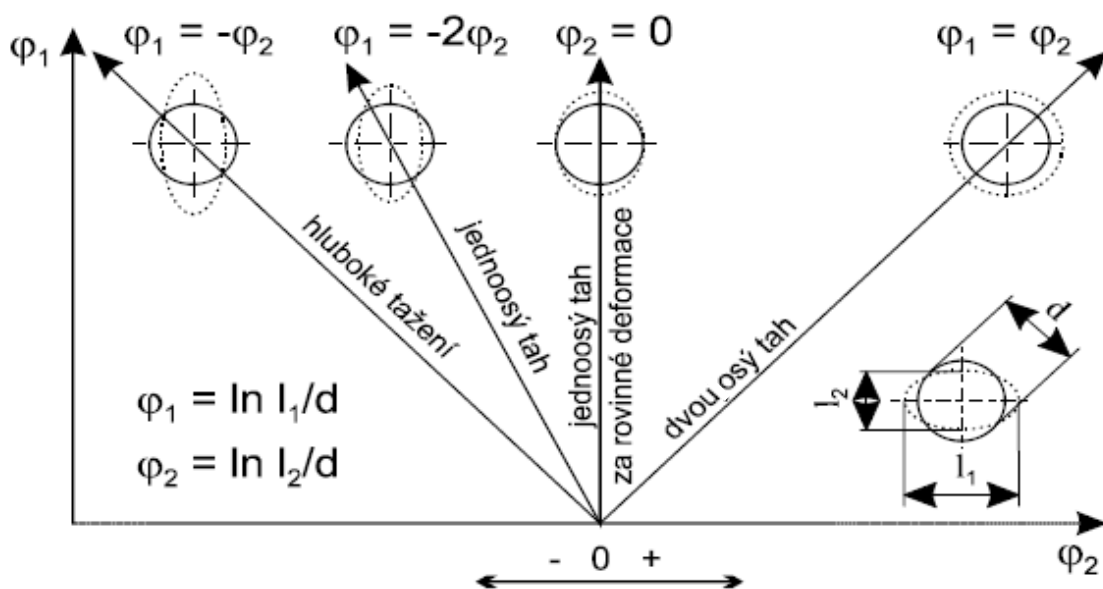
6.2.1 Optické posouzení

Především pro vnější povrchové díly je navíc nutné kvalitativní posouzení povrchových vad ze strany zkušených specialistů. Díly jsou posuzovány vizuálně a pomocí speciálního brusného kamene, kterým je obtažen povrch plechu. Na základě obtažení (též brouskování) je možné objevit propadliny či další povrchové vady. V poslední době lze pozorovat implementaci těchto metod do počítačových optických měřících systémů. Tato implementace může vést k finančním a časovým úsporám a vyřazení subjektivního lidského faktoru. [29]

6.3 Diagram mezního přetvoření

Diagram mezního přetvoření (FLD) je společně s křivkou mezního přetvoření (FLC) vhodným nástrojem pro stanovení procesních limitů v rámci plošného tváření. FLD představuje charakteristiku materiálu z hlediska lisovatelnosti, vyjadřuje maximální možnou homogenní deformaci v hlavním a vedlejším směru. Diagram je využíván při návrhu nástrojů i kontrole vylisovaných součástí. Porovnání naměřené součásti vůči poloze FLC umožňuje také stanovit „bezpečnost“ lisovacího procesu. [30]

FLD diagram využívaný v experimentální části práce vychází z prací Keelera a Goodwina. Keeler přišel jako první s konceptem diagramu, konkrétně s jeho pravou částí ($\varphi_1 > 0; \varphi_2 \geq 0$). Goodwin pak tento diagram doplnil o jeho levou část ($\varphi_1 > 0; \varphi_2 \leq 0$). Nejběžnějším způsobem vytvoření FLD pro konkrétní materiál je pomocí mechanických zkoušek. Charakteristika napětí z hlediska tvářecích operací je uvedena na obrázku 6-2. [31]



Obrázek 6-2, charakteristická napětí z hlediska tvářecí operace [3]

Experimentální část

7 Návrh metodiky pro sledování vlivu rychlosti deformace na tvařitelnost

Jak již bylo zmíněno, rychlost deformace vychází v reálném lisovacím procesu z rychlosti pohybu příčnicku a geometrie nástroje. Pro ověření experimentu v reálném procesu byly vybrány dvě součásti (obrázek 7-1 a 7-2), které byly lisovány fyzicky při různých výrobních taktech. Lisovací proces byl také ověřen v softwaru AutoForm R6. Z hlediska míry deformace je pro tento experiment vhodná především operace hlubokého tažení (OP20). Celý experiment probíhal ve spolupráci se společností ŠKODA AUTO, a.s.

7.1 Vytipování vhodných výlisků

Díl 1, páté spodní dveře vozu Seatu Ateca, který je vyráběn z hlubokotažné oceli DC04+ZE50/50-B-P-O. Díl 2, blatník současné generace Škody Superb, je vyráběn z hlubokotažné oceli se zvýšenou mezí kluzu HX220BD+Z100-M-C.



Obrázek 7-1, díl_1, Seat Ateca, páté dveře spodní



Obrázek 7-2, díl_2, Škoda Superb 3. generace, blatník

Z důvodu přesné analýzy procesu je nutné sledovat lisovací proces v rozdílných podmínkách. Na základě tohoto předpokladu proto bylo nutné najít vhodné díly s rozdílnou tvarovou složitostí.

V praxi jsou výlisky vzhledem ke své složitosti děleny do 3 kategorií:

1. **Kategorie** – díly s nejmenší tvarovou složitostí (vnější spodní páte dveře)
2. **Kategorie** – díly s vyšší tvarovou složitostí (vnitřní páte dveře)
3. **Kategorie** – díly s vysokou tvarovou složitostí (blatník)

Pro prvotní analýzu/experimenty byl zvolen díl s velmi jednoduchou tvarovou složitostí (KAT1), tj. spodních páte dveře modelu Seat Ateca. Jedná se o díl, který je vyráběn ve 4 operacích (OP20-50). Během OP20 dochází k velmi malé hloubce tahu, přibližně 85 mm. Na dílu se nenachází žádná designově problematická místa z hlediska vyrobitelnosti.

V rámci předpokládaného výraznějšího vlivu rychlosti deformace byl jako druhý díl zvolen blatník současné generace Škody Superb. Tento díl, dle předchozího rozdělení spadá do KAT3 z důvodu kalibrování klíny v operacích navazujících na OP20 a složitosti z hlediska brzdících drážek. V porovnání s předchozím dílem je výrazně vyšší i hloubka tahu, přibližně 180 mm. Předpokladem experimentu je výraznější změna přetvoření vzhledem k rychlosti lisování. V obou případech se jedná o povrchové díly karoserie, na které je kladen veliký důraz z hlediska auditových vad (kvalita ploch, ztenčení plechu, přetažené hrany, propady, aj.)

7.2 Popis vybraných materiálů

7.2.1 DC04 + ZE50/50-B-PO

Jedná se o legovanou ušlechtilou nízkouhlíkovou feritickou ocel mikrolegovanou titanem (norma předepisuje max. množství 0,3 hm%), který slouží jako karbonitridační stabilizátor k úplnému vyčištění feritu od intersticiálně rozpuštěného uhlíku a dusíku. Snížení obsahu těchto prvků zvyšuje hodnotu normálové anizotropie a zaručuje lepší hlubokotažné vlastnosti. Materiál je vyráběn jako plně uklidněný. Stabilitu (uklidnění) oceli zajišťuje optimalizovaný obsah hliníku. [7, 32].

Plech je elektrolyticky pozinkován, fosfátován, olejován a dodáván ve svitcích.

Tabulka 7-1, ČN EN 10152:2009, DC04, mechanické vlastnosti [33]

Označení oceli		Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Tažnost A_{80mm} [%]	Součinitel plastické anizotropie r_{90} [-]	Exponent deformačního zpevnění n [-]
Značka oceli	Číselné označení					
DC04	1.0338	140-210	320-400	≥38	≥1,6	≥0,18

Tabulka 7-2, ČSN EN 10152:2009, DC04, chemické složení [33]

Materiál	C %	P %	S %	Mn %
DC04	≤0,08	≤0,03	≤0,03	≤0,4

7.2.2 HX220BD + Z100-M-C

Jedná se o žárově zinkovanou plně uklidněnou nízkouhlíkovou jemnozrnnou ocel. Ocel obsahuje velmi nízké množství uhlíku a jmenovité množství fosforu, který zvyšuje pevnost oceli díky zpevnění tuhého roztoku. Po tváření součásti dochází během běžného cyklu aplikace barvy k jejímu zpevnění díky tzv. Bake hardening efektu. [7]

Tento materiál je velmi atraktivní alternativou konvenčních ocelí, protože je zpevněn až po tvářecím procesu, díky čemuž dochází k nižšímu opotřebení nástrojů. Zároveň nabízí velmi vysokou vrubovou houževnatost proti běžným (tvářeným) ocelím a IF ocelím. Z těchto důvodů je vhodná především pro výrobu vnějších karosářských plechů. Plech je žárově zinkován, s hmotností povlaku v rozmezí 40÷60 g·m⁻² z každé strany (tj. informativně 5,6÷8,5 μm). [7, 32]

Tabulka 7-3, ČSN EN 10346:2009, HX220BD, mechanické vlastnosti [34]

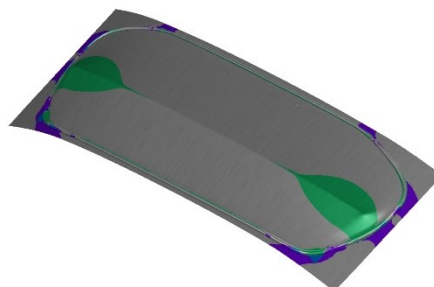
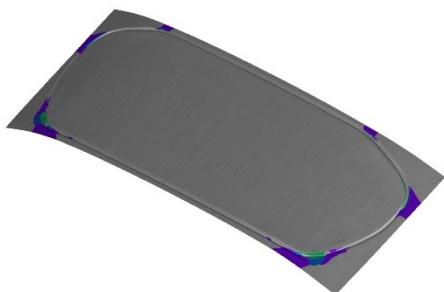
Označení oceli		Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Index Bake- Hardening [MPa]	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Tažnost A_{80mm} [%]	Součinitel plastické anizotropie r_{90} [-]	Exponent deformačního zpevnění n [-]
Značka oceli	Číselné označení						
HX220BD	1.0919	220-280	≥35	320-400	≥32	≥1,2	≥0,15

Tabulka 7-4, ČSN EN 10346:2009, HX220BD, chemické složení [34]

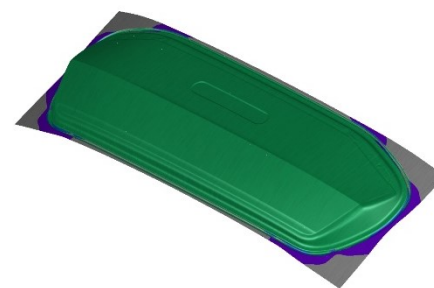
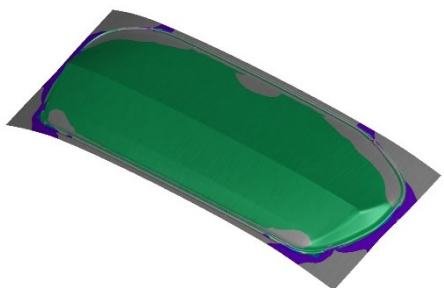
Materiál	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Al %	Ti %	Nb %
HX220BD	≤ 0,08	≤ 0,5	≤ 0,7	≤ 0,085	≤ 0,025	≥ 0,015	≤ 0,12	≤ 0,009

8 Ověření metodiky pomocí vhodného experimentu s využitím numerické simulace

Pro oba vybrané díly byly vytvořeny nové numerické simulace v programu AutoForm R6. Původní numerické simulace použité k výrobě tvářecích nástrojů byly vytvořeny ve verzi, která nepodporuje použití materiálových dat závislých na rychlosti deformace. Pro představu je na obrázcích 8-1 až 8-4 uveden výstup numerické simulace v různých stupních deformace. Zelená barva představuje oblast s žádoucí mírou přetvoření dílu.



