

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní
Ústav strojírenské technologie

Porovnání výroby vylisku ocelového a hliníkového materiálu

Diplomová práce

Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

Vedoucí práce: **Ing. František Tatiček, Ph.D.**

Jiří Stejskal

Praha, 2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro Bc. Jiřího STEJSKALA

Program: Strojní inženýrství

Obor: Výrobní a materiálové inženýrství

Název: Porovnání výroby výlisku ocelového a hliníkového materiálu

Název anglicky: Comparison of the stamping processes steel and aluminum materials.

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky lisovacích procesů v automobilovém průmyslu
2. Popis technologie výroby výlisku, popis materiálů pro výlisky v automobilovém průmyslu
3. Návrh experimentu pro porovnání hlubokotažného procesu
4. Ověření výsledků experimentu a porovnání s výsledky z numerické simulace
5. Závěrečné zhodnocení

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

Konzultant: Ing. Tomáš Pačák

Datum zadání diplomové práce: 25. 4. 2016

Termín odevzdání diplomové práce: 12. 8. 2016

Neodevzdá-li student bakalářskou nebo diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské nebo diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou nebo diplomovou práci podruhé.

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

Zadání diplomové práce převzal dne: 3. 5. 2016

Student

Vedoucí ústavu



Děkan

V Praze

dne 24. 4. 2016

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závazný 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.

Datum: 10. 8. 2016

Podpis:

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Františku Tatíčkoví, Ph.D. za odborné vedení a připomínky k diplomové práci. Děkuji konzultantovi Ing. Tomášovi Pačákovi za náměty a připomínky k diplomové práci. Děkuji ŠKODA AUTO a.s. za zapůjčení lisovacího nástroje a za poskytnutí materiálu na výrobu vylisků.

Anotace

Jméno autora:	Bc. Jiří Stejskal
Název práce:	Porovnání výroby výlisku ocelového a hliníkového materiálu
Škola:	České vysoké učení technické v Praze Fakulta strojní
Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Školní rok:	2015/2016
Vedoucí DP:	Ing. František Tatíček, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Tomáš Pačák
Rozsah práce:	87 stran 65 obrázků 10 tabulek
Klíčová slova:	Tažení, automobilový výlisek, simulace tvářecího procesu, AutoForm, systém Argus.
Abstrakt:	Diplomová práce v teoretické části obsahuje popis procesů při výrobě výlisku v automobilovém průmyslu. Dále také technologii výroby výlisku a popis materiálů pro výrobu výlisku v automobilovém průmyslu. V praktické části je uvedeno porovnání výroby výlisku pro ocelový materiál HX 180 BD a hliníkovou slitinu AlMg ₃ . Porovnání výroby výlisku je jak za pomoci numerické simulace, tak experimentem na reálném zkušebním nástroji. Výsledky jsou porovnány vizuálně, pomocí křivek vtažení a systému Argus. Odchytky experimentu od simulací jsou komentovány v závěru.

Annotation

- Author's name:** Bc. Jiří Stejskal
- Name of thesis:** Comparison of the stamping processes steel and aluminium materials
- School:** Czech Technical University in Prague
Faculty of Mechanical Engineering
- Institute:** Institute of Manufacturing Technology
- School year:** 2015/2016
- Supervisor:** Ing. František Tatíček, Ph.D.
- Consultant:** Ing. Tomáš Pačák
- Scope of work:** 87 pages
65 pictures
10 tables
- Key words:** Stamping process, automotive compact, forming process simulation, AutoForm, system Argus.
- Abstract:** The diploma thesis in theoretical part contains a description of the processes in the production of stamping in the automotive industry. Furthermore, the technology of stamping, and description of materials for stamping in automotive industry. In the practical part is stated a comparison of stamping for steel material HX 180 BD and aluminum alloy AlMg₃. Comparison of stamping is both aid of numerical simulation and experiment on a real testing tool. Results are compared visually by drawing the curve and the system Argus. Deviations of experiment and the simulation are commented in conclusion.

Obsah

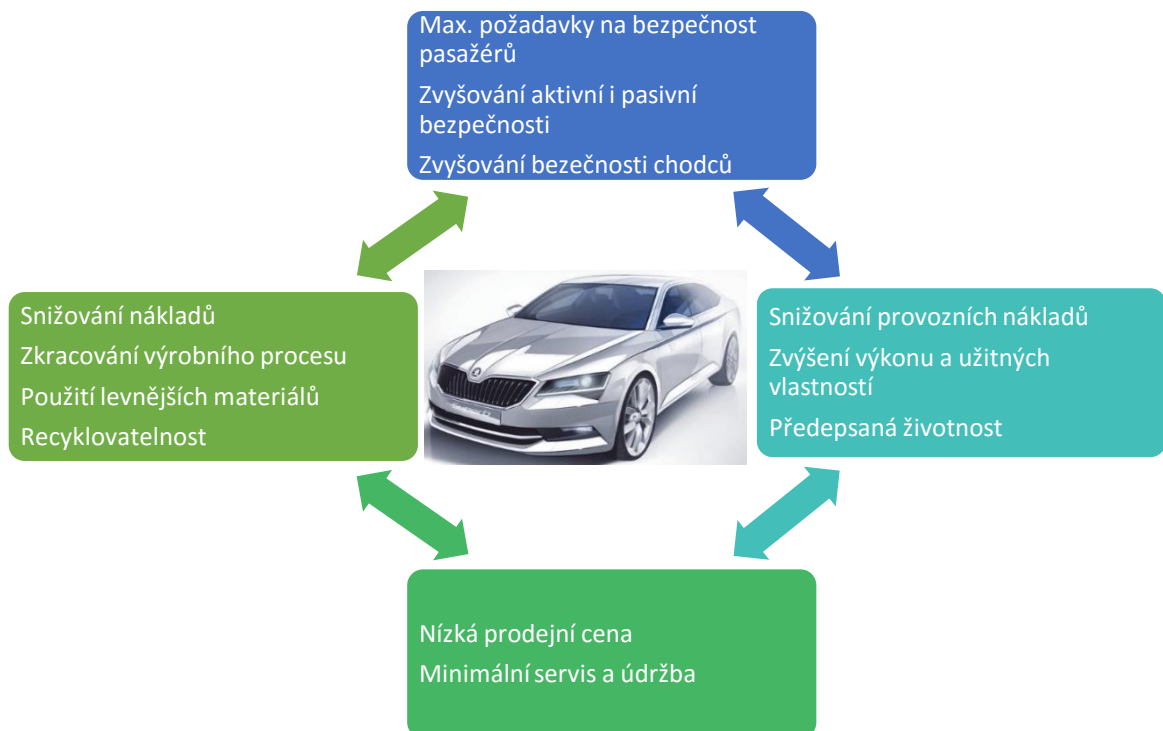
1	Úvod do diplomové práce.....	11
2	Technologie tváření.....	13
3	Dílčí technologie podílející se na lisovacím procesu	14
3.1	Technologie tažení	14
3.2	Technologie ohýbání	16
3.3	Technologie stříhání	17
4	Lisování výlisků nepravidelných tvarů	18
4.1	Stanovení metodického plánu	19
4.2	Určení počtu tažných operací	19
4.3	Určení výchozího přístřihu	20
4.3.1	Početní určení přístřihu pro pravoúhlý výtažek obdélníkového tvaru	21
4.3.2	Určení přístřihu pro složitější díly pomocí softwaru.....	22
4.4	Simulační software lisovacího procesu	22
4.4.1	Numerická metoda MKP	23
4.4.2	Simulační software AutoForm.....	25
4.5	Podmínky procesu.....	26
4.5.1	Konstrukční podmínky	26
4.5.2	Technologické podmínky	26
5	Nejběžnější vady výlisků.....	28
5.1	Ztenčení plechu, vznik trhlin	28
5.2	Zvlnění výtažku.....	29
5.3	Odpružení	29
6	Tvařitelnost při plošném tváření	31
6.1	Vliv materiálu na tvařitelnost	31
6.1.1	Součinitel plastické anizotropie	32
6.1.2	Exponent deformačního zpevnění n.....	33

6.1.3	Společné hodnocení r (R) a n	34
6.1.4	Poměr meze kluzu a meze pevnosti	34
7	Posouzení technologické tvařitelnosti plechů.....	36
7.1	Limitní diagramy.....	36
7.2	Analýza pomocí metody sítí	38
7.3	Vyhodnocovací optické systémy	39
7.3.1	Argus	39
8	Nejčastěji používané materiály na výlisky v automobilovém průmyslu.....	41
8.1	Oceli	41
8.1.1	Ocel použitá v experimentu - HX 180 BD	42
8.2	Hliníkové slitiny.....	43
8.2.1	Hliníková slitina použitá v experimentu - AlMg ₃	44
8.3	Polymery.....	44
8.4	Nekonvenční materiály.....	45
9	Návrh experimentu pro porovnání hlubokotažného procesu.....	46
9.1	Lis použitý pro experiment.....	46
9.2	Zkušební nástroj v 3 D datech	46
9.3	Popis zkušebního nástroje	50
9.4	Vstupní data simulací	51
9.4.1	Materiálová data.....	51
9.4.2	Procesní parametry simulace	53
9.5	Nanesení sítě na přístřih	53
10	Simulace a reálný experiment lisovacího procesu	54
10.1	Porovnání lisovatelnosti materiálu HX 180 BD a AlMg ₃	54
10.1.1	Analýza hlavní napětí (Major strain)	55
10.1.2	Analýza maximální deformace (Maximum failure).....	56
10.1.3	Analýza ztenčení (Thinning)	56

10.1.4	Analýza deformačního zpevnění (Hardening stress)	57
10.1.5	Odpružení v ose Z (Springback in Z dir.).....	58
10.1.6	Vtažení přístřihu (Draw-In)	59
10.1.7	Posouzení dle diagramu FLD	61
10.2	Porovnání lisovatelnosti materiálu AlMg ₃ při 50% a 100% dojezdu nástroje	62
10.2.1	Analýza hlavního napětí (Major strain).....	63
10.2.2	Analýza maximální deformace (Maximum failure).....	63
10.2.3	Analýza ztenčení (Thinning)	64
10.2.4	Posouzení dle diagramu FLD	65
10.3	Zhodnocení experimentu.....	66
11	Závěr.....	70
12	Seznam použitých informačních zdrojů	72
13	Seznam obrázků	75
14	Seznam tabulek	78
15	Rejstřík symbolů	79
16	Seznam příloh	81

1 Úvod do diplomové práce

Automobilový průmysl se snaží v posledních letech neustále inovovat své produkty a to nejen z vizuálních a výkonových charakteristik. V oblasti karoserie automobilu se zaměřuje i na vylepšení stávajících technologií a materiálů. Tyto inovace přináší většinou úspory jak provozní, tak finanční, při zachování bezpečnosti a spolehlivosti. Snížení hmotnosti automobilu vede k možnosti snížení výkonů osazovaných motorů, snížení spotřeby a také k celkovému snížení emisí.



Obr. 1 Požadavky na automobil [19], [31] (upraveno)

Existuje několik možných způsobů snižování hmotnosti karoserie. Dosud nejběžnější způsob je použití ocelového plechu a snižování jeho tloušťky, to však lze jen do určité mezní tloušťky (přibližně 0,6 mm), plech se během tvářecího procesu sníží dále až o 20 až 30 %. Nižší tloušťka ohýbaného materiálu také vede k nutnosti vytvářet na plechových dílcích ostřejší rádius, aby se zachovala tuhost dílce. Menší velikost rádia lze však volit pouze do určité míry, s menší velikostí rádia snadněji vznikají trhliny a praskliny. Dalším možným způsobem je použití sendvičových plechů (například ocel + plast), kde plastová část je umístěna mezi dvěma ocelovými, které jsou slabší tloušťky, tyto materiály jsou však stále předmětem vývoje. Nevýhodou tohoto provedení jsou možné problémy při spojování jednotlivých plechů (při svařování) a funkční problémy, kdy zejména plastová část podléhá stárnutí a může pak snadno

odolat mechanickým účinkům. Třetím možným způsobem je volba materiálu s nižší měrnou hmotností. Právě použití vhodného materiálu pro karoserii automobilu může snížit celkovou hmotnost, při zachování pevnostních charakteristik. Mezi nově používané materiály na stavbu karoserie v automobilovém průmyslu patří slitiny hliníku. Slitiny hliníku mají nízkou měrnou hmotnost (přibližně 2700 kg/m^3), vyšší korozní odolnost oproti ocelím, snadněji se recyklují. I použití hliníkových slitin má však své nevýhody. Hliník má menší velikost Youngova modulu pružnosti (materiál má větší zpětné odpružení), je obtížněji svařitelný oproti ocelím (nutnost používat speciální ochranné atmosféry), jeho cena na světových trzích neustále kolísá. Hlavní nevýhodou pro výrobu výlisků z hliníkových slitin je horší tvařitelnost oproti ocelím. Výše popsané problémy je nutno zohlednit při samotném lisovacím procesu a je nutné pro něj přizpůsobit parametry procesu.

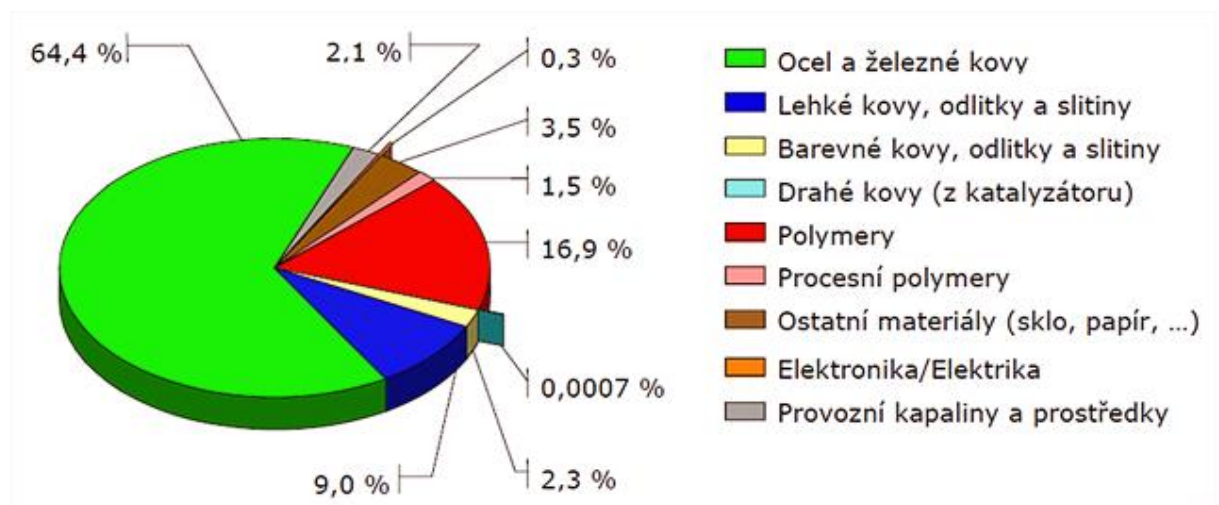
V automobilovém průmyslu je karoserie automobilu vyráběna kombinací technologií tažení, stříhání případně ohýbání. Při tomto procesu ovlivňuje samotný tažný lisovací proces několik parametrů, síla tažení, rychlost deformace, síla přidržovače, druh a množství maziva, konstrukce nástroje a také především vlastnosti materiálu. Právě rozdílné vlastnosti materiálů (popsané v předchozím odstavci) při stejných technologických podmínkách vedou k různým kvalitativním výsledkům. Může vznikat lokální ztenčení materiálu, trhliny, zvlnění a další vady. Proto je nutné, aby výrobce před zavedením výroby dílů z nových materiálů jednak provádět simulace pomocí vhodného softwaru, ale také provádět vlastní reálné testy na zkušebních přípravcích.

Diplomová práce se právě zabývá řešením výše popsaných problémů. Porovnává výsledky tažného procesu pro plech z ocelového a hliníkového materiálu používaného v automobilovém průmyslu. Toto porovnání je provedeno na stejném zkušebním nástroji v simulacích při stejných technologických podmínkách a jsou znázorněny rozdíly, které vzniknou. Při těchto parametrech je následně proveden i experiment na reálném nástroji pro ocelový plech a plech ze slitiny hliníku. Dále je doporučena případná optimalizace technologických podmínek pro oba materiály, tak aby bylo dosaženo co největší kvality výlisků.

2 Technologie tváření

Tváření kovů je jednou z technologií, která je známa lidstvem již nejméně 4 000 let a je neustále se rozvíjející technologií. Patří mezi technologie, při kterých se mění tvar polotovaru. Při samotném tváření se nemění polotovar pouze rozměrově, ale mění se i vnitřní mikrostruktura a mechanické vlastnosti [1].

Základní rozdělení tváření je na objemové a plošné. Rozdělení vychází z teorie, zda jednotlivé body tvářeného tělesa zůstanou v jedné a té samé rovině i po tváření, nebo se dostanou do roviny jiné [1].



Obr. 2 Materiálové složení vozu Škoda Octavia 1,9 TDi, 74 kW, 1363 kg, rok výroby od roku 2005 [27]

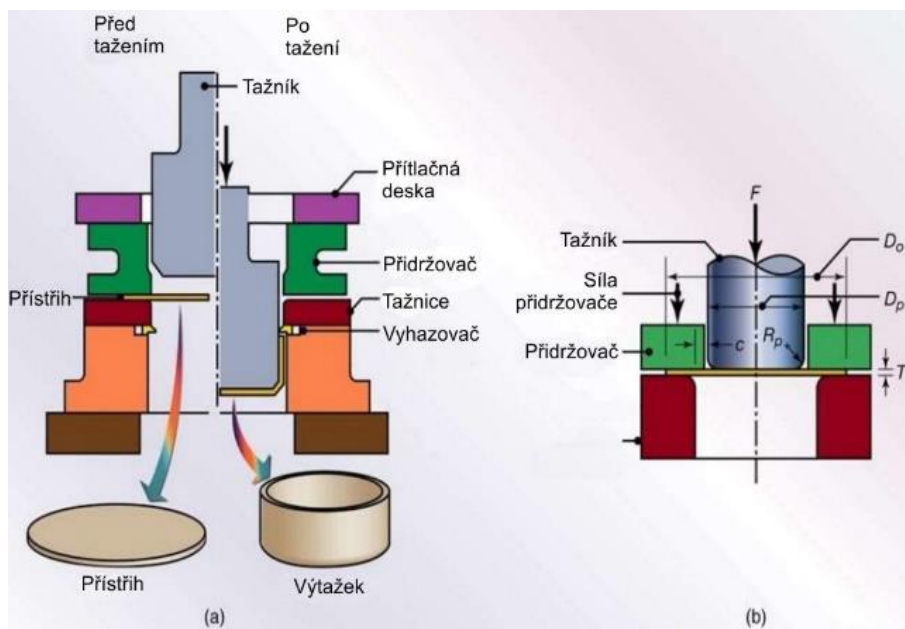
I když je nyní trendem snižování celkové hmotnosti automobilu a nahrazování oceli zastupitelnými materiály jako jsou lehké kovy a plasty, lze si všimnout z obr. 2, že ocel má stále převažující tendenci v použití u automobilů a ta je především používána na karoserii automobilu. Je však vytvářen tlak, aby se objem oceli na automobilu postupně snižoval a nahrazoval materiály s lepším poměrem hodnoty mechanických vlastností a hmotnosti.

3 Dílčí technologie podílející se na lisovacím procesu

Porovnání tažného lisovacího procesu pro ocelový a hliníkový materiál je záležitostí technologie plošného tváření – tažení plechů, ohýbání a stříhání, proto bude nadále v teoretické části práce věnováno místo těmto technologiím.

3.1 Technologie tažení

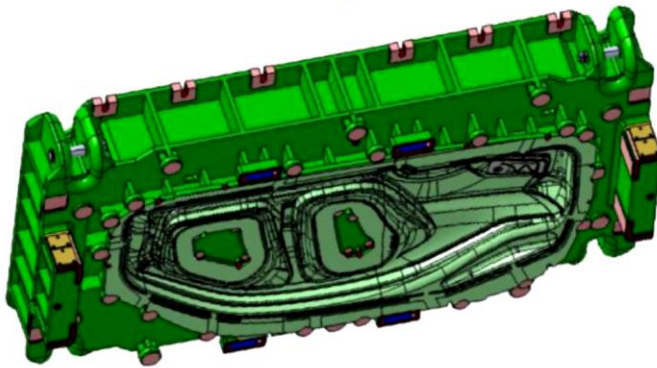
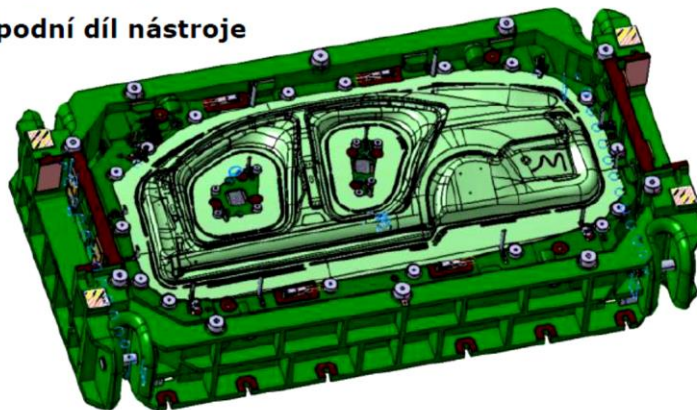
V technologii tažení je nástrojem tažidlo. Nástroje jsou tažník a tažnice (matrice), jejich pohyb není vždy pevně daný, v některých případech se pohybuje tažník oproti stojící tažnici, v automobilovém průmyslu je to však většinou naopak. Tvářený materiál může být přidržován přidržovacím systémem, tak aby nedošlo ke zvlnění materiálu. Produktem technologie tažení je výtažek. Na obrázku č. 3 je vysvětlen základní princip hlubokého tažení, v automobilovém



Obr. 3 Schéma jednoduchého tažení, základní pojmy [28] (upraveno)

průmyslu jde však většinou o kombinaci technologií plošného tváření. Při tažení plechů se nástřih tváří v jedné nebo několika operacích, tak aby vzniklo prostorové těleso. Tažením lze vyrábět výtažky rotačních tvarů, ale také výtažky rozmanitých

tvarů – hranatých a nesymetrických, výroba složitějších nepravidelných tvarů je zpravidla náročnější. Technologii lze dělit dále na několik dílčích technologií. Tažení výtažků s širokou přírubou, tažení stupňovitých součástí, tažení kuželových výtažků, tažení součástí sférických tvarů, tažení výtažků nerotačních tvarů, zpětné tažení, žlábkování, protahování, rozšiřování nebo zužování, tažení povrchově upravených plechů. Dále můžeme dělit na tažení mělké a hluboké, tažení se ztenčením stěny a bez ztenčení stěny, tažení s rozdílnou tloušťkou stěny a dna [1], [2], [3].

Matrice – horní díl nástroje**Spodní díl nástroje**

Obr. 4 Tahový nástroj pro vnější a vnitřní postranici automobilu [6]

technologicko – konstrukční podmínky, jako například volba vhodného materiálu, volba vhodného maziva a parametrů lisu, jen to zajistí nejvyšší kvalitu výsledného produktu [2], [4].

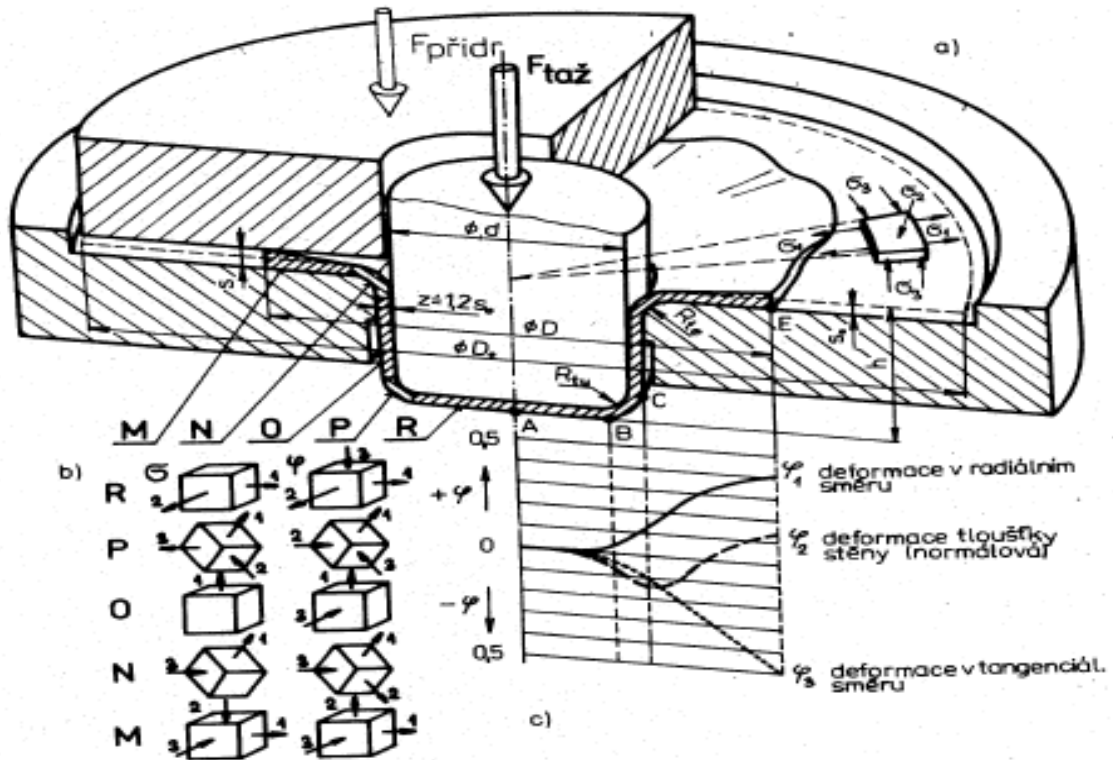
Napěťový stav

Při hlubokém tažení je trojosý napěťový a deformační stav často zjednodušován na dvojosý deformační stav. Napětí působící kolmo na tloušťku je zanedbáváno v důsledku velmi nízkých hodnot (1 až 3 MPa), ve srovnání s mezí kluzu. Deformace ve směru tloušťky stěny je zanedbávána, protože změna tloušťky se pohybuje v rozmezí $(0,97 \text{ až } 1,04)s_0$ [3].

Deformační stav se při rovinné deformaci, (je-li tloušťka plechu zanedbána) pohybuje od stavu tah – tlak. Pro hluboké tažení a vypínání jsou charakteristické dvě hlavní deformace tahové, tloušťka stěny se však nepatrně zmenšuje, tzn. třetí deformace je záporná. Vznikají i deformace tlakové, v místech kde se špatně vypíná materiál. Při pohledu na obrázku č. 6 můžeme vidět různé stavy napjatosti. U dna (označení R) se materiál deformuje nepatrně a rovnoměrně do dvou směrů se protahuje. U dna v zaoblení (označení P) je napjatost dvoj nebo trojosá. Tělo (označení O) je prodlužováno v jednom směru. U tažné hrany tažnice (označení N) je materiál namáhán ohybem radiálním a tangenciálním tlakem. Pod přidržovačem (označení M) je

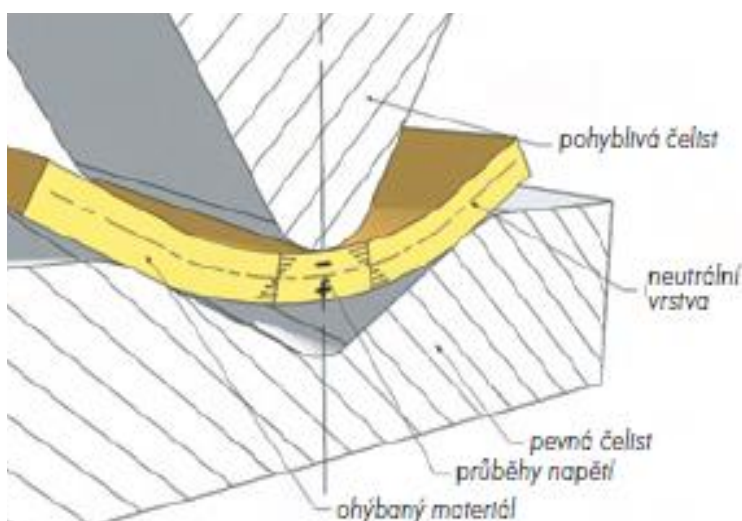
Pokud zatlačujeme tažník do tažnice, tažený plech se tře o tažnou hranu, která se z celého nástroje velmi rychle opotřebovává. Při tažení je nutno uvažovat mnoho dalších vlivů, jako například vliv tření, zpevnění materiálu. Dále je potřeba stanovit sílu potřebnou k tažení, jednak z hlediska volby stroje a také, aby nedošlo k porušení pevnosti válcové části nádoby. Je nutné nejen zvolit správnou dílčí technologii, ale i dodržet

materiál namáhán tlakem od přidržovače ve směru tloušťky plechu, tlakem v tangenciálním směru a tahem ve směru radiálním. Nejhorší podmínky jsou v místě dna výtažku, kde dochází k vysokému tahovému napětí, v jehož důsledku může dojít k zeslabování tloušťky stěny a následnému nebezpečí utržení dna výtažku [3], [4].



Obr. 5 Schéma rozložení napětí a deformace při prostém tažení [3]

3.2 Technologie ohýbání



Obr. 6 Princip ohýbání s vyznačeným napětím [33]

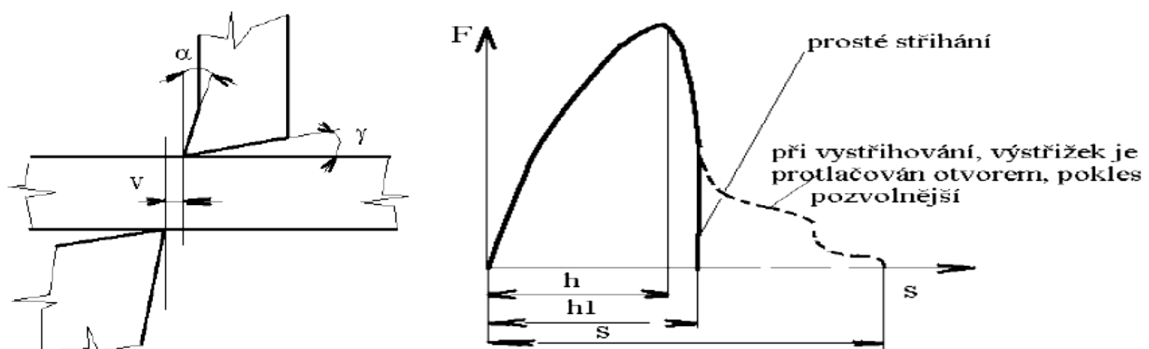
Ohýbání je technologický proces, při kterém se působením momentů vnějších sil dosahuje překročením meze kluzu požadované trvalé (plastické) deformace. Materiál je deformován do různého úhlu ohybu s různým zaoblením hran. Nástroje, kterými se ohýbá, jsou ohybník a ohybnice. Ve většině případech se ohýbá

za studena, za pomoci nástrojů a strojů k ohýbání. Materiály, které jsou tvrdé a křehké, lze ohýbat za tepla. Ohýbají se plechy, dráty a tyče různých tvarů průřezů [3], [4], [2].

Při návrhu ohybu se dále řeší odpružení, rozvinutá délka polotovaru, ohýbací síla a další, vzhledem k tomu že to není přímo předmětem práce, tak se tomuto problému nebudu více věnovat.

3.3 Technologie stříhání

Při stříhání se materiál odděluje za působení smykového napětí, vznikajícího působením hran střížného nástroje proti stříhanému materiálu. Kvalitu a přesnost střížné plochy ovlivňuje několik faktorů: velikost střížné mezery, vlastnosti stříhaného materiálu, způsob stříhání, kvalita lisu a střížného nástroje. Při stříhání je důležité, aby nevznikal široký pás deformace (široký pás utržení) to znamená nekvalitní střížná plocha, je možné různými úpravami střížného nástroje a volbou způsobu stříhání ovlivnit průběh operace. Úpravy střížného nástroje se používají především u technologie přesného stříhání [3], [2].

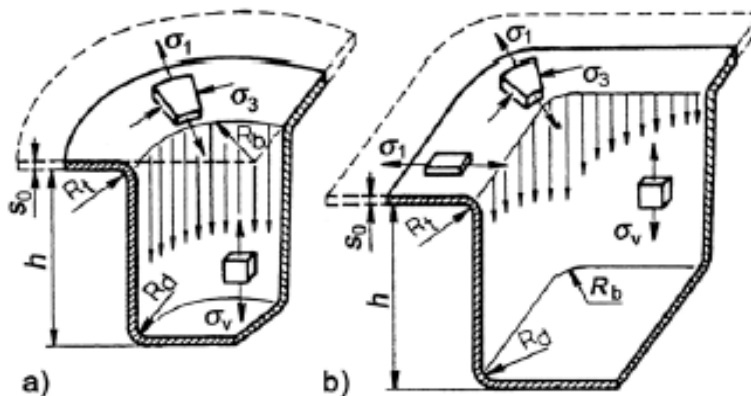


Obr. 7 Schéma stříhání s rovnoběžnými noži a závislost síly na tloušťce materiálu [3]

Vzhledem k tomu, že technologie stříhání není přímo předmětem práce, nebudu tuto kapitulu dále rozvádět.

4 Lisování výlisků nepravidelných tvarů

Lisování tvarů čtvercových, obdélníkových nebo nepravidelných tvarů je podstatně složitější (je zde rozdílný stav napjatosti v rohovém zaoblení a ve svislých stěnách), například v návrhu brzdící drážky, v porovnání s tažením rotačních tvarů a také jsou při něm podstatně jiné technologické podmínky.