Obrázek 8-1, díl_1, simulace hlubokého tažení, stav 1 Obrázek 8-2, díl_1, simulace hlubokého tažení, stav 2



Obrázek 8-3, díl_1, simulace hlubokého tažení, stav 3 Obrázek 8-4, díl_1, simulace hlubokého tažení, stav 4

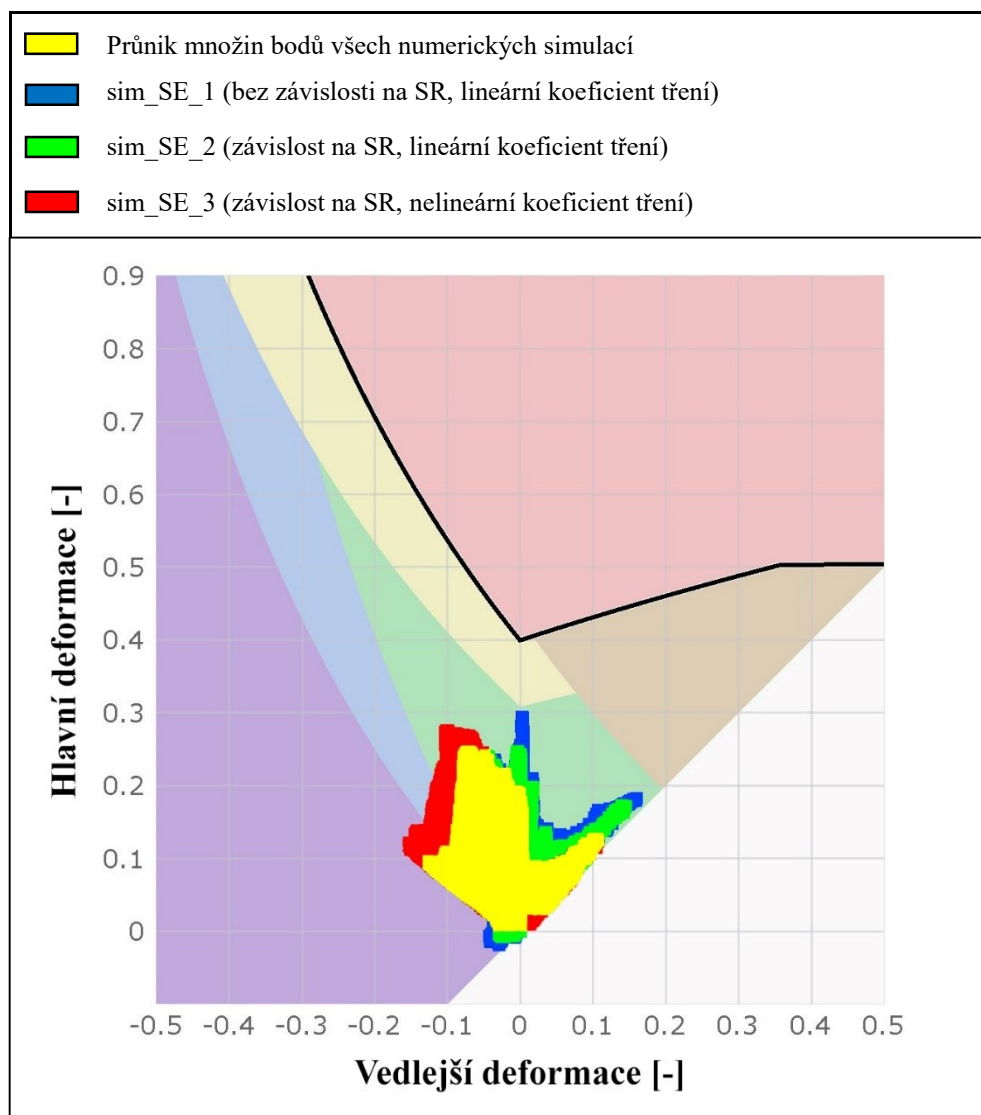
8.1 Díl 1, spodní páté dveře vozu Seat Ateca

Prvním krokem bylo vytvoření numerické simulace hlubokého tažení. Prvotní simulace (sim_SE_1) byla nastavena dle stávajícího metodického postupu, výpočet nebyl závislý na rychlosti posuvu nástrojů, tření bylo nastaveno na základě konstantního Coulombova koeficientu. Správnost numerické simulace byla hodnocena především z hlediska míry přetvoření dílu (formability) a podobnosti vůči původní simulaci.

Do takto vytvořené simulace byla následně vložena materiálová data, zohledňující závislost přetvárného odporu na rychlosti deformace (sim_SE_2). V rámci tření byl nadále zohledněn vliv tlaku na přídržovači a relativní rychlost nástroje a plechu (sim_SE_3). Rychlost posuvu příčnicku byla nastavena na základě provedených zkoušek, její přepočtení vůči lisovacímu taktu je uvedeno v tabulce 8-1. Porovnání autorem vytvořených numerických simulací lze vidět na obrázku 8-5.

Tabulka 8-1, díl_1, přepočtení rychlosti posuvu příčnicku vůči lisovacímu taktu

takt [zdvih·min ⁻¹]	1	4	12,9	14,7
rychlost posuvu příčnicku, v_c [mm·s ⁻¹]	31	124	400	456

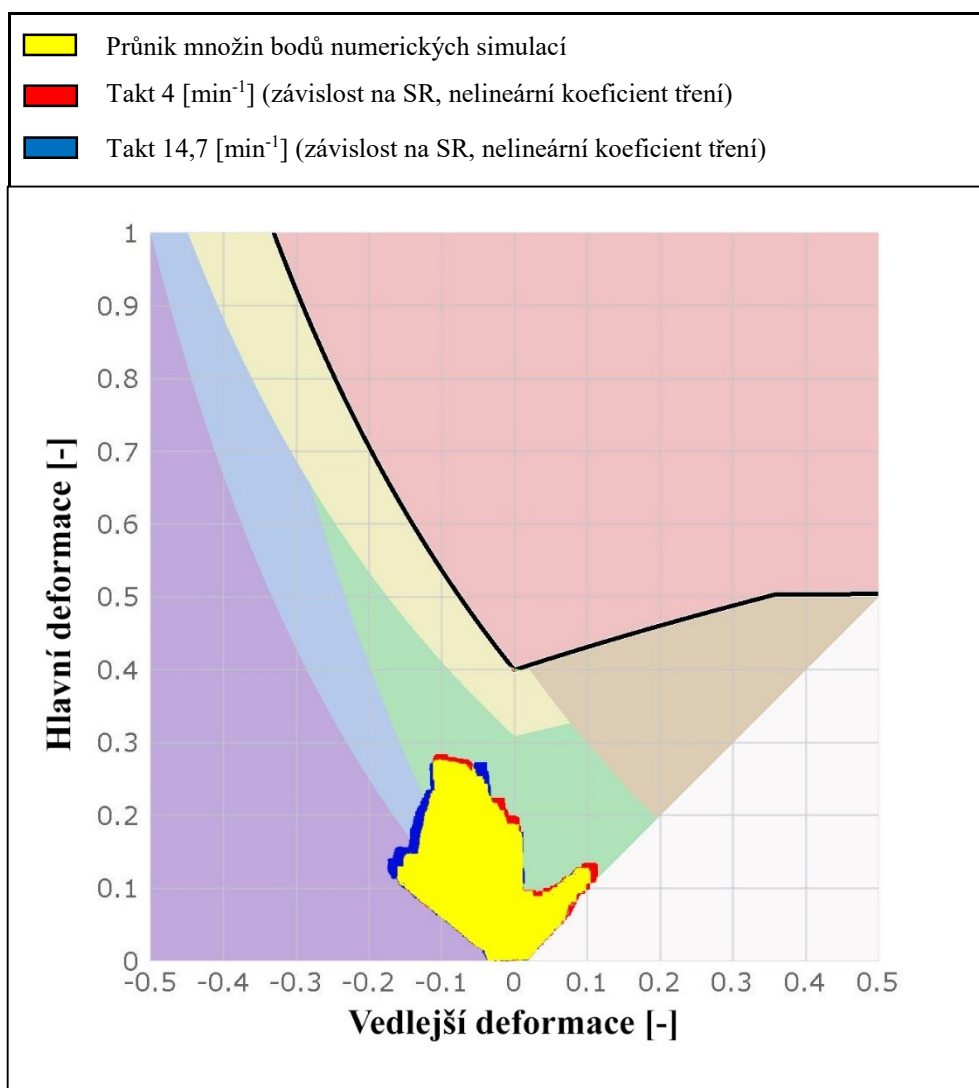


Obrázek 8-5, porovnání vytvořených simulací

Z obrázku 8-5 vyplývá, že s ohledem na rychlost deformace u dílu 1 simulace uvádí nižší hodnotu přetvoření ve směru jednoosého tahu za rovinné deformace. S ohledem na nelineární koeficient tření pak dochází opět k redukci jednoosého tahu za rovinné deformace, ale k nárůstu míry hlubokého tažení.