Obr. 8 Rozbor napětí při tažení válcového a čtyřhranného výtažku [2]

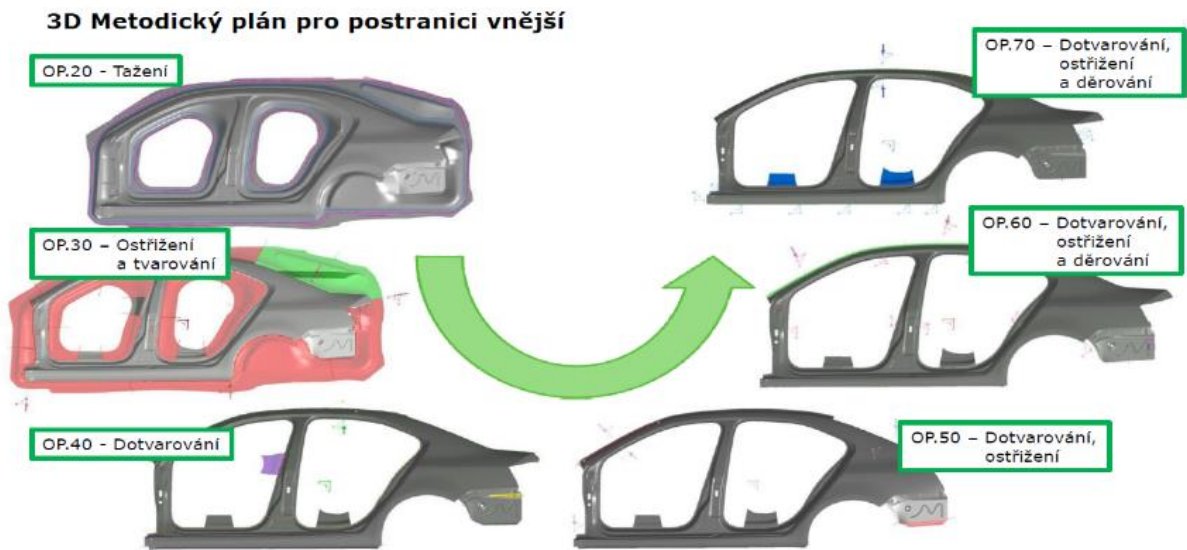
U čtyřhranných výlisků existují při tažení dvě pásma rozdílné napjatosti – pásmo rohové a pásmo rovné. Oproti tažení válcových nádob je tažení čtyřhranných výtažků méně náchylné na zvlnění v přírubové části, protože jsou menší tečná napětí v přírubě. Existuje nižší deformace

Existuje nižší deformace v oblasti rohů oproti tažení válcových výtažků stejných rozměrů, nižší součinitel tažení v prvním tahu při tažení čtyřhranných výtažků [2], [5].

V automobilovém průmyslu je výsledný tvar výlisku tvořen kombinací různých především nepravidelných tvarů, proto je zapotřebí nejdříve posoudit lisovatelnost dílce a při návrhu metodického plánu využít bohatých zkušeností a především simulačního softwaru.

Proces výroby karosářských dílů v automobilovém průmyslu je realizován na postupových lisech. V tomto případě se tažení provádí většinou v první operaci a v dalších operacích je provedeno dotvarování a ostřížení přebytečného materiálu.

4.1 Stanovení metodického plánu



Obr. 9 3D Metodický plán pro postranici vnější [6]

Obsahem metodického plánu je návrh tvářecích technologií a jednotlivých podoperací v dané operaci. Při sestavování metodického plánu se především využívá předchozích zkušeností z předchozích projektů (u podobných dílů se mění podstatně jen tvary a případně ostríhy) a numerických simulací, které odhalí případné nedostatky před výrobou tvářecího nástroje a zkušebního procesu.

Metodický plán lisování dílu se skládá z:

- stanovení počtu operací;
- obsah jednotlivých operací (tažení, ostríhování, tvarování, děrování);
- stanovení a analýza střížných dílů;
- určení geometrie technologických ploch proti rozpružení dílu,
- zajištění vstupních dat pro konstrukci nástrojů,
- zhotovení vstupních dat pro obrábění činných ploch jednotlivých operací [6].

4.2 Určení počtu tažných operací

Při tažení nerotačních výtažků se velmi obtížně určuje počet tažných operací. Určení počtu tažných operací vychází především z tvaru a složitosti výtažku. Nejprve se musí stanovit, jakých deformací lze maximálně dosáhnout v jednotlivých tazích a poté stanovit počet tahů. Při určování počtu tažných operací má vliv mnoho parametrů na proces tažení, např. tloušťka použitého plechu, druh použitého plechu, velikost zaoblení v rozích, poměr velikostí zaoblení,

velikost výtažku, velikost zaoblení u dna výtažku, šířka příruby výtažku, tvar přístřihu, konstrukce, provedení tažidla, tažná rychlost, druh maziva, upnutí nástroje na lisu [2], [7].

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, karosérie automobilu se vyrábějí většinou na jednu tažnou operaci a další následné operace jako stříh a dotvarování. Je vhodné volit materiál s výhodným poměrem tloušťky přístřihu k šířce přístřihu, tak aby v těchto případech bylo snadné dosáhnout požadovaného tvaru tažením prioritně v jedné operaci. Pro vnější a některé vnitřní díly se používají se hlubokotažné materiály.

Součinitel tažení

Hodnota součinitele tažení určuje počet tažných operací. Hlubokotažnost materiálu ovlivňuje normálová anizotropie. Čím vyšší hodnota \bar{r} , tím se snižuje součinitel tažení [7].

Kritický součinitel tažení:

$$m_{kr} = 0,71 \sqrt{\frac{R_B}{h_{kr}}} \quad [-], [7].$$

Skutečný součinitel tažení:

$$m_{skut} = 0,71 \sqrt{\frac{R_B}{h_{vyt}}} \quad [-], [7].$$

Pokud $m_{skut} \succ m_{kr}$, stačí 1 tažná operace [7].

4.3 Určení výchozího přístřihu

Rozměr a tvar přístřihu materiálu je důležitý z několika hledisek. Nevhodně zvolený tvar přístřihu a jeho rozměr může negativně ovlivnit tvářecí proces (mohou vznikat vlny, může přebývat materiál nebo chybět materiál) a to se projeví jak v technologii výroby (vznikají problémy), tak v ekonomické stránce výroby (přebytečné náklady).

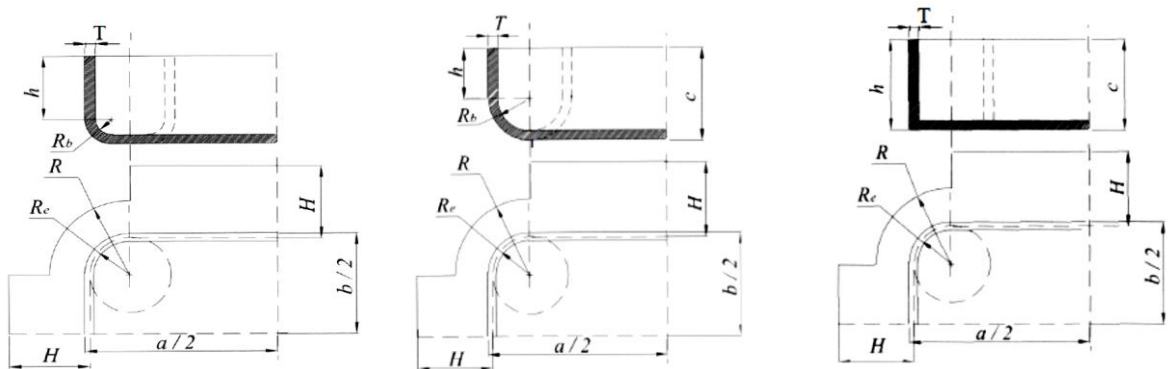
Určení výchozího tvaru přístřihu:

- určení vhodného polotovaru dle předchozích zkušeností;
- určení polotovaru graficky;
- určení vhodného polotovaru početně;
- určení polotovaru pomocí softwaru.

Při určování polotovaru na základě zkušeností v metodickém plánování se místa kde bude roh výtazku, zkosí a zaoblí, v těchto místech se ponechá více materiálu než by bylo potřeba. Po tažení se následně přebytečný materiál odstříhne. V těchto místech může však docházet k trhání materiálu, přičemž je okraj výtazku nepravidelný, důvodem je větší plocha plechu pod přidržovačem [2].

4.3.1 Početní určení přístřihu pro pravoúhlý výtazek obdélníkového tvaru

Jsou tři možné varianty navrhování, které jsou dány závislostí mezi R_b a R_e .



Obr. 10 Poloměr zaoblění rohů pro situace a), b), c) [8] (upraveno)

- a) Pokud je $R_b < R_e$, pak je poloměr zaoblění rohů přístřihu R dán následujícím vztahem

$$R = \sqrt{R_e^2 + 2R_e(h - 0,47R_b)} \text{ [mm]}, [8].$$

- b) Pokud $R_b = R_e$, pak je poloměr zaoblění rohů přístřihu R dán následujícím vztahem

$$R = \sqrt{2R_b h} = \sqrt{dh} \text{ [mm]}, [8].$$

- c) Pokud $R_b = 0$, pak je poloměr rohových zaoblění přístřihu R dán následujícím vztahem

$$R = \sqrt{R_e^2 + 2R_e c} \text{ [mm]}, [8].$$

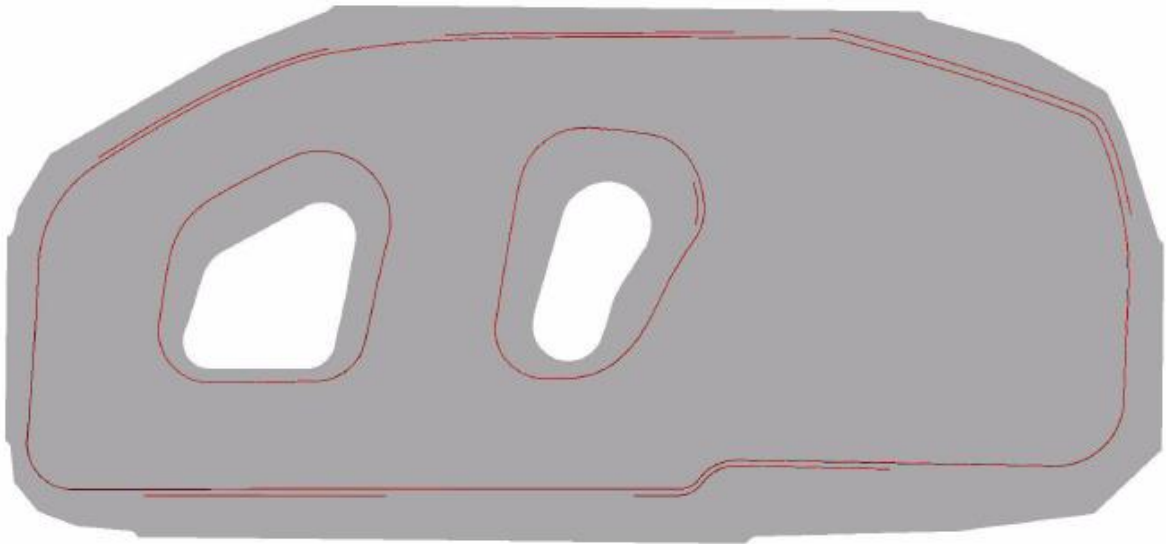
Pro všechny tři případy platí, že střed radiusu R a R_e je stejný.

Pro kalkulaci výšky rozvinutého boku H platí vztah:

$$H = h + 0,57R_b \text{ [mm]}, [8].$$

4.3.2 Určení přístřihu pro složitější díly pomocí softwaru

Předchozí uvedené výpočetní metody jsou vhodné spíše pro výtažky jednodušších tvarů. Při navrhování přístřihu pro složité automobilové díly se využívá předchozích zkušeností a dále se upravuje na základě vtažení přístřihu nástroji postupnými iteracemi. Dále lze provádět optimalizační korekce, přidávat různá tvarová před-střihnutí, upravovat vnější tvary. Tyto korekce se většinou provádějí až po prvních neúspěšných simulacích.



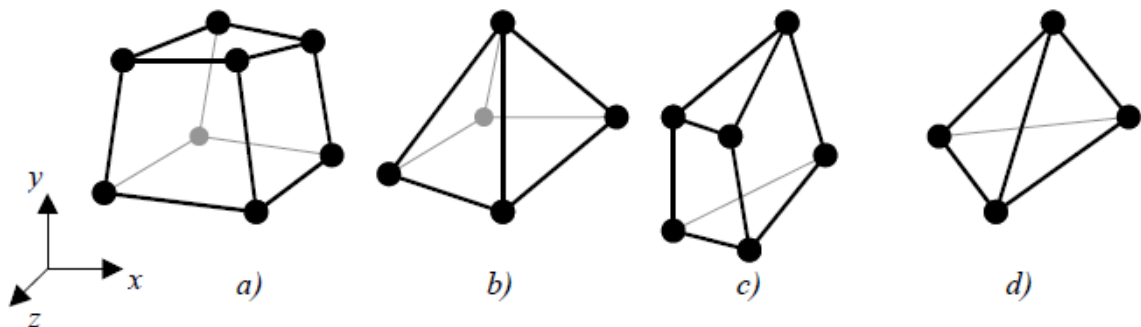
Obr. 11 Tvar přístřihu pro bočnici automobilu [6]

4.4 Simulační software lisovacího procesu

Především v automobilovém průmyslu, kde je proces tváření velice složitou záležitostí je nutností simulační software používat. Příkladem může být lisování postranice automobilu, u těchto rozmanitých tvarů lze těžko odhadnout, jak bude probíhat samotný proces tažení, zda se při určitých procesních podmínkách nebudou objevovat určité vady, jaký je potřeba přístřih, jaký má být tvar brzdící drážky atd. Řešení pomocí numerické simulace dokáže na základě vstupních dat nejen ušetřit spoustu času, ale i finančních prostředků, protože umožní velmi přesně odhadnout reálnou situaci a předejít tedy dodatečným úpravám lisovacího nástroje nebo přímo znehodnocení nástroje. Konstruktor musí zadat vstupní podmínky (mazání, síla přidržovače, druh a tvar materiálu a další), na základě kterých provede software pomocí metody konečných prvků simulační výpočet. U simulačních softwarů tohoto typu je nutné mít 3D geometrii dílu ve standartním formátu některého z modelovacích softwarů.

4.4.1 Numerická metoda MKP

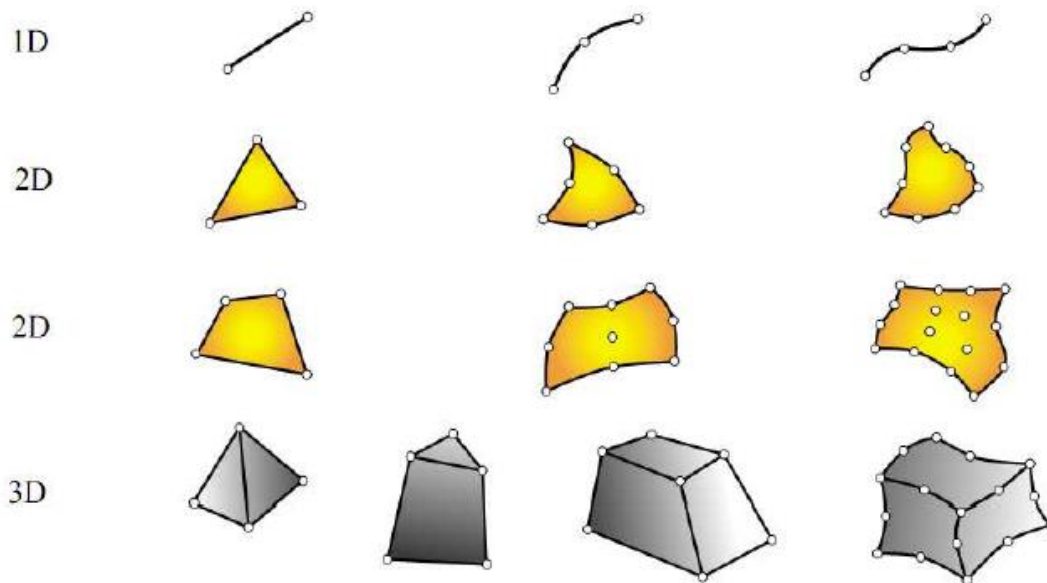
Metodou konečných prvků lze řešit numerickou metodou simulace pro průběh napětí, deformací, vlastních frekvencí, proudění tepla, jevů elektromagnetismu, proudění tekutin a dalších na vytvořeném fyzikálním modelu. Principem je rozdělení řešené části na konečný počet prvků. Na tělese je třeba vytvořit síť konečného počtu prvků. Každý typ prvku má svoji dimenzi, tvar a polohu jeho uzlů. V uzlových bodech hledáme neznámé parametry řešení (posuvy, natočení a další) z nichž počítáme například napětí, deformaci. Hustota a typ sítě ovlivňuje do velké míry kvalitu výsledků, ale také potřebnou kapacitu pro řešení (čím více prvků, tím větší potřebná kapacita pro řešení). Nejdůležitějším krokem při MKP metodě je správné zasítování prvků [9], [10].



Obr. 12 Tvar prvků sítě pro MKP [9]

Postup při řešení MKP analýzou:

1. Získání CAD modelu
2. Diskretizace modelu (nahrazení objemu modelu konečným počtem prvků)
3. V každém bodě získáme 3 rovnice, které určují posuvy do jednotlivých směrů (x , y , z), spočítáme pole deformací (6 rovnic) a pole napětí (6 rovnic)
4. Nahrazení a vyjádření funkce posuvů polynomem
5. Určení okrajových podmínek
6. Výpočet soustavy lineárních algebraických rovnic
7. Výpočet napětí, deformací v jednotlivých uzlových bodech
8. Grafické zobrazení modelu (vizualizace napětí, deformací a dalších zkoumaných parametrů) a výpis dalších důležitých metod [10].