8.1.1 Vyhodnocení numerické simulace vzhledem k rychlosti lisování

Na obrázku 8-6 je uvedena závislost FLD vzhledem k nastavené rychlosti posuvu příčnicku. Díl_1 vykazuje v závislosti na vyšší rychlosti vyšší podíl hlubokého tažení a pokles ve smyslu vypínání. Vzdálenost od křivky FLC je v obou případech téměř totožná.



Obrázek 8-6, díl_1, AutoForm, porovnání takt 4 + takt 14,7

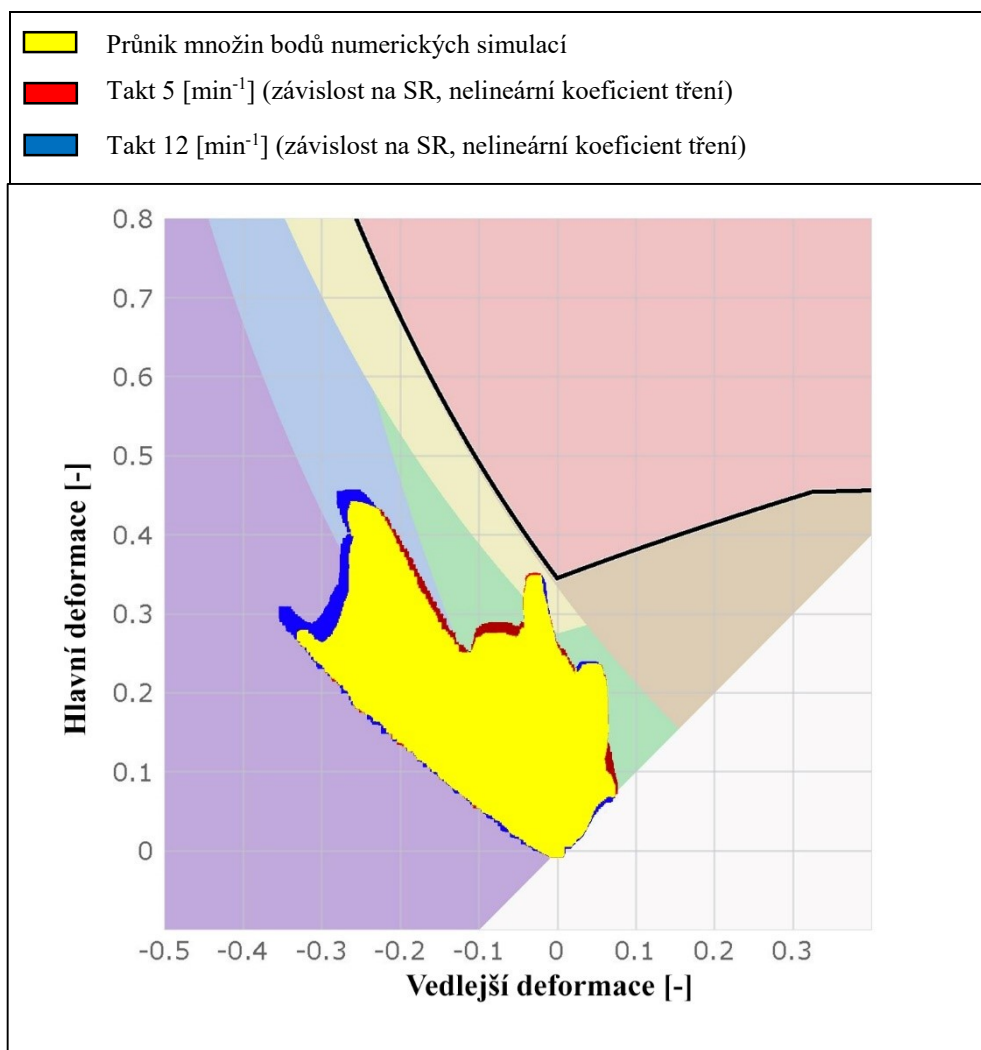
8.2 Díl 2, blatník vozu Škoda Superb

Postup pro vytvoření numerické simulace lisování dílu 2 byl odlišný. Prvotní simulace (sim_SK_3) byla nastavena již s ohledem na rychlost deformace a nelineárním koeficientem tření. Přepočtení rychlosti posuvu příčnicku vůči lisovacímu taktu je uveden v tabulce 8-2.

Tabulka 8-2, díl_2, přepočtení rychlosti posuvu příčnicku vůči lisovacímu taktu

takt [zdvih·min ⁻¹]	1	5	8	12
rychlost posuvu příčnicku, v_c [mm·s ⁻¹]	27	135	216	324

8.2.1 Vyhodnocení numerické simulace vzhledem k rychlosti lisování



Obrázek 8-7, díl_2, AutoForm, porovnání takt 5 + takt 12

Numerická simulace dílu_2 vykazuje vzhledem k nárůstu rychlosti podobné chování jako u dílu_1. S rostoucí rychlosti opět narůstá míra hlubokého tažení a klesá míra jednoosého tahu za rovinné deformace.

8.3 Dílčí závěr

Rozdíly v numerické simulaci jsou z hlediska rychlosti posuvu příčnicku téměř nepatrné. U obou dílů však dochází vzhledem k rostoucí rychlosti k nárůstu míry hlubokého tažení. Ani v jednom případě však numerická simulace nevykazuje výrazný rozdíl z hlediska míry přetvoření vzhledem k bezpečnosti dílu.

Zajímavé je srovnání výsledků numerické simulace vzhledem k okrajovým podmínkám a způsobu výpočtu. Simulace v tomto ohledu vykazuje velmi rozdílné výsledky. Komplexní srovnání s fyzickými zkouškami z hlediska chování dílu je uvedeno v závěru experimentální části.

9 Experiment reálného lisovacího procesu

S cílem ověření vlivu rychlosti deformace na změnu chování lisovaného dílu byla provedena série reálných zkoušek. Vybrané díly byly autorem nejprve nasíťovány a následně tvářeny při různých lisovacích takttech. Vylisované díly pak byly pomocí systému ARGUS (v6.3.0-1) vyhodnoceny. Všechny zkoušky probíhaly ve spolupráci s oddělením PFS-K.

9.1 Příprava nástřihů

Povrch vzorků byl důkladně odmaštěn a na jejich povrch byla elektrochemicky vyleptána kontrastní síť o rozměrech přibližně 30x40cm. Síť je tvořena body s průměrem 1mm o přesné relativní vzdálenosti. Vzorky byly následně zpětně naolejovány.



Obrázek 9-1, díl_1, aplikace deformační sítě



Obrázek 9-2, díl_1, nanesené deformační sítě

9.2 Lisování dílů

Díly byly lisovány v OP20 a následně ze stroje vyjmuty. Součást byla lisována v taktu odpovídajícím reálné výrobě součásti. Lisovací takt byl, dle možností stroje, u dalších vzorků výrazně snížen a zvýšen. Cílem experimentu bylo totožné nastavení procesu s rozdílem pouze z hlediska rychlosti lisování.



Obrázek 9-3, díl_2, nástřih před lisováním

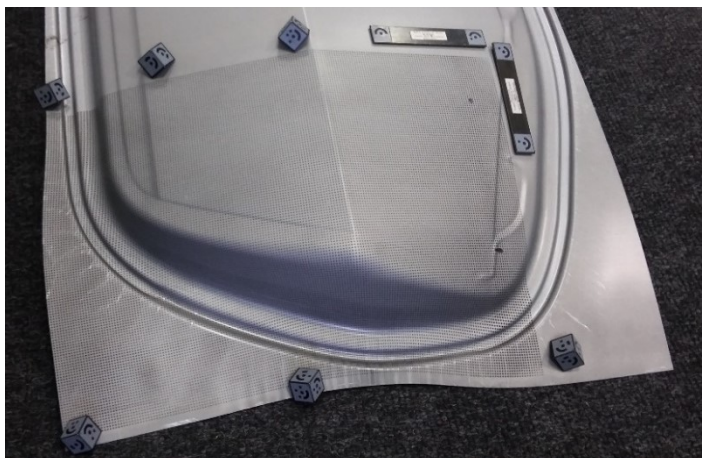
Obrázek 9-4, díl_2, výlisek po OP20



Obrázek 9-5, díl_2, vylisovaný díl s nanesenou deformační sítí

9.3 Měření a vyhodnocení deformace

Díly byly snímány pomocí fotoaparátu Nikon D300s s rozlišením 4288x2848 pixelů a pevným ohniskem. Snímky byly následně zpracovány systémem ARGUS 12M (v6.3.0-1). Na obrázku 9-8 lze pozorovat síť vytvořenou na základě získaných snímků. Každý průnik přímek na obrázku je bodem na povrchu výlisku.

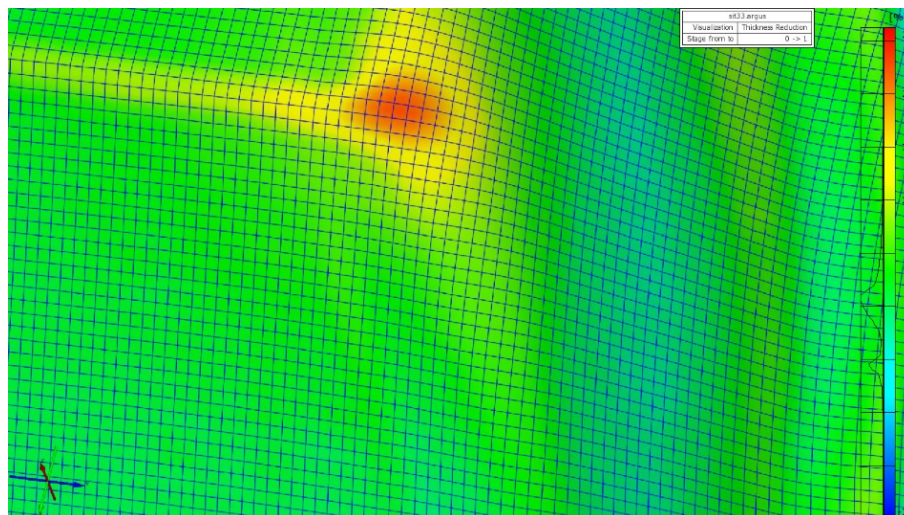


Obrázek 9-6, díl1, ARGUS, měření deformace



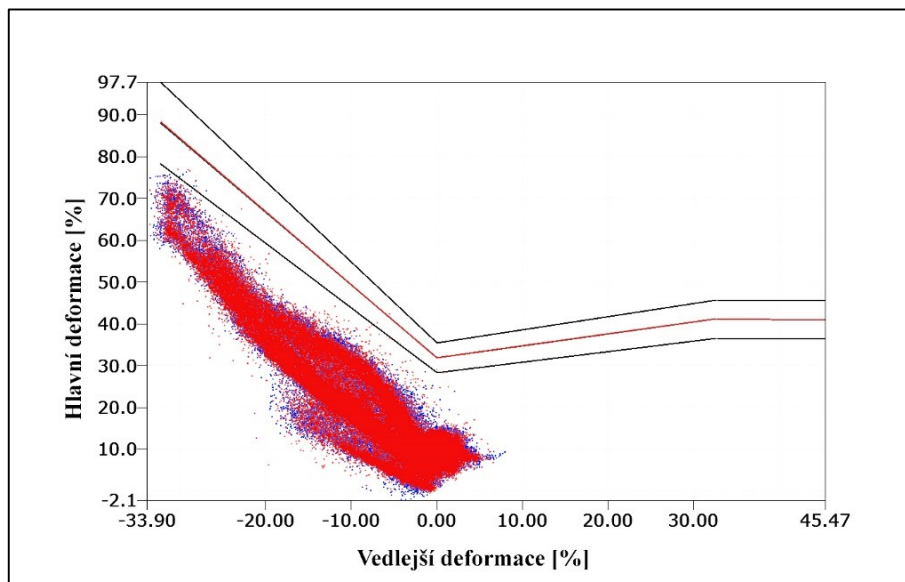
Obrázek 9-7, ARGUS, měřicí pomůcky

Z hlediska vyhodnocení byla náročná především identifikace míst pro následné porovnání. Měřeny proto byly vždy nejméně 3 body ve stejné oblasti, získané hodnoty byly následně zprůměrovány.