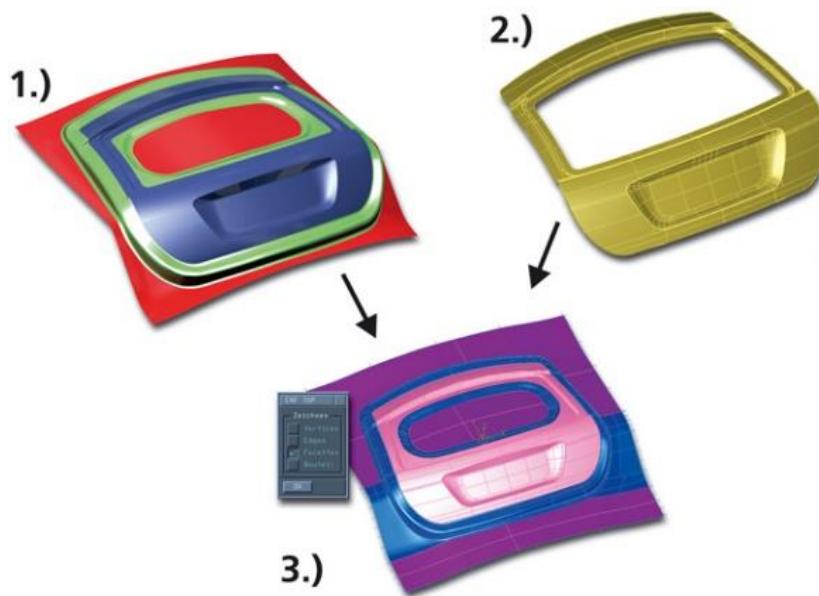
Obr. 13 Druhy elementů používaných při MKP [10]

Druhy elementů používaných při MKP:

- liniové elementy – stavebním elementem sítě je úsečka, využití pro řešení nosníku;
- plošné elementy – stavebním elementem sítě je membrána nebo skořepina, pro řešení plošných výpočtů (plošné tváření tenkých plechů);
- objemové prvky – stavebním elementem sítě je 3 D prvek typu SOLID, pro objemové tváření a plošné tváření větších tlouštěk [10].

4.4.2 Simulační software AutoForm

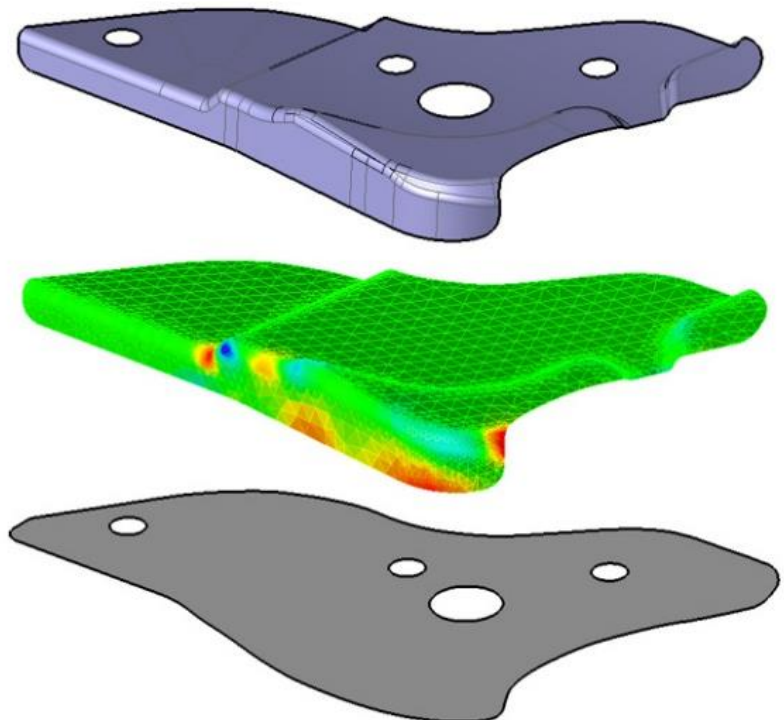
AutoForm patří mezi jedny z nejpoužívanějších simulačních softwarů pro plošné tváření (mezi další celosvětově užívaný software patří PAM-STAMP), AutoForm je také používán v mnoha automobilech (Audi, Volkswagen) mezi nimi je i ŠKODA AUTO a.s., Mladá Boleslav.



Obr. 14 3.) vygenerovaný povrch, 2.) 3D originální 3D model 1.) model formy (matrice) [12]

Dokáže provést v rámci simulace zobrazení několika jevů vyskytujících se při lisování jako přidržení, tažení, odstřížení, kalibraci, odpružení a další. Výsledkem je vyhodnocení několika parametrů v rámci simulace jako hodnocení hlavního napětí, vedlejšího napětí, ztenčení, odpružení, maximální deformace a dalších vad [10] [11].

AutoForm jako software má několik vnitřních implementací, které řeší mimo vlastní lisovací proces i například návrh nástroje – AutoForm-DieDesigner^{plus}, kompenzaci lisovacího nástroje z hlediska zpětného odpružení – AutoForm-Compensator^{plus}, odhad nákladů na lisovací nástroje - AutoForm-CostEstimator^{plus} a další velmi zajímavé nástroje. Implementace AutoForm-Solver^{plus} je



Obr. 15 Přístřih, simulační model a reálný model výrobku [12]

použitelná pro rychlou simulaci tažného procesu a dalších následných operací, dokáže vyhodnotit i zpětné odpružení. Simulace lisovacího procesu pomocí AutoForm-Solver^{plus} kombinuje výsledky získané z AutoForm-ProcessExplorer^{plus} a poskytuje uživateli všechny nezbytné informace k přípravě procesu. AutoForm-Solver^{plus} simuluje celý průběh progresivního lisovacího nástroje a stejně dobře i procesy lemovací. Vysoká rychlost řešení oproti jiným software (moderní inkrementální řešič) tohoto nástroje poskytuje dostatečný prostor pro optimalizaci nástroje nebo procesu [11], [12].

4.5 Podmínky procesu

4.5.1 Konstrukční podmínky

Konstrukční podmínky výlisku musí především dodržet konstruktér nebo designér dílce. Je však nutná vzájemná komunikace mezi konstruktérem nástrojů a designérem dílce, tak aby se předešlo nevyrobitelnosti nebo dalším technologickým operacím, což prodražuje vyráběný díl. Ve většině případů má hlavní prioritu konstruktér, jen v ojedinělých případech se zpětně zasahuje do designu dílu.

Pro zhotovení výtažku bez vady je nutno dodržovat následující zásady:

- snažit se konstruovat výtažek s co nejmenší výškou;
- pokud možno tak upřednostnit výtažek rotačního tvaru s rovným dnem;
- u hranatých výtažků rohy zaoblit;
- nepoužívat příruby na výtažku, pouze jen v nevyhnutelných případech;
- navrhovat rozměry, tak aby se výtažky nemusely kalibrovat;
- volit materiály s vhodnou tažností a zásobou plasticity [4].

4.5.2 Technologické podmínky

Z hlediska vhodných procesních podmínek je vhodné snižovat tření mezi tažnicí a taženým materiálem (v důsledku nižší tažné síly a opotřebení tažnice), také mezi přídržovačem a materiálem (tak, aby docházelo k rovnoměrnému posunu materiálu), to se provádí za pomoci vhodných mazacích prostředků. Naopak v kontaktu tažníku a materiálu je vhodné tření co nejvyšší [4].

Vlastnosti prostředků pro mazání:

- mít dobrou přilnavost,
- nesmí poškozovat povrch nástroje,
- vytvářet rovnoměrnou vrstvu [4].

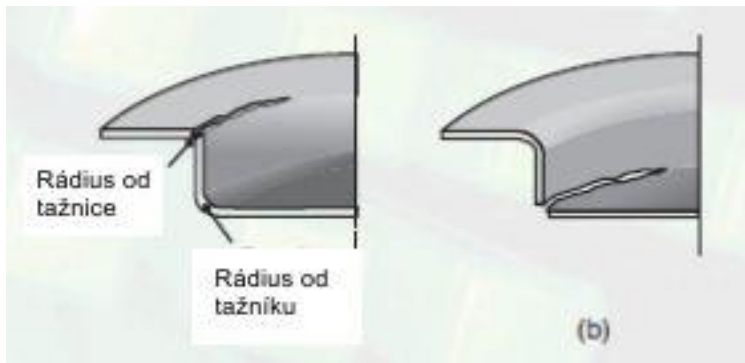
Tab. 1 Mazací prostředky pro technologii tažení [8] (upraveno)

Tažený materiál	Mazivo
<p>Ocel – uhlíková a nízkolegovaná</p>	<p>Lehké operace: minerální olej - střední až vysoká viskozita, mýdlové roztoky, mastný olej, minerální olej, emulze, lanolin.</p> <p>Střední operace: mastný olej v emulzi na bázi mýdla, mastný olej + minerální olej, mýdlo + vosk, suchý mýdlový film.</p> <p>Těžké operace: vysušené mýdlo nebo vysušený voskový film, sulfidové nebo fosfátové povlaky + emulze s jemnými plnivými.</p>
<p>Hliník a hliníkové slitiny</p>	<p>Lehké operace: Minerální olej, mastné oleje v minerálních olejích, Loje a parafín, sířené mastné oleje.</p> <p>Těžké operace: Sušený mýdlový nebo voskový film, minerální olej nebo mastný olej.</p>

5 Nejběžnější vady výlisků

Lisování je velmi složitý proces, který je ovlivňován několika faktory v souboru označovaných jako okrajové podmínky výrobního pochodu. Patří do něj vliv materiálu výrobku, jeho jakost a tloušťka, třecí podmínky, kinematika tvářecího stroje, konstrukce nástroje a další. Při nedodržení těchto procesních podmínek mohou vznikat vady. Tyto vady lze členit do dvou skupin. V první jsou vady, které vedou k porušení stability (ztenčení materiálu, iniciace makroskopických trhlin, zvlnění, přeložky). Do druhé patří geometrické vady (například odpružení, designové vady – propady materiálu, které po nalakování dílce jsou více viditelné, přetahy hran – je vidět poškrábaná část materiálu.) [13].

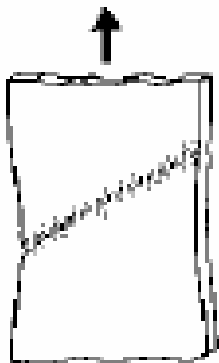
5.1 Ztenčení plechu, vznik trhlin



Obr. 16 Prasklina v nejnámáhanějších místech výtažku [26] (upraveno)

Jak již je popsáno v kapitole 3.1, nejhorší podmínky z hlediska tahového napětí, nastávají v místě dna výtažku, proto zde většinou dochází k utržení dna. Ztenčení plechu a v jeho důsledku vznik trhlin a prasklin může vznikat

jednak při špatných technologických podmínkách a také například při vyčerpání plasticity materiálu. Mezi technologické podmínky, které ovlivňují přímo možné ztenčení stěny, patří: síla přidržovače, mazání, rychlost deformace, hloubka tahu.

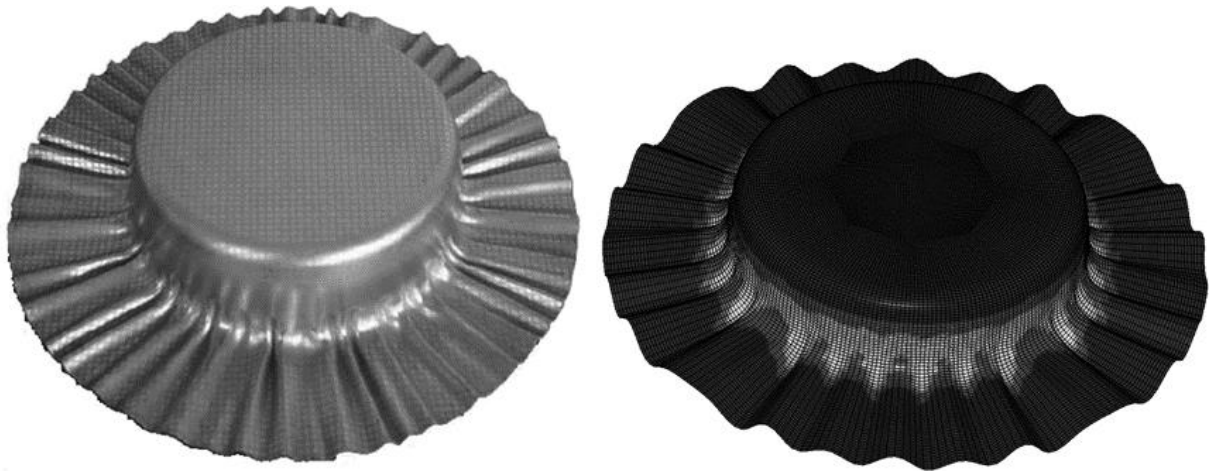


Obr. 17 Vznik lokalizovaného krčku [14]

Trhliny vznikají tak, že při značném namáhání nejdříve vznikne zúžení plechu tzv. krček. Při tažení plechů je materiál značně namáhán, stav napjatosti je zde $\alpha = \sigma_2 / \sigma_1$ a nabývá hodnot od 0 do 1. Porušení přichází po vzniku ostře lokalizovaného krčku. Lokalizovaný krček není krček difuzní, je mezi difuzní nestability. Krček difuzní je rozsáhlejší a délkově je větší než šířka vzorku. Lokální krček se vyskytuje pod úhlem Θ k ose síly, jeho šířka je b přibližně odpovídající tloušťce t plechu, do okamžiku porušení už lze dosáhnout pouze omezené deformace [14].

5.2 Zvlnění výtažku

Vznik vln je dán funkcí několika jevů: přidržovací silou, tvarovou složitostí nástřihu a jeho rozměrů, rozměry a tvarem nástrojů, mazáním. Tendence ke vzniku vln vede, pokud se sníží radiální napětí, tedy pokud: se zvětší tažný poloměr, sníží se tření, sníží se průměr polotovaru, sníží se přidržovací síla. Příznivá je větší tloušťka materiálu a nižší stupeň deformace, vlny jsou nízké a jsou vyhlazeny otvorem tažnice. Použitím přidržovače lze snadno zabránit vzniku vln, avšak za důsledku pěchování materiálu pod ním. Pokud obvodové tlakové napětí σ_t a radiální tažné napětí σ_r přestoupí kritickou hodnotu, vede to ke ztrátě stability a vzniku vln [3], [4], [14].



Obr. 18 Zvlnění na kruhových výtažcích reálné a v simulaci [30] (upraveno)

Dále závisí na relativních rozměrech polotovaru. V praxi se obecně používají analyticky stanovené podmínky ztráty stability podle Geklera a Seniora. Dále se mohou stanovovat empiricky a příručky tažení, nebo pomocí simulačních systémů metody konečných prvků [3].

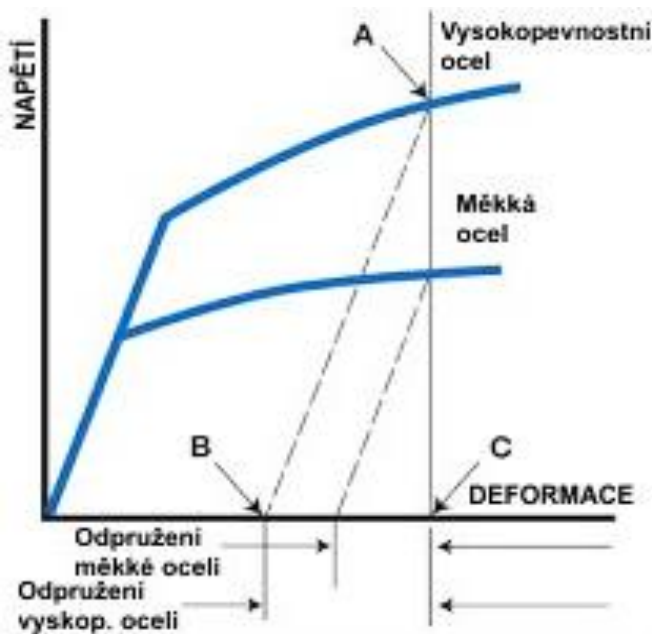


Obr. 19 Zvlnění na dveřích automobilu (vyznačeno červeně) [29] (upraveno)

5.3 Odpružení

Odpružení je nežádoucí stav, který se projevuje dodatečnou deformací výlisku (návrat materiálu směrem k původnímu tvaru), vzniká v důsledku relaxace napětí po odlehčení výlisku tvářecím nástrojem. Vyšší hodnoty dodatečné deformace jsou nežádoucí, proto se jej snažíme co nejvíce eliminovat. Odpružení je funkcí několika faktorů. Nejvíce závisí na volbě materiálu a to jak z hlediska druhu (materiály s nižším modulem pružnosti odpruží více, než materiály s vyšším modulem pružnosti), tak z hlediska pevnosti (vysokopevnostní ocel odpruží

více, než ocel měkká). Dále závisí na tloušťce materiálu (čím nižší, tím materiál více odpruží), tažné mezeře a tažném poloměru, stupni zpevnění materiálu (čím vyšší, tím nižší odpružení), konstrukčním řešením nástroje, tvarové složitosti součásti, rozložení zbytkových napětí a dalších faktorech [14], [13].



Obr. 20 Odpružení v závislosti na pevnosti materiálu [32]

Druhy odpružení při plošném tváření:

- úhlová změna;
- natočení boční stěny;
- natočení;
- zkřivení hrany;
- zkřivení povrchu;
- celkovou změnu tvaru [13].

6 Tvařitelnost při plošném tváření

Mezi významné charakteristiky z hlediska hlubokotažnosti patří součinitel normálové anizotropie, dalšími ukazateli jsou pak exponent zpevnění n a poměr meze kluzu k mezi pevnosti R_e/R_m . Při tak složité operaci jako je tažení, vzhledem k různým stavům napjatosti a deformacím, kterým podléhá plech, není možné vyjádřit tvařitelnost plechu jedním univerzálním ukazatelem. Aplikace výsledků ze zkoušky tahem na tažení výtažků nepravidelných tvarů je velmi problematická, při tažení nepravidelných výtažků vznikají totiž odlišné deformace. Vyskytují se jak tahová napětí, tak tlaková. Uplatňují se všechna schémata plošného tváření, je vhodné tedy použít pro napěťový stav +/- součinitel plastické anizotropie \bar{r} , pro stav ++ exponent deformačního zpevnění n . Vliv exponentu deformačního zpevnění se uplatňuje až při dosažení určité deformace, naopak vliv normálové anizotropie je uplatněn v počátečních fázích procesu [2], [3], [14].

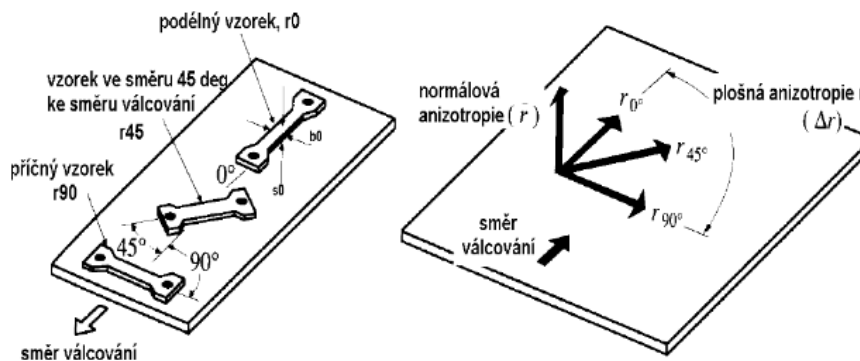
6.1 Vliv materiálu na tvařitelnost

Tvařitelnost plechu ovlivňují základní materiálové faktory, chemické složení, mikrostruktura a textura materiálu. V závislosti na chemickém složení, technologickém postupu válcování, tepelném zpracování a krystalografické struktuře se mění vlastnosti materiálu, tyto vlastnosti však nejsou v celém objemu materiálu stejné, viz další kapitola [14], [2].

Z hlediska materiálu o tvařitelnosti rozhoduje:

- chemické složení a jeho místní nestejnorodosti;
- vměstky – složení, tvar, objem a rozmístění;
- přednostní krystalografická struktura;
- rozměr zrn a poloha jejich hranic;
- rozložení poruch mřížky [14].

6.1.1 Součinitel plastické anizotropie



Obr. 21 Umístění vzorků v závislosti na směru válcování, směry anizotropie [14]

Součinitel plastické anizotropie je charakterizován jako nestálost mechanických a fyzikálních vlastností v různých směrech materiálu. Ta pak přímo ovlivňuje tvařitelnost materiálu. Rozlišujeme plošnou anizotropii (zkoumají se vlastnosti v rovině plechu) a normálovou anizotropií (vlastnosti ve směru tloušťky plechu) [14], [2].

Anizotropní vlastnosti plechu vznikají, protože atomy mají od sebe rozdílné vzdálenosti v různých krystalografických rovinách. Anizotropie materiálu je pro technologii tváření důležitá zejména z hlediska anizotropie mechanických a plastických vlastností [14].

Plošná anizotropie

Mechanické a fyzikální vlastnosti jsou závislé na směru válcování v rovině plechu. Plošná anizotropie se vyskytuje při výrobě plechů za různých metalurgických podmínek, v důsledku strukturální a krystalografické textury. Je nutné provádět tahovou zkoušku z odebraných vzorků ve třech směrech (podélný vzorek, příčný vzorek, vzorek ve směru 45° ke směru válcování), protože v každém směru je jiná krystalografická textura [14], [2].

Hodnota plošné anizotropie mechanických vlastností:

$$A_{Rp0,2} = \frac{R_p 0,2(\alpha^\circ) - R_p 0,2(0^\circ)}{R_p 0,2(0^\circ)} \quad [-], [2].$$

Normálová anizotropie

Určuje nerovnoměrnosti mechanických vlastností v rovině plechu, vzhledem k mechanickým vlastnostem ve směru kolmém k rovině plechu, tzn. ve směru tloušťky. Hodnota normálové anizotropie ukazuje odolnost plechu vůči jeho ztenčení. Plech je vhodnější k tažení, čím je hodnota normálové anizotropie vyšší. Jako v předchozím případě se zjišťuje pro směry tažení 0°, 45° a 90° [2].

Velikost normálové anizotropie r_α lze vypočítat jako podíl skutečné deformace ve směru šířky φ_b a skutečné deformace ve směru tloušťky φ_s :

$$r_\alpha = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} = \frac{\ln \frac{b_0}{b}}{\ln \frac{s_0}{s}} = \frac{\ln \frac{b_0}{b}}{\ln \frac{b \cdot l}{b_0 \cdot l_0}} [-], [2].$$

Tvařitelnost se pak dále posuzuje dle váženého průměru součinitele plastické anizotropie \bar{r} podle vztahu:

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} [-], [2].$$

Podle Shawkiho mají:

- vynikající hlubokotažnost plechy s $\bar{r} > 1,60$;
- dobrou hlubokotažnost s $\bar{r} = 1,25 - 1,60$;
- nízkou hlubokotažnost $\bar{r} < 1,25$ [14].

Podle stupně anizotropie plošné a hodnoty normálové anizotropie, lze hodnotit cípovitost výtahků [14].

6.1.2 Exponent deformačního zpevnění n



Obr. 22 Vliv exponentu zpevnění n_m na tažný poměr K [14]

Určuje schopnost materiálu se zpevňovat při plastické deformaci, má význam jmenovitě při vypínání materiálu. Vysoká hodnota n je příznivá, protože brání vytváření lokálních deformací a působí

na rovnoměrné rozdělení deformace při dvojosém tahu. Experimentálně se dá určit pomocí tahové zkoušky. Při určování se v pracovním diagramu oblast plastické deformace nahrazuje parabolou, protože pracovní diagram z tahové zkoušky plně nevystihuje průběh závislosti skutečného napětí na deformaci. Při praktickém využití se dá uplatnit Ludwikův exponenciální

vztah $\sigma = C \cdot \varphi^n$. Na obr. 22 můžeme vidět zlepšující se hlubokotažnost s rostoucím exponentem n [2], [14].

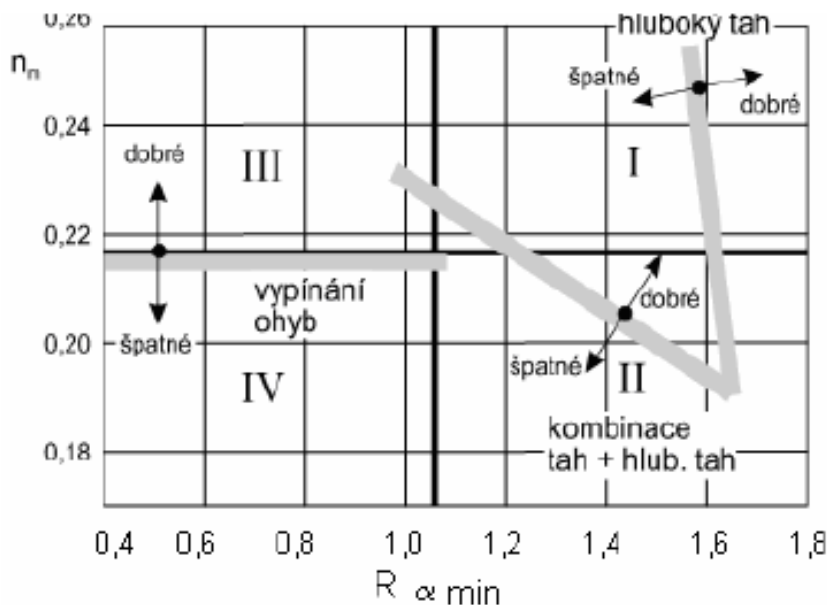
Směrné hodnocení tvařitelnosti:

- nízká tažnost $n_m < 0,215$;
- dobrá tažnost $n_m = 0,215 - 0,25$;
- vynikající tažnost $n_m > 0,215$ [14].

Obvyklé hodnoty pro hlubokotažné oceli jsou $n_m = 0,17 - 0,24$; nerezové oceli mají přibližně 0,4 [14].

6.1.3 Společné hodnocení \bar{r} (R) a n

Jako společné hodnocení ukazatele tvařitelnosti lze použít tzv. „indexu tvařitelnosti“ [14].



Obr. 23 Hodnocení tvařitelnosti podle Lileta [14]

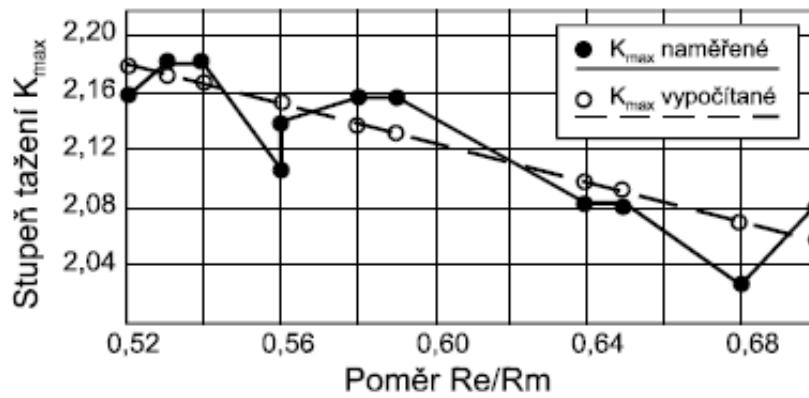
Oblasti:

- I) vhodná pro nejsložitější tažné operace,
- II) pro převažující tlakovou deformaci,
- III) pro převažující tahovou deformaci,
- IV) nevhodná pro hluboké tažení [14].

6.1.4 Poměr meze kluzu a meze pevnosti

Na tuto hodnotu vzniklou poměrem meze kluzu a meze pevnosti panují odlišné názory. Udává se, že je vhodné, aby byl poměr mezi 0,6 až 0,8 [14].

$$0,6 < \frac{R_{p0,2}}{R_m} < 0,8 [-], [14].$$



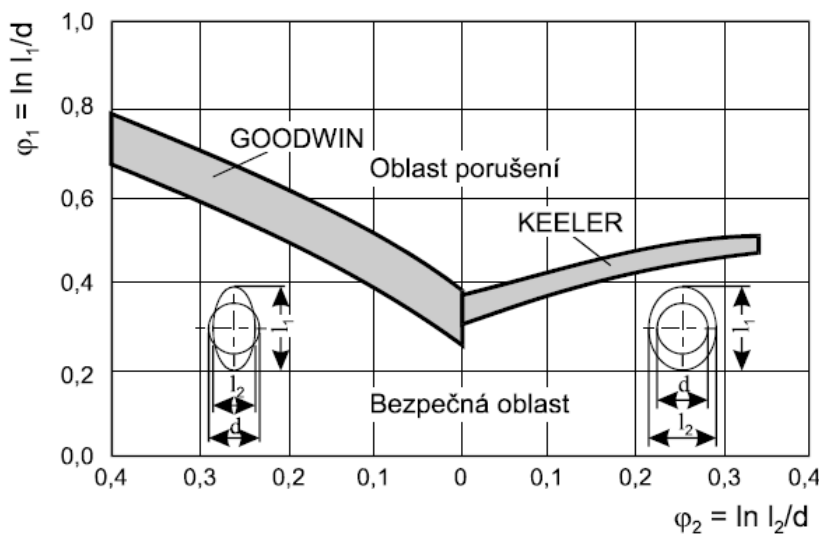
Obr. 24 Vliv poměru Re/R_m na mezní stupeň tažení podle Polláka [14]

7 Posouzení technologické tvařitelnosti plechů

7.1 Limitní diagramy

Diagramy byly zavedeny na počátku 60. let 20. století jako kvantitativní hodnocení tvařitelnosti limitními (mezními) diagramy. Dříve bylo vynalezeno několik limitních diagramů (diagram mezních deformací podle Tomlenova, původní Keelerův diagram). Dnes se již používá FLD diagram výhradně jako tzv. Keeler-Goodwinův diagram. Křivky mezní tvařitelnosti lze získat jednak experimentálně, nebo početními metodami [2], [14].

V Goodwin-Kellerově diagramu jsou na svislé ose vyneseny hodnoty největších tahových logaritmických deformací φ_1 a na vodorovné ose jsou vyneseny hodnoty deformací φ_2 , které jsou k φ_1 kolmé. Na Goodwin-Kellerově diagramu je zřetelné minimum, které rozděluje graf na dvě větve na levou a pravou. Levá větev je vyjádřena dle Goodwina (oblast tah-tlak), pravá větev je dle Keelera (oblast tah-tah). Pokud se výsledná deformace materiálu nachází nad těmito křivkami (oblast porušení) může dojít k porušení materiálu. Při výsledné deformaci, která se



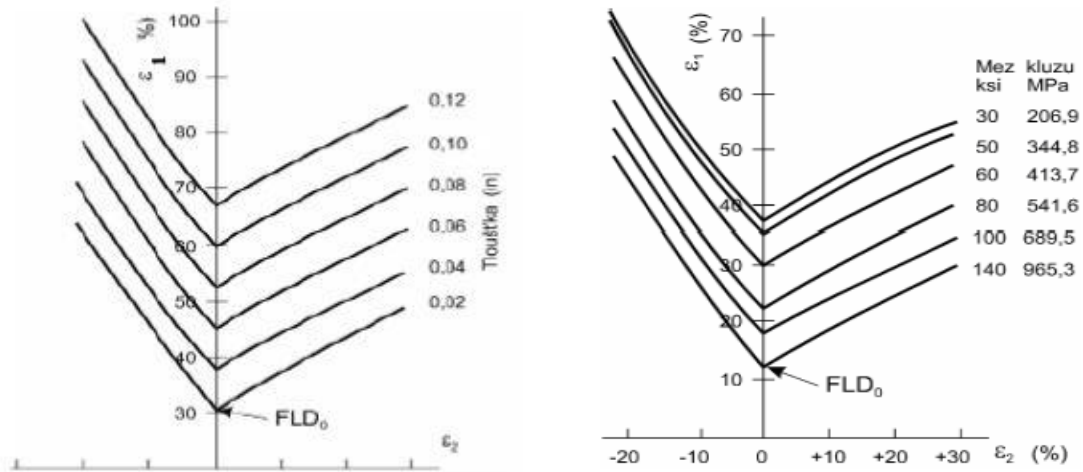
Obr. 25 Keeler-Goodwinův diagram ve skutečných deformacích [14]

nachází v bezpečné oblasti, není materiál porušením ohrožen. Pokud porovnáme bod v grafu zjištěné skutečné logaritmické deformace φ_1 a φ_2 v kritických místech výtahu vzhledem k oblasti mezní deformace plechu, dostaneme tím tzv. technologickou bezpečnost prováděné operace [2].

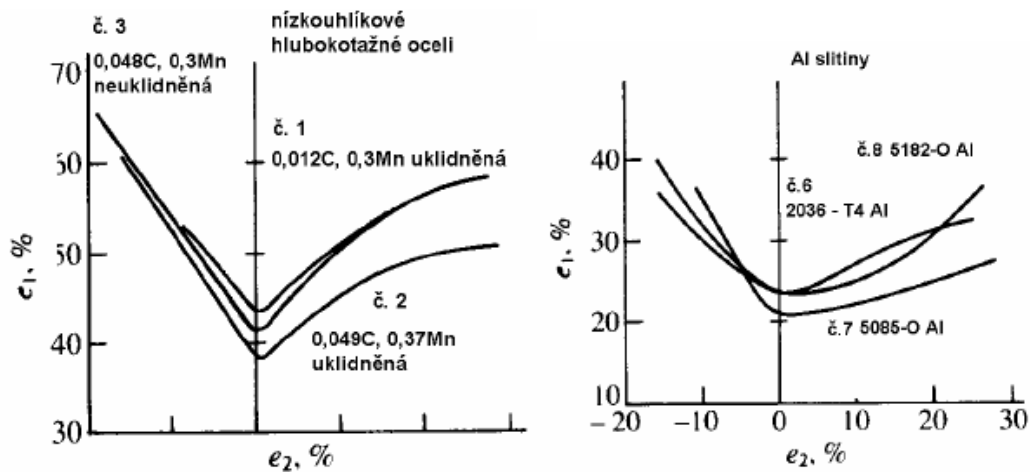
Poloha křivek v Keelerově-Goodwinově diagramu není stejná pro daný materiál a jeho tloušťku. Ovlivňuje ho především chemické složení, metalurgické a tepelné zpracování. Jako další tloušťka plechu a exponent deformačního zpevnění, čím vyšší jsou tyto hodnoty, tím se křivky posunují směrem vzhůru k vyšším hodnotám φ_1 . V oblasti $\varphi_2 < 0$ ovlivňuje průběh křivky normálová anizotropie, která při svém růstu posouvá křivku k vyšším hodnotám φ_1 [2].