Obrázek 9-8, ARGUS, ukázka síť

Přestože byly při stejném taktu lisovány vždy 2 vzorky, v rámci porovnání FLD byl použit vždy výsledek měření jen jednoho vzorku. Důvodem je velmi dobrá shoda vzorků, viz obrázek 9-9.



Obrázek 9-9, ARGUS, srovnání výsledků vzorků č. 5 a č. 6 u dílu_2

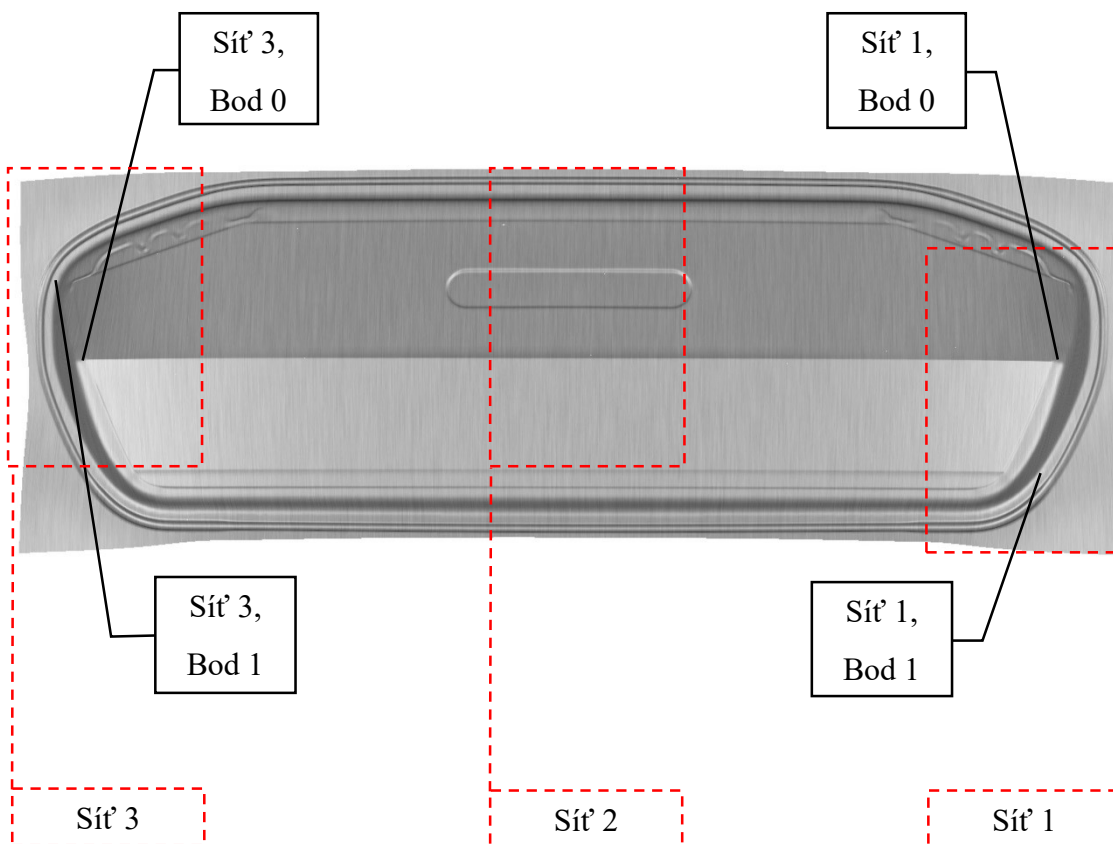
9.4 Díl 1, spodní pás dveře vozu Seat Ateca

Díl 1 je vyráběn z hlubokotažné oceli DC04+ZE50/50-B-P-O o tloušťce 0,7 mm. Tento díl byl lisován na servo-mechanickém lisu TR 20000 (Müller-Weingarten) s maximální lisovací silou 20 000 kN. Celkem 5 vzorků bylo lisováno při 3 různých takttech stroje. Umístění deformačních sítí a kontrolních bodů bylo vybráno na základě výsledků numerické simulace. Sledována byla místa s nejvyšší hodnotou deformace, tj. místa s nejvyšším rizikem vzniku trhlin. Naneseny byly vždy 3 deformační sítě.

Plechý byly dodány společností Salzgitter, číslo svitku 66934005200794M.

Tabulka 9-1, díl_1, přehled vzorků a souvisejících lisovacích taktů

takt [zdvih·min ⁻¹]	4	12,9	14,7
vzorek č.	4, 5	1, 2	3



Obrázek 9-10, díl_1, umístění deformačních sítí a měřených bodů

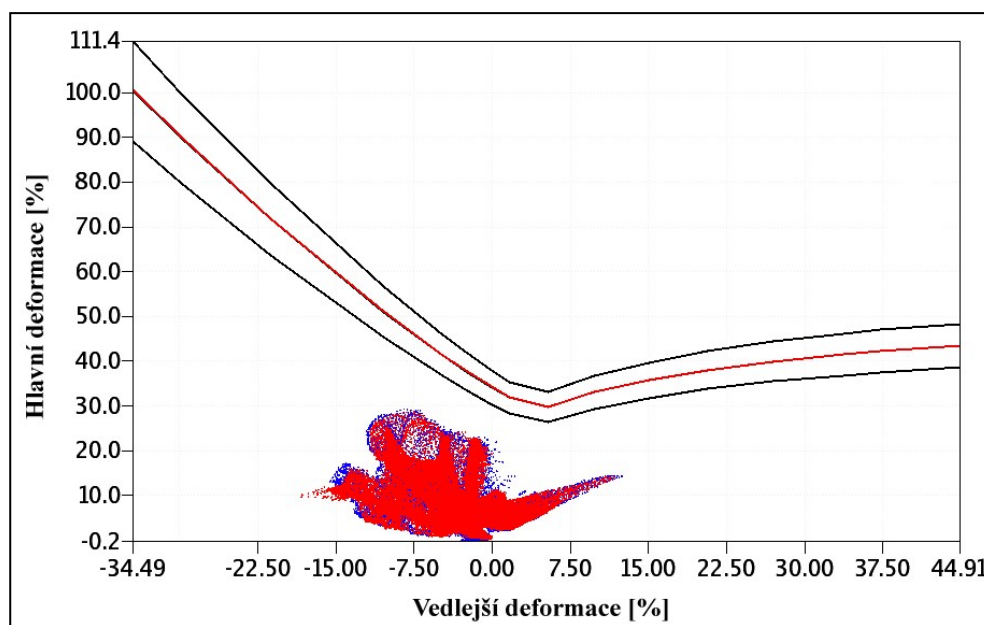
9.4.1 Výsledky ARGUS

Pro snadné grafické vyhodnocení byla v ARGUSu pro díl_1 vždy nastavena barevná stupnice s totožnými mezními hodnotami. FLC křivka byla definována vzhledem k materiálovým datům vloženým do programu AutoForm. Legenda k výsledkům v kapitole 9.4.1 a 9.5.1 je uvedena v tabulce 9-2.

Tabulka 9-2, legenda k obrázkům v kapitolách 9.4.1 a 9.5.1

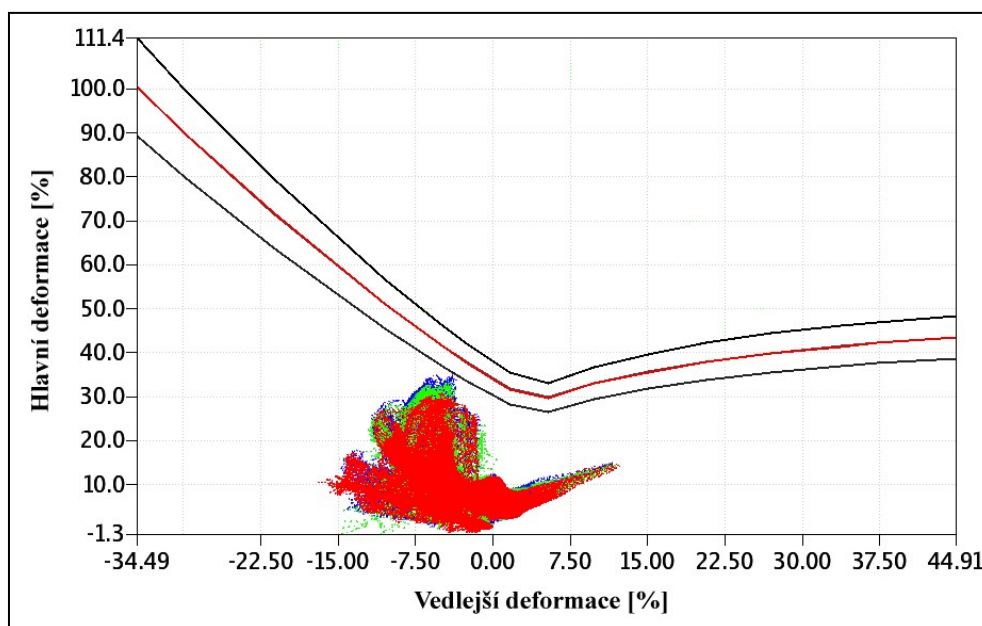
■	Takt 4 [min ⁻¹]
■	Takt 12,9 [min ⁻¹]
■	Takt 14,7 [min ⁻¹]

Na obrázku 9-11 je uvedeno srovnání deformační sítě 3. FLD nevykazuje vzhledem k výrobnímu taktu téměř žádné rozdíly. Míra a charakter přetvoření jsou v obou případech téměř totožné.