Faktory ovlivňující polohy limitních křivek v FLD diagramech

Poloha limitních křivek se může měnit v závislosti na tloušťce materiálu, na mezi kluzu, exponentu zpevnění viz následující obrázky.



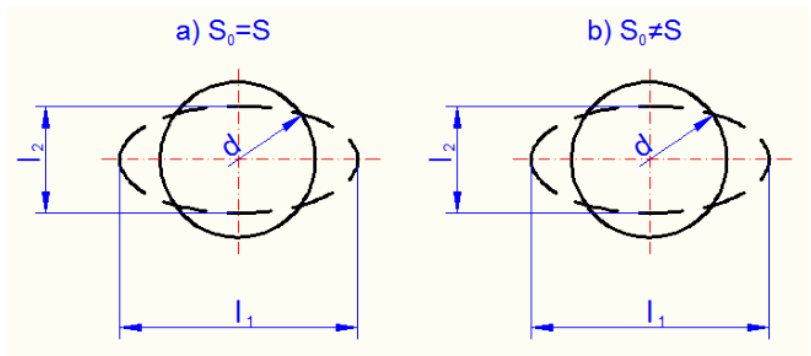
Obr. 26 Limitní křivky v FLD diagramu pro různé tloušťky materiálu (vlevo) a pro různé meze kluzu (vpravo) [14]



Obr. 27 Limitní křivky v FLD diagramu pro různé druhy materiálů [14]

7.2 Analýza pomocí metody sítí

Pomocí metody sítí lze vyhodnocovat deformace, které vznikají v průběhu tvářecího procesu. Hodnocení pomocí deformačních sítí předpokládá, že se materiál (tenký plech) poruší v důsledku lokální deformace při rovinné napjatosti, v místech největší deformace. Vyhodnocování je založeno na deformaci předem nanesených prvků tvořící sít', následným měřením deformovaných elementů a výpočtem skutečné logaritmické deformace. Hodnoty naměřené na elementech, kde se vytvořil krček nebo materiál praskl, se vyhodnocují jako porušení. Jako bezpečné se hodnotí deformace, které jsou vzdáleny o 1 a ½ elementu od porušení. Deformace se vynášší do Goodwin-Kellerova diagramu a je zjišťován skutečný stav s povolenými limity deformace [14].



Obr. 28 Stanovení velikosti logaritmické deformace [2] (upraveno)

Stanovení velikosti logaritmické deformace φ_1, φ_2 :

a) nemění se tloušťka plechu při tažení

$$\varphi_1 = \ln \frac{l_1}{d}$$

$$\varphi_2 = \ln \frac{l_2}{d} = -\varphi_1 \quad [-], [2].$$

$$\varphi_3 = 0$$

b) mění se tloušťka plechu při tažení

$$\varphi_1 = \ln \frac{l_1}{d}$$

$$\varphi_2 = \ln \frac{l_2}{d} \quad [-], [2].$$

$$\varphi_3 = -\varphi_1 - \varphi_2$$

Vyhodnocování deformovaných elementů může probíhat ve dvou variantách. Klasické hodnocení pomocí optického mikroskopu nebo pomocí optického systému [14].

Deformační síť se na přístřih nebo jeho části před vlastním tvářecím procesem nanáší různými metodami (mechanicky, leptáním, tištěním, laserem). Nejčastěji se používá síť s bodovými elementy (o průměru 1 mm a rozteči 2 mm) [14], [2].

7.3 Vyhodnocovací optické systémy

Software, popsáný v kap. 4.4 je softwarem, který zobrazuje virtuální predikci procesu, nikoliv zpětnou kontrolu. Vyhodnocovací optické systémy jsou však aplikovány až po výrobě reálného výlisku a dokáží vyhodnotit skutečné 3D deformace, hodnoty 3D posunutí, změny tloušťky materiálu, dokáží vyjádřit velikosti deformací vůči limitní tvářecí křivce a další.

7.3.1 Argus

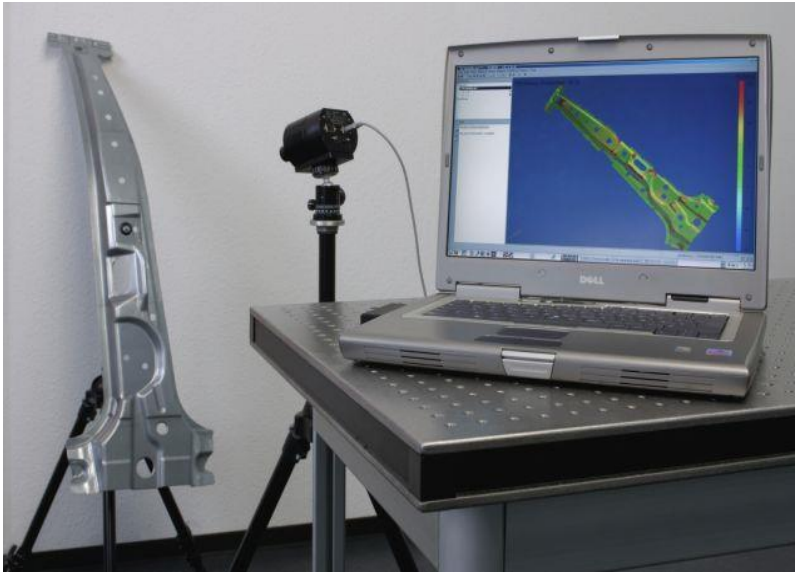
Vyhodnocovací systém Argus je optický systém (bezkontaktní), který je schopen měřit 3D deformace na plechu po lisovacím procesu. Byl vyvinut pro firmu Renault, nyní je používán v dalších automobilkách a výzkumných institucích po celém světě [15].



Obr. 29 Systém ARGUS a jeho příslušenství [15]

Samotný systém je tvořen snímací kamerou, výpočetní jednotkou a dalším příslušenstvím. Na základě optického snímání předem nanesené sítě na polotovar, následně systém po tažení

vyhodnotí hlavní a vedlejší napětí. Takto vyčíslené hodnoty lze převést zpět do vizuální podoby, kde jsou jednotlivé deformační pole (hlavní a vedlejší deformace) pro lepší představu znázorněny na 3D modelu [15], [16].



Obr. 30 Vyhodnocování pomocí systému Argus [15]

s CCD čipem, ze snímku jsou pomocí image processingu vypočteny 3D souřadnice bodů mřížky. Pomocí metody zachování konstantního objemu je vypočteno rozložení hlavní a vedlejší deformace, redukce tloušťky materiálu a stanoveno umístění deformací v FLD diagramu. Výsledky jsou zobrazeny na 3D modelu v barevné mapě. Existují i další optické systémy, pro měření v průběhu lisovacího procesu zatíženého staticky nebo dynamicky (Aramis) [15].

Oblasti využití systému Argus:

- ověřování simulace při tažení plechů;
- optimalizace procesu tváření;
- zjištění oblastí s kritickou deformací;
- optimalizace lisovacích nástrojů;
- testování materiálů [15].

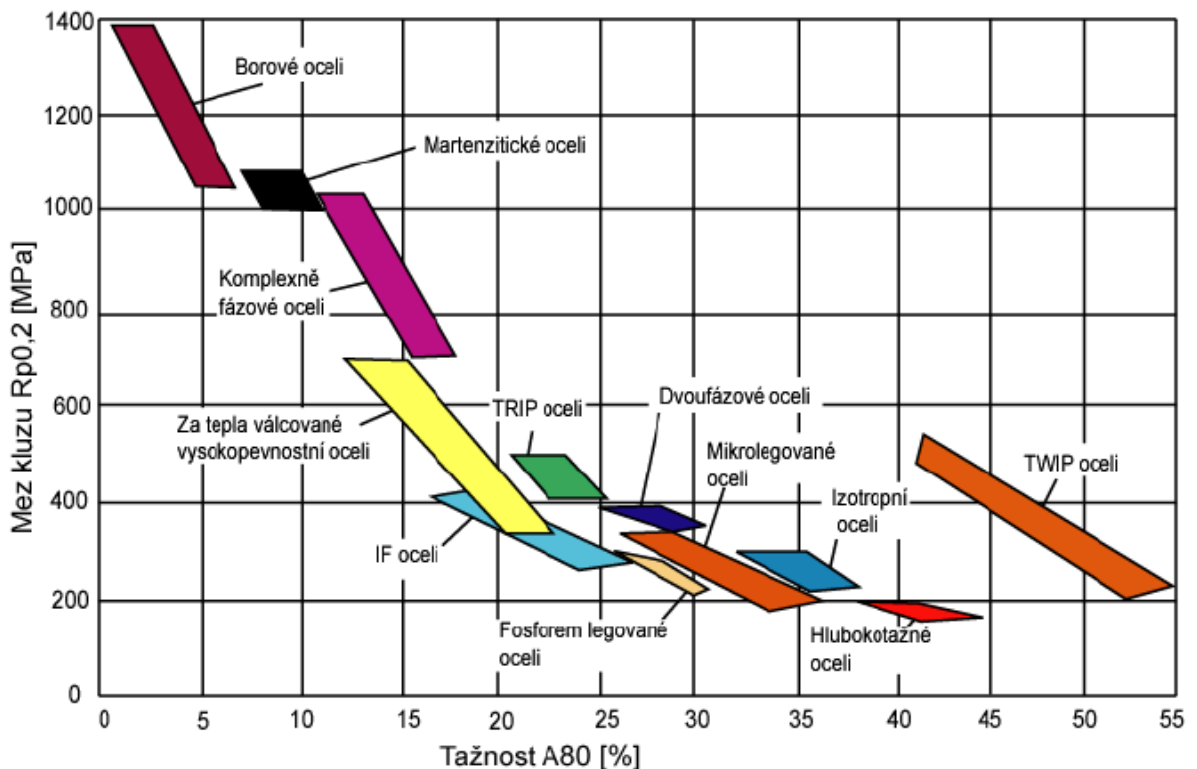
Jak již bylo zmíněno, před samotným tvářecím procesem je na přístřih nanášena různým způsobem mřížka bodů o mikroskopické tloušťce. Velikost těchto bodů se pohybuje od 1 do 6 mm. Při lisovacím procesu se pak nanášená mřížka deformuje společně s materiálem podle nástroje. Po lisování je plech opticky snímán kamerou

8 Nejčastěji používané materiály na výlisky v automobilovém průmyslu

Spektrum použitých materiálů v automobilovém průmyslu je veliké. Používají se oceli, neželezné kovy, ale i plasty a kombinace těchto materiálů, případně uhlíkové kompozity či kevlar. Moderním trendem je snižovat hmotnost karoserie při zachování bezpečnosti, a to lze za použití materiálů s nižší hustotou nebo jejich kombinací s materiály doposud používanými (například ocel + plast). Pokud vznikne potřeba v rámci výlisku v některém místě zvýšit pevnost, může se použít dvou odlišných materiálů (dvou různých druhů ocelí) nebo odlišných tlouštěk plechu a svařit je.

8.1 Oceli

Oceli jsou materiály, které jsou při výrobě automobilové karoserie stále nejvíce používané. Je to hlavně z hlediska nízkých nákladů na tento materiál a dobrých mechanických vlastností, které se uplatňují zejména při výrobě (tažnost, tvařitelnost), ale také při provozu automobilu (pevnost, vysoký modul pružnosti) [17].



Obr. 31 Vlastnosti ocelí používaných v automobilovém průmyslu [19]

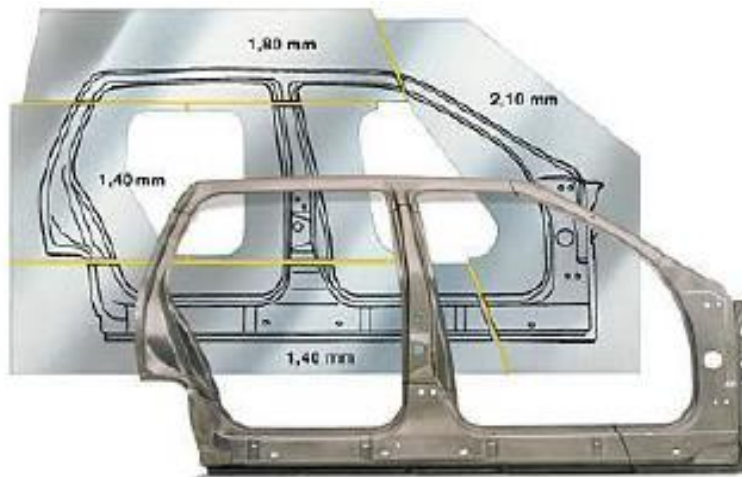
Mezi hlavní výhody ocelí patří:

- nízká cena v porovnání s ostatními druhy materiálů;
- dobrá tvařitelnost;

- snadné spojování tohoto materiálu;
- recyklovatelnost;
- dobrá absorpce energie při nárazu;
- dobrá korozní odolnost při kombinaci se zinkem [17].

Mezi hlavní nevýhody ocelí patří:

- materiál má vyšší hustotu než alternativní materiály,
- bez povrchové úpravy podléhá korozi [17].



Obr. 32 Princip technologie tailored blanks [19]

tloušťek na jeden díl a následné svaření těchto dílů tzv. technologie tailored blanks. Technologie tailored blanks přináší snížení hmotnosti finálního dílce, možnost zvýšení pevnosti v určitém místě, možnost jiné povrchové úpravy v určitém místě [17], [18].

Druhy ocelí používané v automobilovém průmyslu:

- IF oceli
- IF oceli s BH efektem
- Dvoufázové plechy (DP plechy – dual phase steels)
- CP oceli
- TRIP oceli
- TWIP oceli
- Martenzitické oceli [17], [19].

8.1.1 Ocel použitá v experimentu - HX 180 BD

Tyto oceli se používají na součásti automobilu se složitou geometrií (disky kol, boční panely, blatníky, podlahové panely, podlahové tunely) jsou nabízeny jako za studena válcované

vysoko-pevnostní IF oceli. Mají vysoké hodnoty r a n a jsou tedy vhodné pro hluboké tažení. Evropská norma ČSN EN 10346 stanovuje požadavky na tyto oceli, které jsou zároveň ponorem povlakované z nízkouhlíkových hlubokotažných ocelí [20].

Tab. 2 Chemické složení oceli HX 180 (vyjádřeno v hmotnostních %) [20]

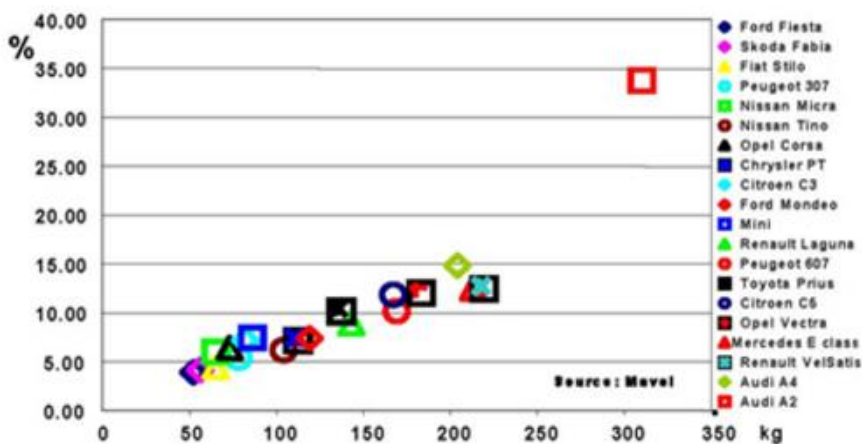
Ocel	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	Nb
	max	max	max	max	max	max	max	max
HX 180	0,01	0,30	0,70	0,06	0,025	≥0,01	0,12	-

Tab. 3 Mechanické vlastnosti oceli HX 180 [20]

Ocel	$R_{p0,2}$	R_m	A_{80}	$r_{0/20}$	$n_{10-20/Ag}$
	[MPa]	[MPa]	[%]	min	min
HX 180	180-230	340-400	36	1,7	0,19

8.2 Hliníkové slitiny

Výhody, nevýhody a význam použití hliníkových slitin jsou popsány v kapitole 1. Platí přibližné pravidlo, že váha karoserie klesne zhruba na polovinu, ale náklady na materiál se zdvojnásobí. Hustota hliníkové slitiny oproti oceli je přibližně třetinová. Na výrobu výlisků



Obr. 33 Relativní a absolutní podíl použití Al slitin na vybraných druzích automobilů [21]

V automobilu zaujímají odlitky z hliníkových slitin nejvyšší objem z použití hliníkového materiálu (hlavy válců, motorů, částí podvozků). Nově hliníkové slitiny získávají uplatnění v použití na mnoha místech karoserie (např. v aplikaci konstrukci prostorového rámu, dílů náprav a konstrukčních prvků) [21].

z hliníkových slitin je však potřeba větších tlouštěk z důvodu nízkého modulu pružnosti (tzn. nižší tuhost výlisků oproti ocelovým) a z důvodu nižší tvařitelnosti hliníkových slitin [17].

Na obrázku č. 33 je znázorněný rozsah použití hliníkových slitin v automobilech. Pro automobil menší a střední velikosti je použito mezi 50 a 200 kg slitiny hliníku. V některých případech viz Audi A2 až 300 kg slitiny hliníku. Nicméně hliník díky vývoji nových materiálů soutěží v použitelnosti s novými ocelovými, hořčíkovými, plastovými, sendvičovými materiály a pěnovými materiály [21].

8.2.1 Hliníková slitina použitá v experimentu - AlMg₃

Je to materiál, který je středně pevný a velmi odolný proti korozi, mořské vodě a tropickým podmínkám (vysoká chemická odolnost). Materiál má velmi dobrou svařitelnost a je velmi dobře plastický v nevytvrzeném stavu. Doporučené použití této slitiny je v chemickém průmyslu, potravinářském průmyslu, ale i pro stavbu vozidel. Materiál byl vybrán na základě srovnání jednotlivých hliníkových slitin nabízených ve Feronu, a.s., dle kritéria A_g , R_m a R_e [22].

Tab. 4 Chemické složení hliníkové slitiny AlMg₃ (vyjádřeno v hmotnostních %) [22]

Slitina		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	ostatní	Al
AlMg ₃	min				0,05	2,60		Fe + Si 0,60	zbyte
	max	0,50	0,40	0,10	0,40	4,00	0,20	Sb 0,25	k

Tab. 5 Mechanické vlastnosti slitiny hliníku AlMg₃ [23]

Slitina	R _{p0,2}	R _m	A ₅₀ (t=0,5 – 1,5 mm)
	[MPa]	[MPa]	[%]
AlMg ₃	80	190-240	22

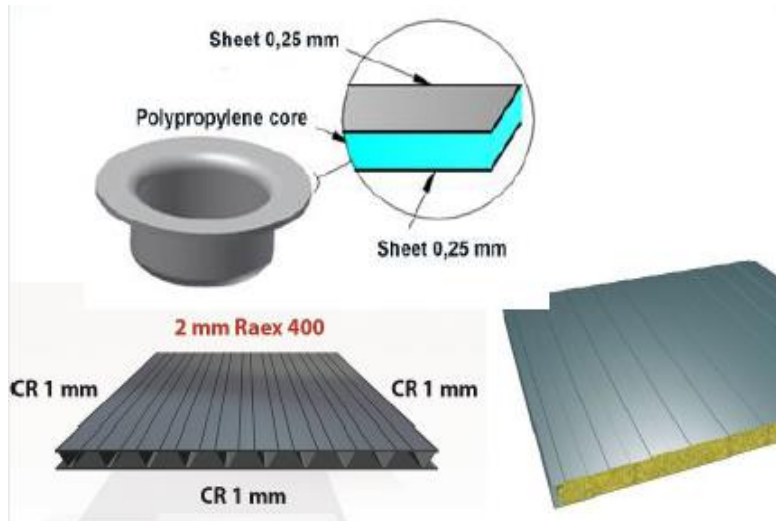
8.3 Polymery

Plastové části karoserie jsou ve velkosériové výrobě známy od 80. let. Nejprve jako obložení ocelových dílů, posléze jako doplnění stávajících částí karoserií – boční stěny, části dveří, blatníky. Při srovnání s kovovými materiály jsou vhodnější pro tvorbu složitých tvarů a za nižších nákladů. Polymery, které se používají pro automobilové výlisky, lze rozdělit na termoplasty a termosety. Termoplasty jsou materiály, které lze po tepelném zpracování, vytvrzení znovu roztavit a zpracovat. Termosety, jsou materiály, které nelze po vytvrzení znova roztavit a zpracovat [17], [24].

8.4 Nekonvenční materiály

Používají se především za účelem snížit hmotnost karoserie, při zachování pevnosti a tuhosti dílce. Jsou to především kombinace materiálů uvedených v předchozích kapitolách.

a) Sendvičové materiály

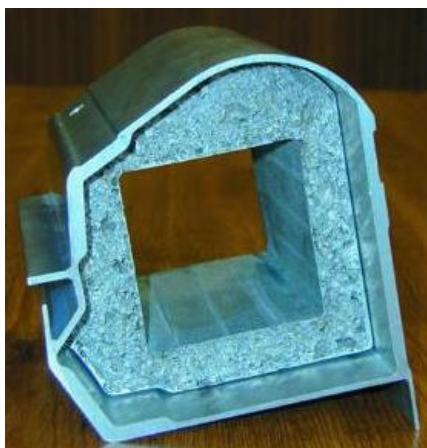


Obr. 34 Sendvičové materiály [19]

Sendvičové materiály představují kombinaci dvou a více materiálů. Typicky plastové výplně a ocelového obalu. Mají především nízkou hmotnost, dobrou tepelnou a vibro – akustickou izolaci. Sendvičový materiál lze však obtížně svařit, nelze lakovat společně s karoserií a má vysokou cenu [19].

b) Hliníkové pěny

Materiál s porézní strukturou lze použít pro konstrukční účely a to i přes to, že je snaha používat materiál bez pórů a mikroporozity. Při konstruování dílů z kovových pěnových materiálů není možné tak snadno stanovit chování při různém namáhání. Je ale možné vhodněji rozložit materiál v celém objemu součástky, lze snadno zvětšit moment setrvačnosti za nízké hmotnosti [25].



Obr. 35 Výztuha prahu Ferrari z pěnového hliníku ALULIGHT [25]

Nejčastěji se pro výrobu hliníkových pěn používá hliník, který má výhodné vlastnosti z hlediska hustoty ($\approx 2700 \text{ kg/m}^3$), vysoké houževnatosti, pevnosti, vysoké korozní odolnosti. Hliník je velmi porézní materiál, póry následně tvoří až 60 % objemu. Lze užít slitin vhodných pro slévání nebo pro tváření [25].

9 Návrh experimentu pro porovnání hlubokotažného procesu

Vlastní experiment má dvě části, výpočetní, která je provedena pomocí softwaru AutoForm a praktickou, která ověřuje výsledky softwaru. Experiment je proveden pro dva různé materiály (ocel HX 180 BD tloušťky 0,65 mm, hliníková slitina AlMg₃ tloušťky 0,8 mm). V prvním případě jsou použity v numerické simulaci a experimentu pro oba materiály stejné procesní a technologické podmínky lisu. Po porovnání výsledků z numerické simulace, vlastního experimentu a zdůvodnění odchylek, jsou v závěru práce doporučena případná nápravná opatření. Z každého materiálu jsou vyhotoveny alespoň dva zkušební vzorky. Následně je proveden vlastní lisovací proces na hydraulickém lisu PYE 250 S. Pro analýzu výlisku je využit systém Argus ve společnosti ŠKODA AUTO a.s..

9.1 Lis použitý pro experiment

Zařízení, na kterém je proveden experiment je hydraulický lis německé výroby PYE 250 S, který se nachází v dílnách ústavu technologie Fakulty strojní, ČVUT v Praze. Na stole a beranu tohoto lisu je upnut zkušební přípravek, který je popsán v následujících dvou kapitolách. Tento lis disponuje parametry, které udává následující tabulka.

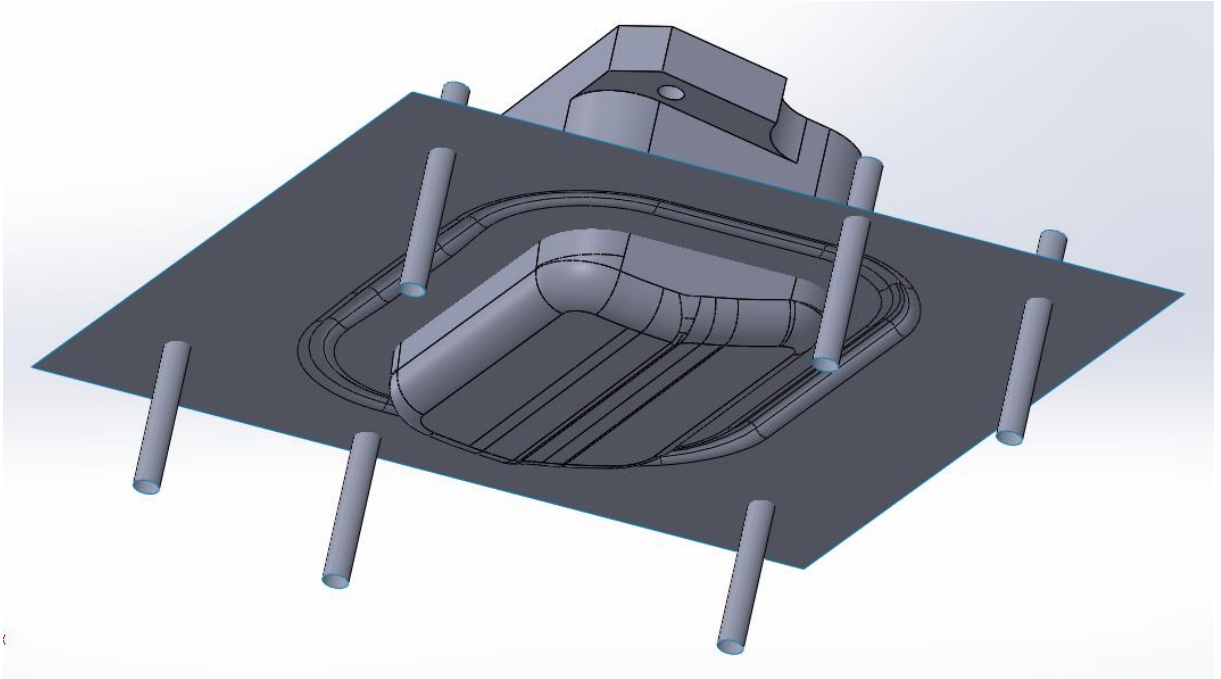
Tab. 6 Parametry lisu PYE 250 S

Druh parametru	Hodnota
Označení	PYE 250 S
Celková hmotnost	9,1 t
Provozní napětí	380 V
Řídící napětí	220 V
Příkon	13,5 kW
Jmenovitý proud	26 A
Zdvih	500 mm
Provozní tlak	200 atm.
Jmenovitá síla	Pohyb vpřed: 2,5 MN Pohyb vzad: 0,5 MN
Rychlost beranu	Pohyb vpřed: 0,18 m/s Pohyb vzad: 0,1 m/s

9.2 Zkušební nástroj v 3 D datech

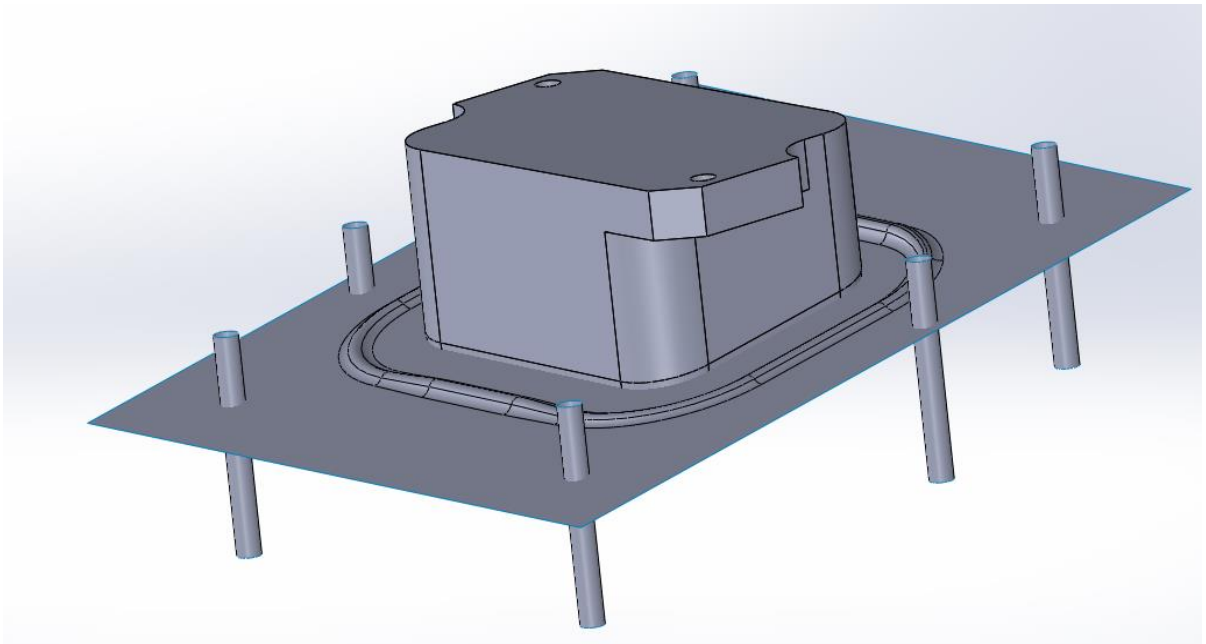
Data nástroje jsou použita pro numerickou simulaci v softwaru AutoForm. Jedná se o nástroj, který je složen z tažníku, matrice a přídržovače. Testuje složité tvary, které se vyskytují na karoserii automobilu, jestli jsou z technologického hlediska vyrobitelné a s dostatečnou

jakostí. Vnější hrany čela tažníku jsou zaoblené s rádiusem 14,3 mm, boční hrany tažníku jsou zaobleny s rádiusem 25 mm. Čelní plocha nástroje je složena z několika rádiusových a tvarových ploch. Na čelní ploše se nachází tzv. tornado linie (konkávní tvarová plocha s velmi ostrým vrcholovým rádiusem 0,1 mm).

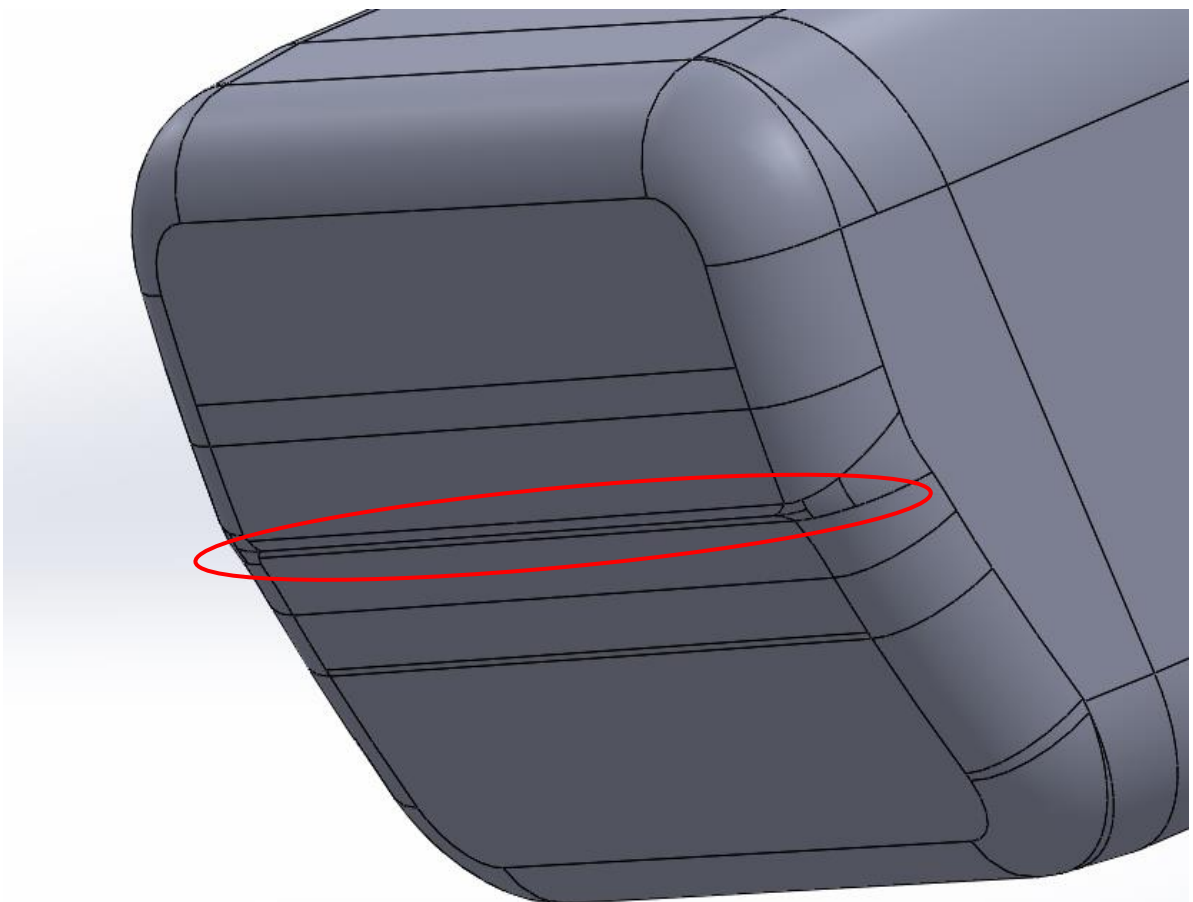


Obr. 36 Tažník a brzdící drážka (pohled šikmo zespoda)

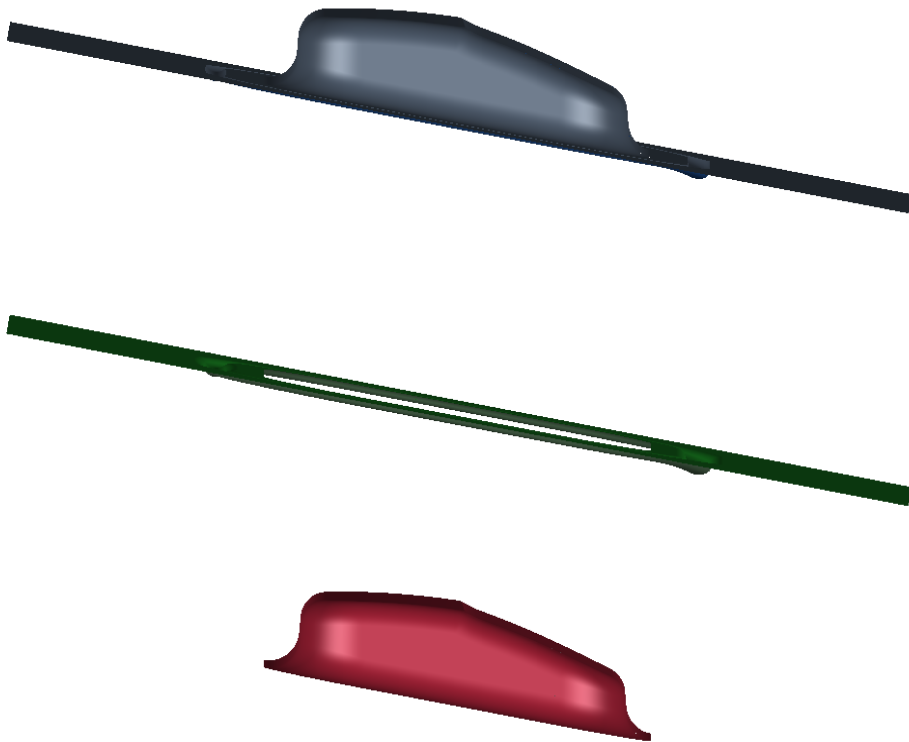
Průřez brzdící drážky má tvar poloviční elipsy, na níž navazují hrany se zaobleným rádiusem 6 mm. Funkcí brzdné drážky je usměrňovat tok materiálu při samotném tažení a dostatečně vypínat přístřih, tak aby na výlisku nevznikaly boule, promáčkliny nebo zvlnění.