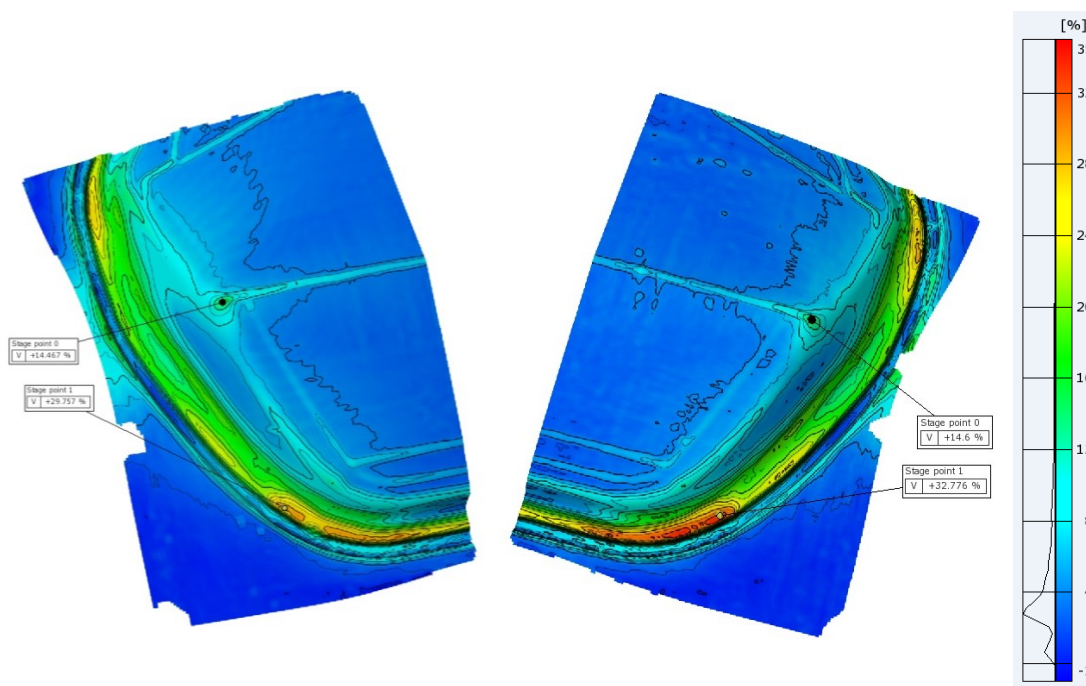


Obrázek 9-11, díl_1, SÍŤ 3, ARGUS, srovnání takt 4 + takt 14,7

Výrazně rozdílná situace je v případě srovnání deformační sítě 1, uvedeného na obrázku 9-12 a 9-13. Při navýšení výrobního taktu dochází k výrazně vyšší míře jednoosého tahu za rovinné deformace. Ze snímků (Obrázek 9-13) je patrné, že především ovlivněnou je oblast mezi stojnou a brzdící drážkou u okraje dílu.



Obrázek 9-12, díl_1, SÍŤ 1, ARGUS, srovnání takt 4 + takt 12,9 + takt 14,7



Obrázek 9-13, díl_1, SÍŤ 1, srovnání ARGUS, takt 4 (vlevo) + takt 14,7 (vpravo)

9.4.2 Dílčí závěr

Na základě provedené analýzy lze tvrdit, že vliv deformační rychlosti je na díle_1 pozorovatelný. Ovlivněna je oblast ležící mezi stojnou a brzdící drážkou u okraje dílu, ne však celý díl. Vzhledem k poloze oblasti se tento vliv projevuje v FLD diagramu pro síť 3. Z této analýzy vyplývá, že rychlost deformace nepoměrně ovlivňuje přetvoření v jednotlivých částech dílu.

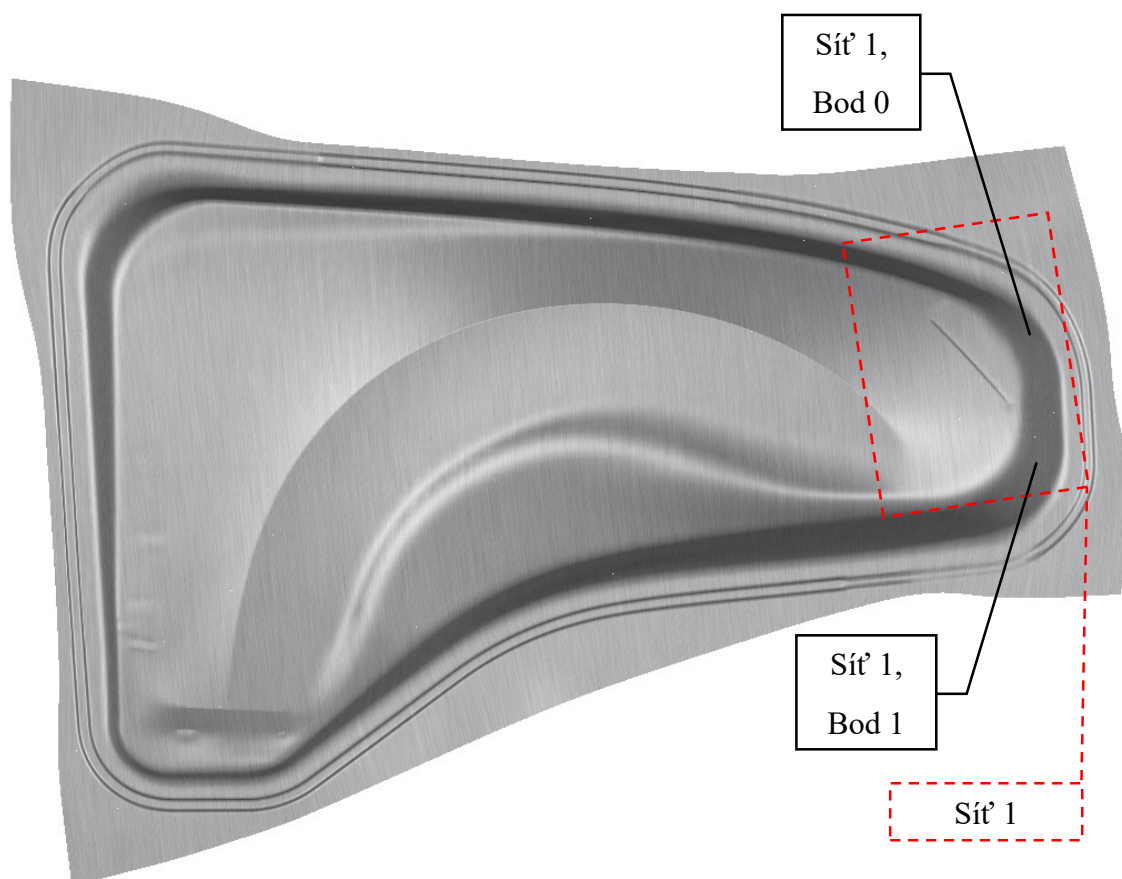
9.5 Díl 2, blatník vozu Škoda Superb

Díl 2 je vyráběn z hlubokotažné oceli se zvýšenou mezí kluzu HX220BD+Z100-M-C o tloušťce 0,6mm. Tento díl byl lisován na servo-mechanickém zpracovacím lisu náležícím k lisovací lince PXL 81 000 (Schuler). Celkem 6 vzorků bylo lisováno při 3 různých takttech stroje. Umístění deformačních sítí a kontrolních bodů bylo vybráno na základě výsledků numerické simulace. Na vzorky byla nanesena vždy pouze 1 deformační síť a to v místě s předpokládanou největší plastickou deformací.

Plechý byly dodány společností Voestalpine, číslo svitku 826700 2016-04-24.

Tabulka 9-3, díl_2, přehled vzorků a souvisejících lisovacích taktů

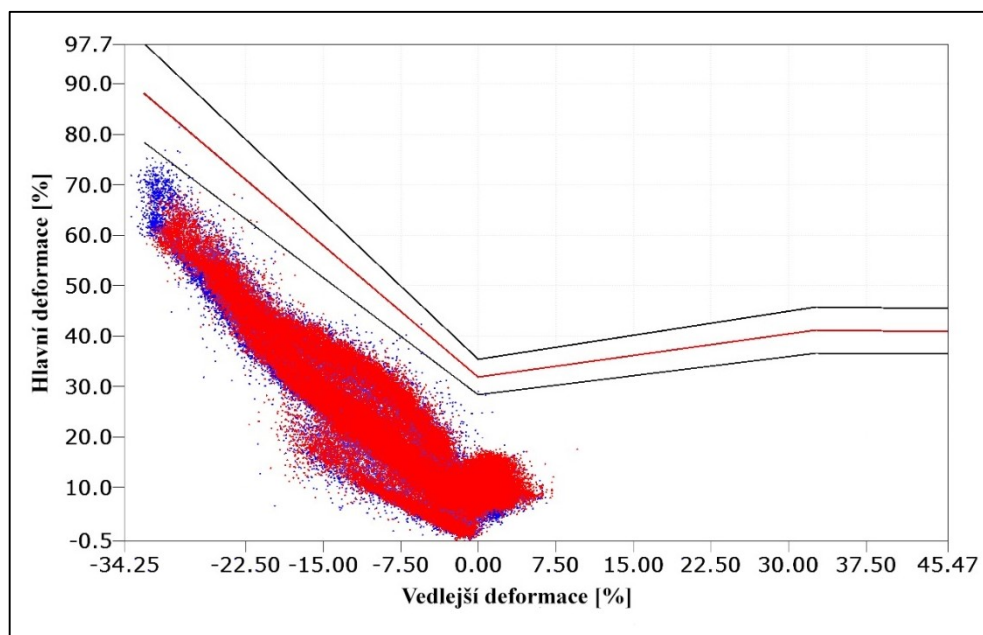
takt [zdvih·min ⁻¹]	5	8	12
vzorek č.	5, 6	3, 4	1, 2



Obrázek 9-14, díl_2, umístění deformačních sítí a měřených bodů

9.5.1 Výsledky ARGUS

Z obrázků 9-15 vyplývá, že vliv deformační rychlosti je ve většině sledované oblasti téměř zanedbatelný. Místem s nejvýraznější změnou hodnoty deformace je oblast v okolí bodu 1. Tyto výsledky jsou dále komentovány v kapitole Zhodnocení experimentu. Význam použitých barev je uveden v tabulce 9-2.



Obrázek 9-15, díl_3, SÍŤ 1, ARGUS, srovnání takt 5 + takt 12

9.5.2 Dílčí závěr

Navzdory prvotnímu předpokladu není vliv rychlosti lisování na tento díl tak výrazný jako v případě dílu 1. Přestože je možné sledovat nárůst plastické deformace, neovlivňuje tato deformace díl z hlediska vyrobitelnosti. Na základě této analýzy lze konstatovat, že vliv rychlosti deformace není pro tento výlisek závislý na hloubce tažení.

10 Společná analýza numerické simulace a reálných zkoušek

V rámci experimentu byly na povrchu dílu stanoveny kontrolní body. V těchto bodech byly měřeny hodnoty hlavní deformace, vedlejší deformace a ztenčení materiálu. Porovnávané hodnoty jsou získány, v případě dílu 1, ze simulace *sim_SE_3*. V případě dílu 2, byla použita simulace *sim_SK_1*. Přehled měření je uveden v tabulce 10-1 až 10-6. Analýza byla pro díl_2 provedena i z hlediska polohy bodů v FLD.

10.1 Díl 1, spodní páté dveře vozu Seat Ateca

Tabulka 10-1, díl_1, ARGUS, analýza deformace

vzorek č.	síť	takt [zdvih·min ⁻¹]	rychlost [mm·s ⁻¹]	Hlavní deformace [%]		Vedlejší deformace [%]		Redukce tloušťky [%]	
				bod 0	bod 1	bod 0	bod 1	bod 0	bod 1
4	1	4	124	14,47	29,76	12,19	-3,80	22,11	19,85
	3			13,95	28,56	11,34	-7,77	21,13	15,63
5	1	4	124	14,43	28,29	11,73	-4,57	21,76	18,26
	3			13,61	27,87	11,72	-7,78	21,18	15,04
				14,11	28,62	11,75	-5,98	21,54	17,20
1	1	12,9	400	14,12	33,01	11,53	-4,08	21,37	21,56
	3			14,18	28,47	12,03	-7,96	21,77	15,40
2	1	12,9	400	13,73	33,51	12,15	-4,41	21,55	21,57
	3			14,63	26,04	12,11	-8,05	22,16	13,69
				14,16	30,25	11,95	-6,12	21,71	18,06
3	1	14,7	456	14,60	32,78	11,60	-4,17	21,80	21,36
	3			14,18	28,68	12,49	-7,50	22,12	15,95
				14,39	30,73	12,04	-5,83	21,96	18,66

Tabulka 10-2, díl_1, AutoForm, analýza deformace

takt [zdvih·min ⁻¹]	rychlost [mm·s ⁻¹]	Hlavní deformace [%]				Vedlejší deformace [%]				Redukce tloušťky [%]			
		g3p0	g3p1	g1p0	g1p1	g3p0	g3p1	g1p0	g1p1	g3p0	g3p1	g1p0	g1p1
4	124	12,64	27,63	12,64	27,00	10,30	-6,82	10,52	-11,18	23,67	16,47	24,33	17,85
14,7	456	11,96	26,74	11,74	26,62	9,53	-11,29	9,42	-11,52	22,59	14,75	22,16	16,86

Tabulka 10-3, díl_1, shrnutí výsledků

ARGUS		bod 0	bod 1	AutoForm		bod 0	bod 1
Hlavní deformace	[%]	roste	roste	Hlavní deformace	[%]	klesá	klesá
Vedlejší deformace	[%]	roste	stagnuje	Vedlejší deformace	[%]	klesá	roste v záp. směru
Redukce tloušťky	[%]	roste	roste	Redukce tloušťky	[%]	klesá	klesá

Z předložených výsledků vyplývá, že s rostoucí hodnotou rychlosti deformace dochází u dílu 1 během tvářecího procesu k vyšší redukci tloušťky. Numerické výsledky se shodují s FLD diagramem uvedeným na obrázku 9-12.

Nejvýraznější změnu hodnot lze pozorovat na bodu 1 v síti 1. Hodnota hlavní deformace celkem narůstá o více než 2%, redukce tloušťky pak zhruba o 1,5%. Zajímavý je také charakter růstu deformací v závislosti na navyšování taktu. Průměrná hodnota hlavní deformace mezi taktem 12,9 a 4 (3,23x vyšší rychlost) narůstá o 1,64%. Mezi taktem 14,7 a 12,9 (1,15x vyšší rychlost) je tento nárůst 0,48%.

Numerická simulace na rozdíl od reálných zkoušek vykazuje opačný trend chování materiálu. S rostoucí rychlostí dochází k menší deformaci v obou směrech a tím pádem i k nižší redukci tloušťky materiálu.

10.2 Díl 2, blatník vozu Škoda Superb

Tabulka 10-4, díl_1, ARGUS, analýza deformace

vzorek č.	sít	takt [zdvih·min ⁻¹]	rychlost [mm·s ⁻¹]	Hlavní deformace [%]		Vedlejší deformace [%]		Redukce tloušťky [%]	
				bod 0	bod 1	bod 0	bod 1	bod 0	bod 1
5	1	5	135	57,51	68,67	-24,85	-28,74	15,48	16,75
6	1	5	135	56,60	72,14	-24,08	-30,89	15,80	15,49
				57,06	70,41	-24,46	-29,82	15,64	16,12
3	1	8	216	59,77	71,15	-25,08	-31,31	16,38	14,88
4	1	8	216	60,80	72,02	-25,77	-29,04	16,19	18,00
				60,28	71,58	-25,42	-30,18	16,28	16,44
1	1	12	324	61,10	76,24	-26,53	-30,09	13,35	18,60
2	1	12	324	63,16	77,26	-28,83	-28,91	15,95	22,40
				62,13	76,75	-27,68	-29,50	14,65	20,50

Tabulka 10-5, díl_1, AutoForm, analýza deformace

takt [zdvih·min ⁻¹]	rychlost [mm·s ⁻¹]	Hlavní deformace [%]		Vedlejší deformace [%]		Redukce tloušťky [%]	
		g1p0	g1p1	g1p0	g1p1	g1p0	g1p1
4	135	39,24	43,48	-32,58	-34,18	22,38	24,78
12	324	39,51	45,06	-33,91	-34,99	21,53	25,45

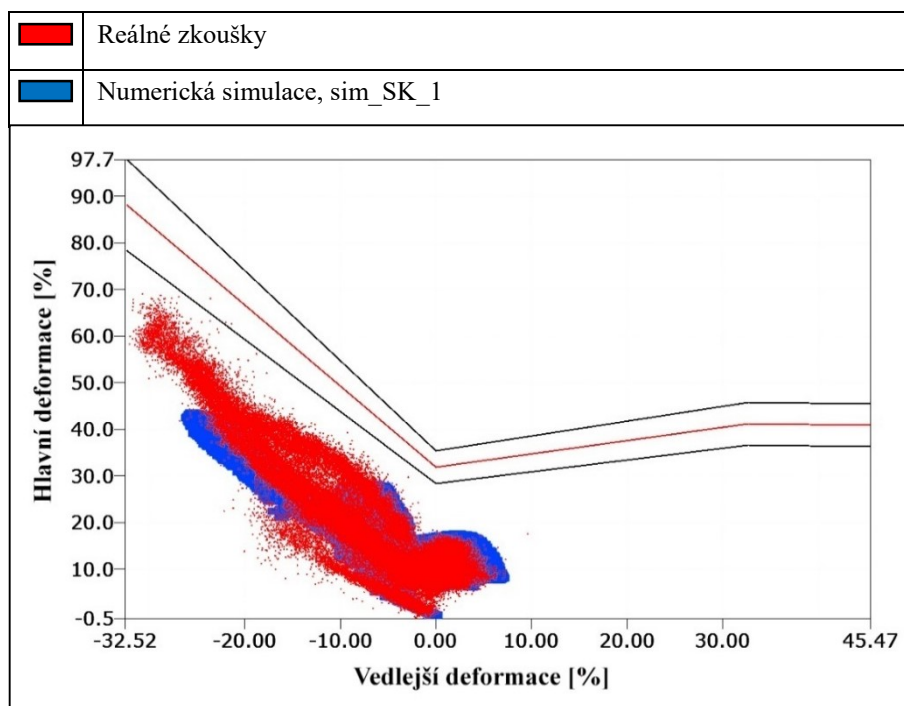
Tabulka 10-6, díl_2, shrnutí výsledků

ARGUS		bod 0	bod 1	AutoForm		bod 0	bod 1
Hlavní deformace	[%]	roste	roste	Hlavní deformace	[%]	roste	roste
Vedlejší deformace	[%]	roste v záp.směru	stagnuje	Vedlejší deformace	[%]	roste v záp.směru	roste v záp.směru
Redukce tloušťky	[%]	stagnuje	roste	Redukce tloušťky	[%]	klesá	roste

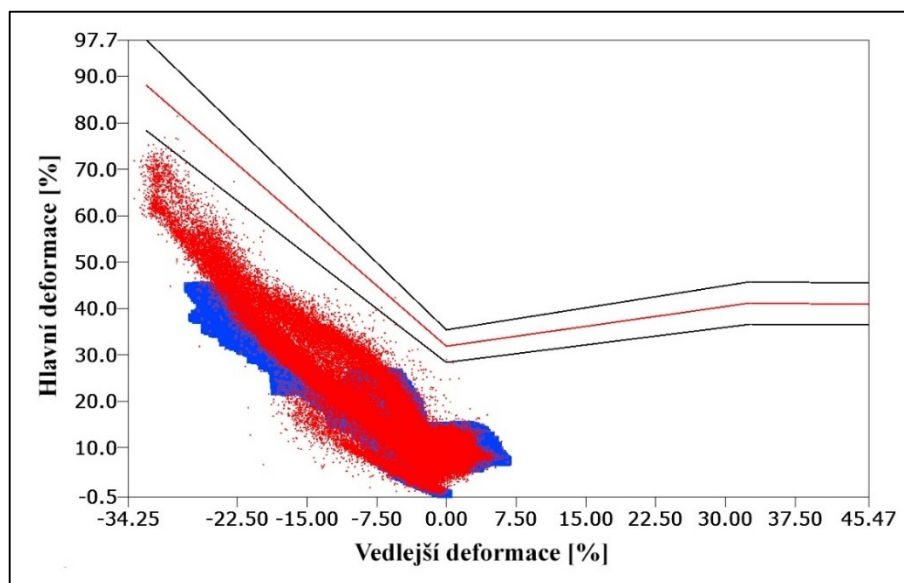
Podobné chování jako díl 1 vykazuje při reálných zkouškách i sledovaný díl 2. S rostoucí hodnotou rychlosti deformace dochází v obou případech k nárůstu hodnoty hlavní deformace. Změna hodnoty vedlejší deformace se pak v měřených bodech liší. Numerická simulace v tomto případě uvádí podobnější výsledky než je tomu u dílu 1.

O chování materiálu lépe vypovídá obrázek 9-15, na kterém lze vidět, že s rostoucí rychlostí dochází k vyšší deformaci především ve směru hlubokého tahu.

Získané FLD diagramy byly zároveň porovnány graficky s výsledky numerické simulace. Charakter přetvoření se s výsledky reálných zkoušek shoduje především v okolí nulové hodnoty vedlejší deformace, v levé části pak dochází k výrazné neshodě množiny bodů. Numerická simulace uvádí až o 30% nižší hodnoty hlavní deformace.



Obrázek 10-1, díl_2, porovnání výsledků AutoForm a ARGUS, takt 5



Obrázek 10-2, díl_2, porovnání výsledků AutoForm a ARGUS, takt 12

11 Závěr

V diplomové práci je popsána problematika lisovacího procesu z hlediska deformační rychlosti. Charakterizovány a vysvětleny jsou pojmy spojené s problematikou tvářecího procesu a faktory ovlivňující proces plošného tváření. Uvedeny jsou v současnosti používané materiály a lisy. Popsána je problematika deformační rychlosti, exponentu rychlosti deformace, využití numerických simulací a měření deformací reálných výlisků.

Vliv rychlosti deformace je v současnosti sledován především u středně a vysoce pevných ocelových materiálů a neželezných kovů z hlediska pevnostních částí a velmi vysokých hodnot rychlosti deformace. Vzhledem k současnému stavu poznání je však nutné tento parametr více zkoumat i z hlediska výroby povrchových dílů karoserie v automobilovém průmyslu. Bližší porozumění rychlosti deformace je důležité z hlediska popisu chování materiálu v lisovacím procesu.

Cílem této práce bylo zhodnocení vlivu deformační rychlosti na stabilitu lisovacího procesu. V úvodní části experimentální části práce je proto uveden návrh metodiky pro sledování vlivu rychlosti deformace. Za účelem ověření této metodiky byly vybrány dva v současnosti vyráběné povrchové karosářské díly. Prvním dílem jsou spodní páté dveře vozu Seat Ateca, druhým dílem je blatník vozu Škoda Superb 3. generace. Chování těchto dílů bylo sledováno z hlediska reálných zkoušek lisování a ověřeno pomocí numerické simulace. Tvorba a vyhodnocení numerických simulací proběhlo za pomoci programu AutoForm R6. Analýza deformace fyzických výlisků byla provedena pomocí systému ARGUS. Získané výsledky byly hodnoceny zvlášť pro každý díl i komplexně z hlediska celého experimentu.

Na základě analýzy dat získaných z reálných zkoušek lze uvést, že s rostoucí hodnotou deformační rychlosti dochází k vyšší míře přetvoření dílu. Z experimentu vyplývá, že míra tohoto vlivu není stejná v rámci celého dílu. Změny chování navíc nejsou jednoznačně závislé ani na hloubce tahu. Vliv je pozorovatelný u obou sledovaných dílů. Všechny získané hodnoty jsou přehledně uvedeny v tabulkách 10-1 až 10-6.

Numerická simulace ve sledovaných oblastech vykazuje odlišné výsledky než reálné zkoušky lisování. Míra vlivu rychlosti deformace je výrazně nižší. Simulace dílu 1 vykazuje opačné chování, než je tomu v případě reálných zkoušek.

Úskalím výzkumu je nutnost komplexního sledování lisovacího procesu, s použitím všech dostupných nástrojů. Problematické je také stanovení metodiky pro sledování vlivu rychlosti deformace. Velikost rychlosti deformace vyplývá z lisovacího taktu, konkrétně z okamžité rychlosti posuvu nástroje. Posuv nástroje však ovlivňuje i relativní rychlost posuvu plechu a nástroje, koeficient tření, zahřívání plechu a nástroje a další parametry. Žádoucí je také stanovení přesnější metodiky pro porovnání výsledků numerické simulace a reálných dílů.

V rámci dalšího výzkumu této problematiky je vhodné vliv deformační rychlosti sledovat pomocí dalšího simulačního softwaru. Pro přesnější závěry je žádoucí měření dílu opakovat a deformaci sledovat v celém jeho objemu. Vhodné je deformaci výlisku ověřit pomocí metalografického pozorování.

Přesnější predikce lisovacího procesu by vedla k finančním a časovým úsporám v předvýrobní fázi lisovacího nářadí. Za předpokladu dostatečné znalosti procesu i z hlediska vlivu deformační rychlosti je navíc možné vybrané díly lisovat při vyšších takttech a tím dosáhnout dalších časových a finančních úspor.

Za účelem zlepšení stability lisování, finanční úspory a časové úspory je také nutná tvorba numerických simulací, které lépe odpovídají reálnému lisovacímu procesu. V současnosti je zpřesnění možné například využitím materiálových dat závislých na parametru rychlosti deformace a nelineárního koeficientu tření (závislého na tlaku, rychlosti a vrstvě maziva). V experimentální části této práce je uvedeno srovnání rozdílných výsledků numerické simulace s ohledem na použití zmíněných parametrů.

Seznam použité literatury

- [1] PROCHÁZKA, Jiří, Miroslav ZAPOTIL, Milan NĚMEC a Jiří NOVOTNÝ. *Technologie slévání, tváření a sváření*. 3. vyd. Praha: ČVUT, 1990, 343 s.
- [2] TECHNICKÁ UNIVERSITA V LIBERCI - FAKULTA STROJNÍ. TUL. Katedra strojírenské technologie - Oddělení tváření kovů. *Technologie tváření kovů* [online]. TUL©2012 [cit. 2016 – 08 - 09]. Dostupné z:
http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm
- [3] PETRUŽELKA, J., SONNEK, P. *Tvařitelnost kovových materiálů*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2007. 211 s.
- [4] DIN 8584-1: 2003-09. *Fertigungsverfahren Zugdruckumformen: Teil 1: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. 1.
- [5] SCHÖNBACH, Thomas. *Blechumformung in der Praxis: Grundkurs Tiefziehen*. AutoForm, 2000.
- [6] Cold-rolled steel strip: Technical Terms of Delivery. *Voestalpine* [online]. 2012 [cit. 2016-08-09].
- [7] MACEK, Karel. *Kovové materiály*. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-010-3513-1.
- [8] KIM, Ji-Hoon, Daeyong KIM, Heung Nam HAN, F. BARLAT a Myoung-Gyu LEE. Strain rate dependent tensile behavior of advanced high strength steels: Experiment and constitutive modeling. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2013, **559**, 222-231 [cit. 2016-08-10]. DOI: 10.1016/j.msea.2012.08.087. ISSN 09215093. Dostupné z:
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509312012087>
- [9] MAREK, Pavel. Nová lisovací linka v Mladé Boleslavi. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2013 [cit. 2016-08-09]. Dostupné z:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/nova-lisovaci-linka-v-mlade-boleslavi.html>
- [10] CVEŠPER, David. *Verifikace stupně plošné anizotropie a exponentu deformačního zpevnění*. Praha, 2014. DIPLOMOVÁ PRÁCE. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. František Tatíček

- [11] ČSN ISO 10113. *Kovové materiály – Plechy a pásy – Stanovení součinitele plastické anizotropie*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a zkušebnictví, 2009
- [12] WOZNIAK, Jan a Miloslav JAKOB. Příčiny variability výsledků takové zkoušky za okolní teploty. *Sdružení českých zkušeben a laboratoří*. 2007, 20 s. Dostupné také z: http://www.sczl.cz/dokumenty/seminary_12_07.pdf
- [13] HUANG, Gang, Benda YAN a Hong ZHU. THE EFFECT OF STRAIN RATE ON TENSILE PROPERTIES AND FRACTURE STRAIN. *Great Designs in Steel Seminar*. 2012 [cit. 2016-08-10].
- [14] ČSN EN ISO 26203-1. *Kovové materiály - Metoda zkoušení tahem při vysokých rychlostech deformace - Část 1: Systémy typu pružné tyče*. 2010.
- [15] SILVA, M.B., K. ISIK, A.E. TEKKAYA, A.G. ATKINS a P.A.F. MARTINS. Fracture toughness and failure limits in sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2016, **234**, 249-258 [cit. 2016-08-10]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.03.029. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013616300851>
- [16] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. 2010.
- [17] DOUBEK, Pavel. *Výzkum deformačního chování vysokopevných plechů při vyšších rychlostech deformace*. Liberec, 2006. Dizertační práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Mirko Král.
- [18] *Strain rate sensitivity of automotive sheet steels: influence of plastic strain, strain rate, temperature, microstructure, bake hardening and pre-strain*. [Online-Ausg.]. Aachen: Shaker, 2010. ISBN 978-383-2291-495.
- [19] PETRUŽELKA, J., HRUBÝ, J., *Strojírenské tváření I*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2002. 152 s.
- [20] BENEŠOVÁ, Soňa. *Materiálové modelování a numerická simulace jako nástroj pro vývoj technologických procesů*. Plzeň, 2007. Dizertační práce. ZČU v Plzni. Vedoucí práce Vladimír Bernášek.

[21] PAČÁK, Tomáš. *VERIFICATION OF SPRINGBACK ANALYSIS ACCURACY IN DEEP DRAWING PROCESS WITH FOCUS ON INITIAL SETTING OF NUMERICAL SIMULATION* [online]. 2016, , 6 [cit. 2016-08-10].

[22] PETRMICHL, Rudolf. Počítačová simulace tváření plechů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2001 [cit. 2016-08-10]. Dostupné z:

<http://www.mmspektrum.com/clanek/pocitacova-simulace-tvareni-plechu.html>

[23] Sériová výroba plošným tvářením a numerická simulace. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2006 [cit. 2016-08-10]. Dostupné z:

<http://www.mmspektrum.com/clanek/seriova-vyroba-plosnym-tvarenim-a-numericke-simulace.html>

[24] ABSPOEL, Michael. Easy to use advanced material models. In: *AutoForm user conference* [online]. Torslanda, 2015 [cit. 2016-08-10].

[25] Tribologische Analyse und Reibungsmodellierung in Umformsimulationen mit Anwendung auf den Kotflügel des neuen Skoda Fabia. In: *TriboForm* [online]. 2015 [cit. 2016-08-10].

[26] Experimentální měření křivky mezních deformací. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2015 [cit. 2016-08-10]. Dostupné z:

<http://www.mmspektrum.com/clanek/experimentalni-mereni-krivky-meznich-deformaci.html>

[27] interní dokument Škoda Auto, a.s., ARGUS Handbook

[28] BENEŠ, Jiří. *Zjišťování mezních stavů deformace pomocí optických systémů ARAMIS a ARGUS*. 2010. Diplomová práce. Vedoucí práce Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

[29] JAHN, Michal. *Analýza rizik při výrobě lisovacího náradí*. Praha, 2015. Diplomová práce. Vedoucí práce Ing. František Tatiček, Ph.D.

[30] *Application Example: Material Testing* [online]. gom [cit. 2016-08-10]. Dostupné z: http://www.gom.com/fileadmin/user_upload/industries/flc_fld_EN.pdf

[31] CHEN, Jieshi a Xianbin ZHOU. *A New Curve Fitting Method for Forming Limit Experimental Data* [online]. Bejgin, 2004, , 5 [cit. 2016-08-10]. Dostupné z: <http://www.jmst.org/fileup/PDF/2004294.pdf>

- [32] PILVOUSEK, Tomáš; TATÍČEK, František; ROLEČEK, Lubomír; BARISIC, B. The Effect of Strain Rate on the Properties and Microstructure of the DC 06 Steel. *Proceedings of International Conference on Innovative Technologies IN-TECH*. Jaroměř: Centrum pro povrchové úpravy, 2010, p. 628-632. ISBN 978-80-904502-2-6.
- [33] ČSN EN 10152: *Ocelové ploché výrobky válcované za studena elektrolyticky pozinkované pro tváření za studena – Technické dodací podmínky*. 2009
- [34] ČSN EN 10436: *Kontinuálně žárově ponorem povlakované ocelové ploché výrobky – Technické dodací podmínky*. 2009

Seznam obrázků

Obrázek 2-1, faktory ovlivňující technologickou tvařitelnost [3]	- 13 -
Obrázek 2-2, pevné nástroje OP20, tažník	- 14 -
Obrázek 2-3, pevné nástroje OP20, tažnice	- 14 -
Obrázek 2-4, napět'ový stav během tažení duté nádoby [2]	- 14 -
Obrázek 2-5, typický sled operací	- 15 -
Obrázek 3-1, příklad trhliny.....	- 24 -
Obrázek 3-2, příklad zvlnění	- 24 -
Obrázek 3-3, příklad přetažené hrany.....	- 24 -
Obrázek 3-4, příklad lokálních propadlin	- 24 -
Obrázek 4-1, stanovení m , metoda A [19]	- 27 -
Obrázek 4-2, stanovení m , metoda B [19]	- 27 -
Obrázek 5-1, hustota sítě před výpočtem.....	- 29 -
Obrázek 5-2, hustota sítě po výpočtu.....	- 29 -
Obrázek 5-3, porovnání křivek zpevnění, AutoForm/Tata Steel [24]	- 31 -
Obrázek 5-4, výsledek numerické simulace, výpočet AutoForm/Tata Steel [24]	- 32 -
Obrázek 5-5, TriboForm: koeficient tření v závislosti na rychlosti a tlaku [25]	- 33 -
Obrázek 5-6, TriboForm, prezentace výsledků [25].....	- 33 -
Obrázek 6-1, Argus, princip měření [26].....	- 36 -
Obrázek 6-2, charakteristická napětí z hlediska tvářecí operace [3]	- 37 -
Obrázek 7-1, díl_1, Seat Ateca, páté dveře spodní.....	- 38 -
Obrázek 7-2, díl_2, Škoda Superb 3. generace, blatník.....	- 38 -
Obrázek 8-1, díl_1, simulace hlubokého tažení, stav 1	- 41 -
Obrázek 8-2, díl_1, simulace hlubokého tažení, stav 2	- 41 -
Obrázek 8-3, díl_1, simulace hlubokého tažení, stav 3	- 41 -
Obrázek 8-4, díl_1, simulace hlubokého tažení, stav 4	- 41 -
Obrázek 8-5, porovnání vytvořených simulací.....	- 42 -
Obrázek 8-6, díl_1, AutoForm, porovnání takt 4 + takt 14,7	- 43 -
Obrázek 8-7, díl_2, AutoForm, porovnání takt 5 + takt 12	- 44 -
Obrázek 9-1, díl_1, aplikace deformační sítě	- 46 -
Obrázek 9-2, díl_1, nanesené deformační sítě	- 46 -
Obrázek 9-3, díl_2, nástřih před lisováním.....	- 47 -

Obrázek 9-4, díl_2, výlisek po OP20.....	- 47 -
Obrázek 9-5, díl_2, vylisovaný díl s nanesenou deformační sítí	- 47 -
Obrázek 9-6, díl1, ARGUS, měření deformace.....	- 47 -
Obrázek 9-7, ARGUS,	- 47 -
Obrázek 9-8, ARGUS, ukázka sítě	- 48 -
Obrázek 9-9, ARGUS, srovnání výsledků vzorků č. 5 a č. 6 u dílu_2	- 48 -
Obrázek 9-10, díl_1, umístění deformačních sítí a měřených bodů	- 49 -
Obrázek 9-11, díl_1, SÍŤ 3, ARGUS, srovnání takt 4 + takt 14,7	- 50 -
Obrázek 9-12, díl_1, SÍŤ 1, ARGUS, srovnání takt 4 + takt 12,9 + takt 14,7	- 51 -
Obrázek 9-13, díl_1, SÍŤ 1, srovnání ARGUS, takt 4 (vlevo) + takt 14,7 (vpravo) .	- 51 -
Obrázek 9-14, díl_2, umístění deformačních sítí a měřených bodů	- 52 -
Obrázek 9-15, díl_3, SÍŤ 1, ARGUS, srovnání takt 5 + takt 12.....	- 53 -
Obrázek 10-1, díl_2, porovnání výsledků AutoForm a ARGUS, takt 5.....	- 56 -
Obrázek 10-2, díl_2, porovnání výsledků AutoForm a ARGUS, takt 12.....	- 56 -

Seznam tabulek

Tabulka 7-1, ČN EN 10152:2009, DC04, mechanické vlastnosti [33]	- 40 -
Tabulka 7-2, ČSN EN 10152:2009, DC04, chemické složení [33]	- 40 -
Tabulka 7-3, ČSN EN 10346:2009, HX220BD, mechanické vlastnosti [34]	- 40 -
Tabulka 7-4, ČSN EN 10346:2009, HX220BD, chemické složení [34]	- 40 -
Tabulka 8-1, díl_1, přepočet rychlosti posuvu příčnicku vůči lisovacímu taktu.....	- 42 -
Tabulka 8-2, díl_2, přepočet rychlosti posuvu příčnicku vůči lisovacímu taktu.....	- 44 -
Tabulka 9-1, díl_1, přehled vzorků a souvisejících lisovacích taktů.....	- 49 -
Tabulka 9-2, legenda k obrázkům v kapitolách 9.4.1 a 9.5.1	- 50 -
Tabulka 9-3, díl_2, přehled vzorků a souvisejících lisovacích taktů.....	- 52 -
Tabulka 10-1, díl_1, ARGUS, analýza deformace	- 54 -
Tabulka 10-2, díl_1, AutoForm, analýza deformace	- 54 -
Tabulka 10-3, díl_1, shrnutí výsledků	- 54 -
Tabulka 10-4, díl_1, ARGUS, analýza deformace	- 55 -
Tabulka 10-5, díl_1, AutoForm, analýza deformace	- 55 -
Tabulka 10-6, díl_2, shrnutí výsledků	- 55 -

Seznam příloh na CD

Legenda pro značení příloh

dx	díl č. x
sx	vzorek č. x
gx	síť č. x
major	hlavní deformace
minor	vedlejší deformace
thickness	redukce tloušťky
FLD	FLD diagram
Např. $d1 s2 g3 major$	<i>díl 1, vzorek 2, síť 3, hlavní deformace</i>

sim	Numerická simulace
SE	díl 1, páté dveře SEat Ateca
SK	díl 2, blatník ŠKoda Superb
SK_1	Bez citlivosti na rychlosti deformace Koeficient tření nezávislý na tlaku a rychlosti
SK_2	Citlivost na rychlosti deformace Koeficient tření nezávislý na tlaku a rychlosti
SK_3	Citlivost na rychlosti deformace Koeficient tření závislý na tlaku a rychlosti
g0	Hodnoceno v rámci celého dílu
Např. $Sim_SK_3 g1 FLD takt5$	<i>Díl 2, FLD diagram z numerické simulace pro síť 1, Citlivost na rychlosti deformace Koeficient tření závislý na tlaku a rychlosti Rychlost posuvu příčnicku odpovídá taktu 5</i>

d1	s1	g1	FLD
d1	s1	g1	major
d1	s1	g1	minor
d1	s1	g1	thickness
d1	s1	g3	FLD
d1	s1	g3	major
d1	s1	g3	minor
d1	s1	g3	thickness
d1	s2	g1	FLD
d1	s2	g1	major
d1	s2	g1	minor
d1	s2	g1	thickness
d1	s2	g3	FLD
d1	s2	g3	major
d1	s2	g3	minor
d1	s2	g3	thickness
d1	s3	g1	FLD
d1	s3	g1	major
d1	s3	g1	minor
d1	s3	g1	thickness
d1	s3	g2	FLD
d1	s3	g2	major
d1	s3	g2	minor
d1	s3	g2	thickness
d1	s3	g3	FLD
d1	s3	g3	major
d1	s3	g3	minor
d1	s3	g3	thickness
d1	s4	g1	FLD
d1	s4	g1	major
d1	s4	g1	minor
d1	s4	g1	thickness
d1	s4	g3	FLD
d1	s4	g3	major
d1	s4	g3	minor
d1	s4	g3	thickness
d1	s5	g1	FLD
d1	s5	g1	major
d1	s5	g1	minor
d1	s5	g1	thickness
d1	s5	g3	FLD
d1	s5	g3	major
d1	s5	g3	minor
d1	s5	g3	thickness

d2	s1	g1	FLD
d2	s1	g1	major
d2	s1	g1	minor
d2	s1	g1	thickness
d2	s2	g1	FLD
d2	s2	g1	major
d2	s2	g1	minor
d2	s2	g1	thickness
d2	s3	g1	FLD
d2	s3	g1	major
d2	s3	g1	minor
d2	s3	g1	thickness
d2	s4	g1	FLD
d2	s4	g1	major
d2	s4	g1	minor
d2	s4	g1	thickness
d2	s5	g1	FLD
d2	s5	g1	major
d2	s5	g1	minor
d2	s5	g1	thickness

sim	SE1	g0	FLD
sim	SE1	g1	FLD
sim	SE1	g2	FLD
sim	SE1	g3	FLD
sim	SE2	g0	FLD
sim	SE2	g0	FLD
sim	SE3	g0	FLD
sim	SE3	g0	FLD
sim	SK1	g0	FLD
sim	SK2	g0	FLD
sim	SK2	g0	FLD
sim	SK3	g0	FLD
sim	SK3	g0	FLD
sim	SK3	g1	FLD
sim	SK3	g1	FLD