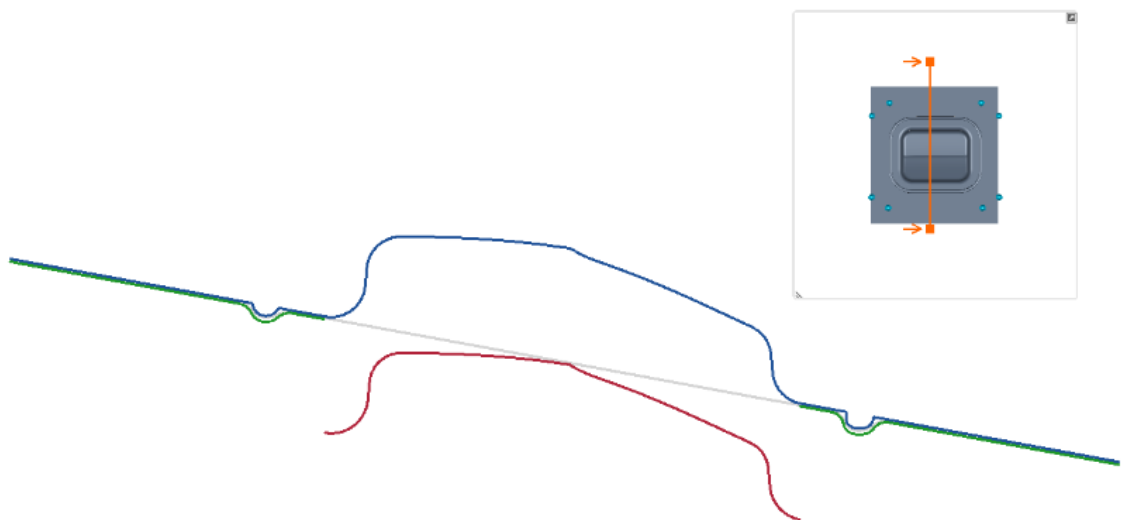
Obr. 37 Tažník a brzdící drážka (pohled šikmo shora)



Obr. 38 Detail čela tažníku, pohled na tornado linii (vyznačeno červeně)

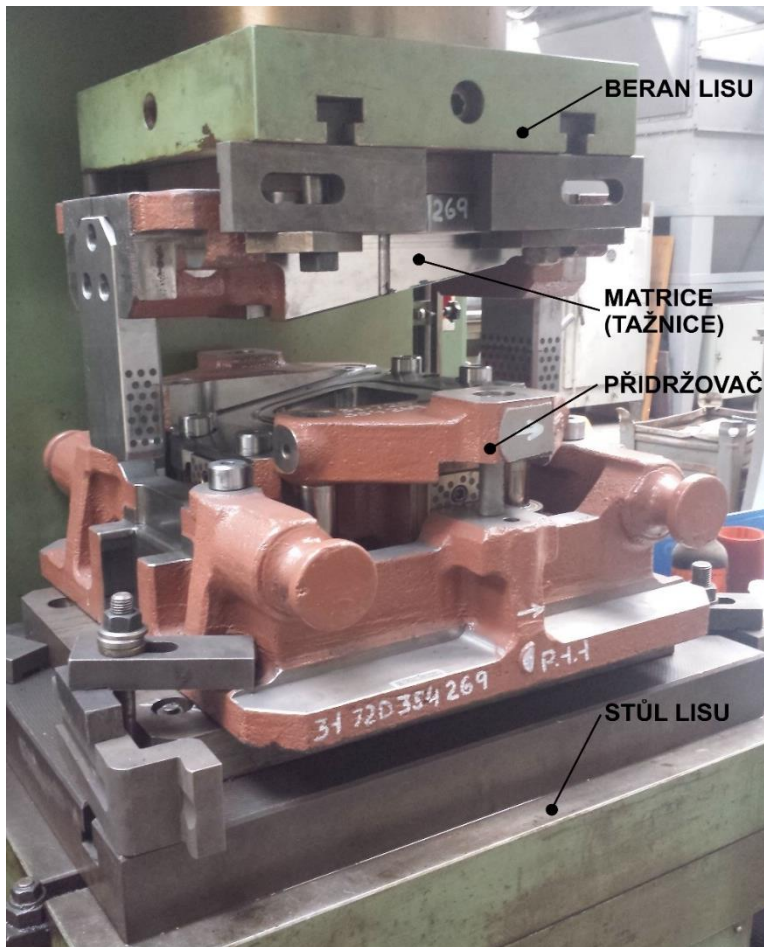


Obr. 40 Sestavení nástroje (matrice+přidržovač+tažník) v programu AutoForm



Obr. 39 Uzavření přístřihu přidržovačem

9.3 Popis zkušebního nástroje



Obr. 41 Sestava tažného zkušebního nástroje na lise PYE 250 S

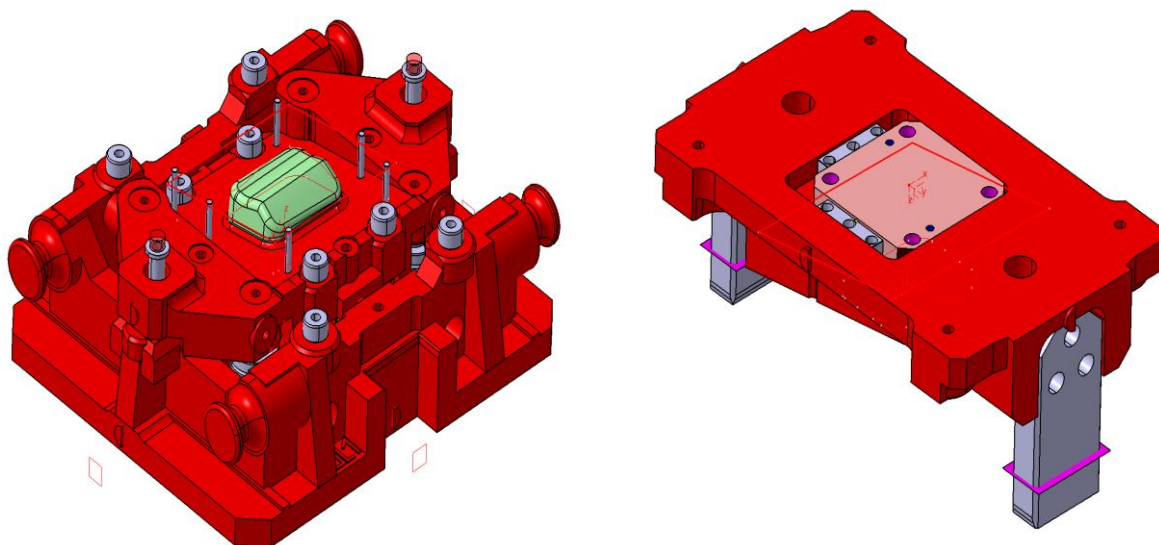
Spodní část zkušebního nástroje je upnuta na stole pomocí upínek a šroubů zašroubovaných v T drážkách stolu. Vrchní část nástroje je obdobně upnuta na beranu lisu. Samotný nástroj se skládá z matrice (která vykonává pohyb směrem dolů a zpět), přídržovače (který svírá samotný plech oproti matrici a pomáhá usměrnit tok materiálu při tažení) a tažníku, který je nepohyblivý (udává společně s matricí výsledný tvar výtažku). Následující obrázky ukazují detaily tažného zkušebního nástroje (matrice, tažníku a přídržovače).



Obr. 42 Detail matrice tažného zkušebního nástroje



Obr. 44 Detail tažníku tažného zkušebního nástroje



Obr. 43 3D data nástroje (vlevo tažník + základna, vpravo přidržovač + matrice)

9.4 Vstupní data simulací

Jsou to především charakteristiky materiálu (mechanické vlastnosti, technologické vlastnosti), ale i procesní podmínky lisovacího procesu.

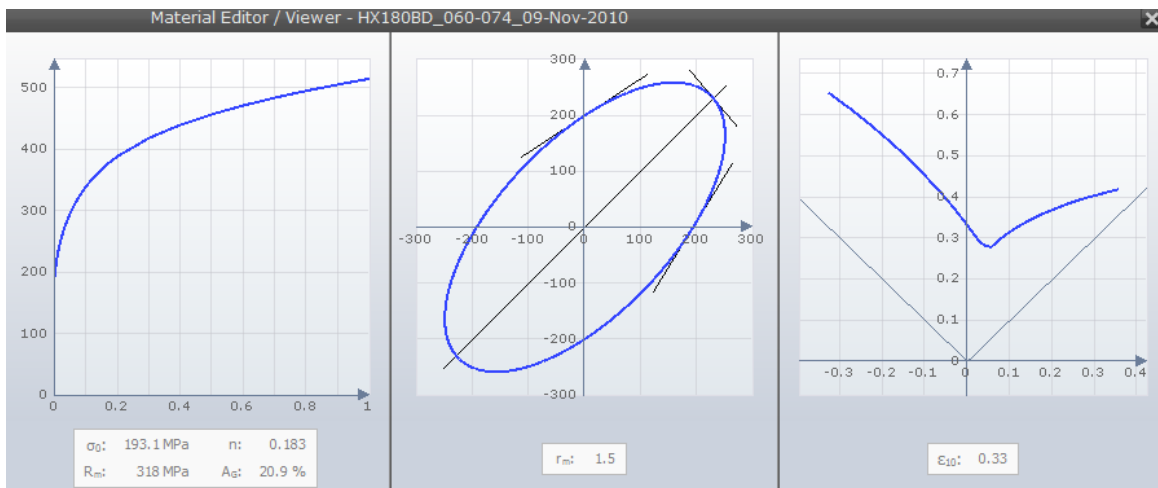
9.4.1 Materiálová data

Oba materiály byly nalezeny v knihovně materiálů v softwaru AutoForm R6. Následuje přehled jejich hlavních charakteristik.

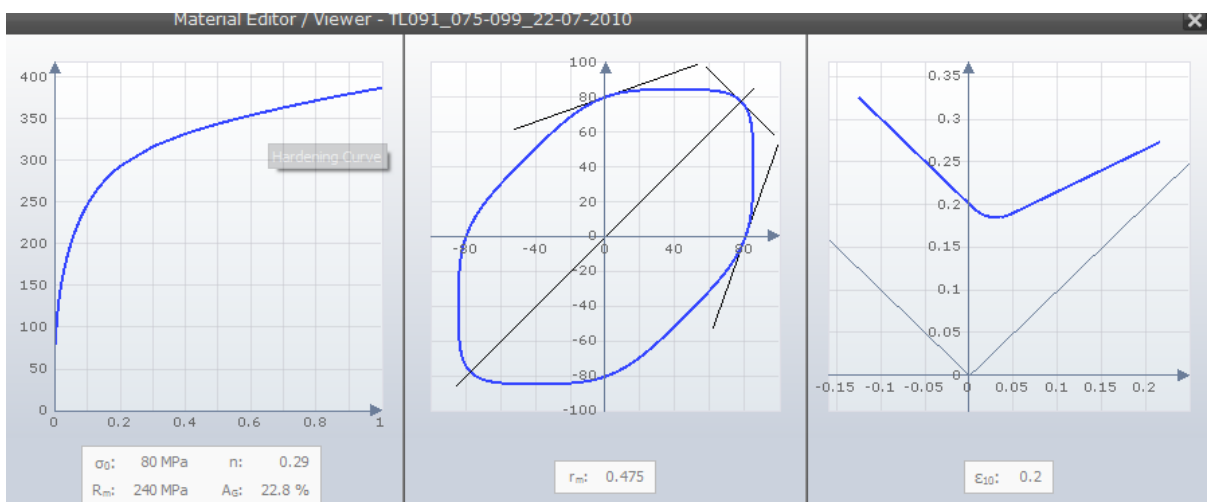
a) HX 180 BD

Tab. 7 Materiálové charakteristiky HX 180 BD z knihovny materiálů AutoForm R6

Označení materiálu	R_m [MPa]	σ_0 [MPa]	E [GPa]	A_g [%]	n [-]	r_m [-]
HX 180 BD	318	193	205	20,9	0,183	1,5

Obr. 45 Grafická závislost R_m - ϵ , vyjádření součinitele plastické anizotropie, FLD diagram pro HX 180 BDb) AlMg₃Tab. 8 Materiálové charakteristiky AlMg₃ z knihovny materiálů AutoForm R6

Označení materiálu	R_m [MPa]	σ_0 [MPa]	E [GPa]	A_g [%]	n [-]	r_m [-]
AlMg ₃	240	80	70	22,8	0,29	0,475

Obr. 46 Grafická závislost R_m - ϵ , vyjádření součinitele plastické anizotropie, FLD diagram pro AlMg₃

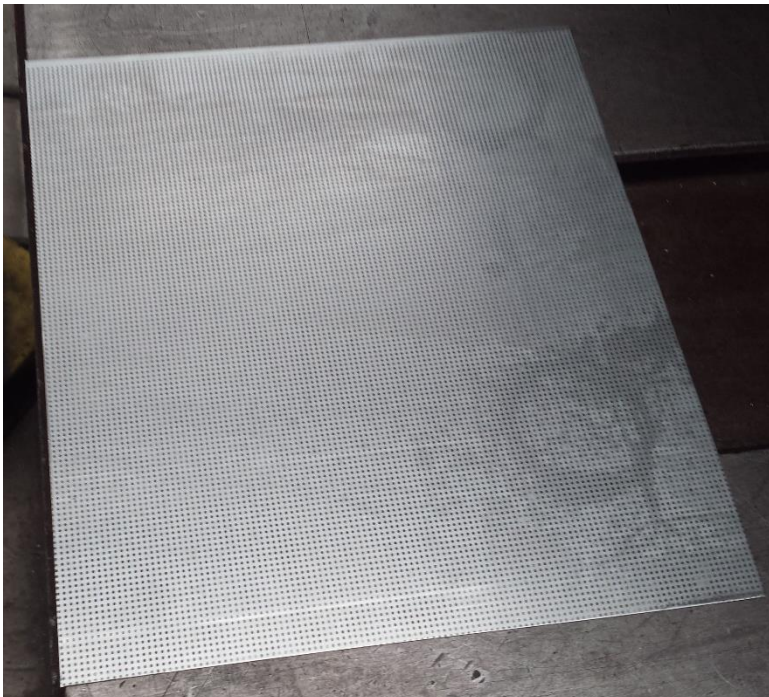
9.4.2 Procesní parametry simulace

V následující tabulce jsou uvedeny vybrané parametry nastavené v softwaru AutoForm R6, tyto parametry jsou nastaveny tak, aby se co nejvíce podobaly parametrům na zkušebním lise. Více procesních podmínek je uvedeno v přílohách I a II.

Tab. 9 Procesní parametry simulace

Druh parametru	Hodnota
Velikost přístřihu	265 x 238 mm
Čas výrobního cyklu	1,7 s
Coloumbův součinitel tření	0,14
Ocel	
Označení	HX 180 BD
Tloušťka	0,65 mm
Maximální síla matrice	545,8 kN
Maximální síla tažníku	145,8 kN
Maximální síla přidržovače	400 kN
Al slitina	
Označení	AlMg ₃ (AW-5754 H22)
Tloušťka	0,8 mm
Maximální síla matrice	498,6 kN
Maximální síla tažníku	98,6 kN
Maximální síla přidržovače	400 kN

9.5 Nanesení sítě na přístřih



Obr. 47 Kruhová síť nanesená na přístřihu

Ve ŠKODA AUTO a.s. byla nanesena na pásy plechu pomocí laseru síť kruhových obrazců. Následně byly transportovány do laboratoří Ústavu strojírenské technologie, Fakulty strojní, ČVUT v Praze a nastříhány na příslušné přístřihy a byly vylisovány výlisky.

10 Simulace a reálný experiment lisovacího procesu

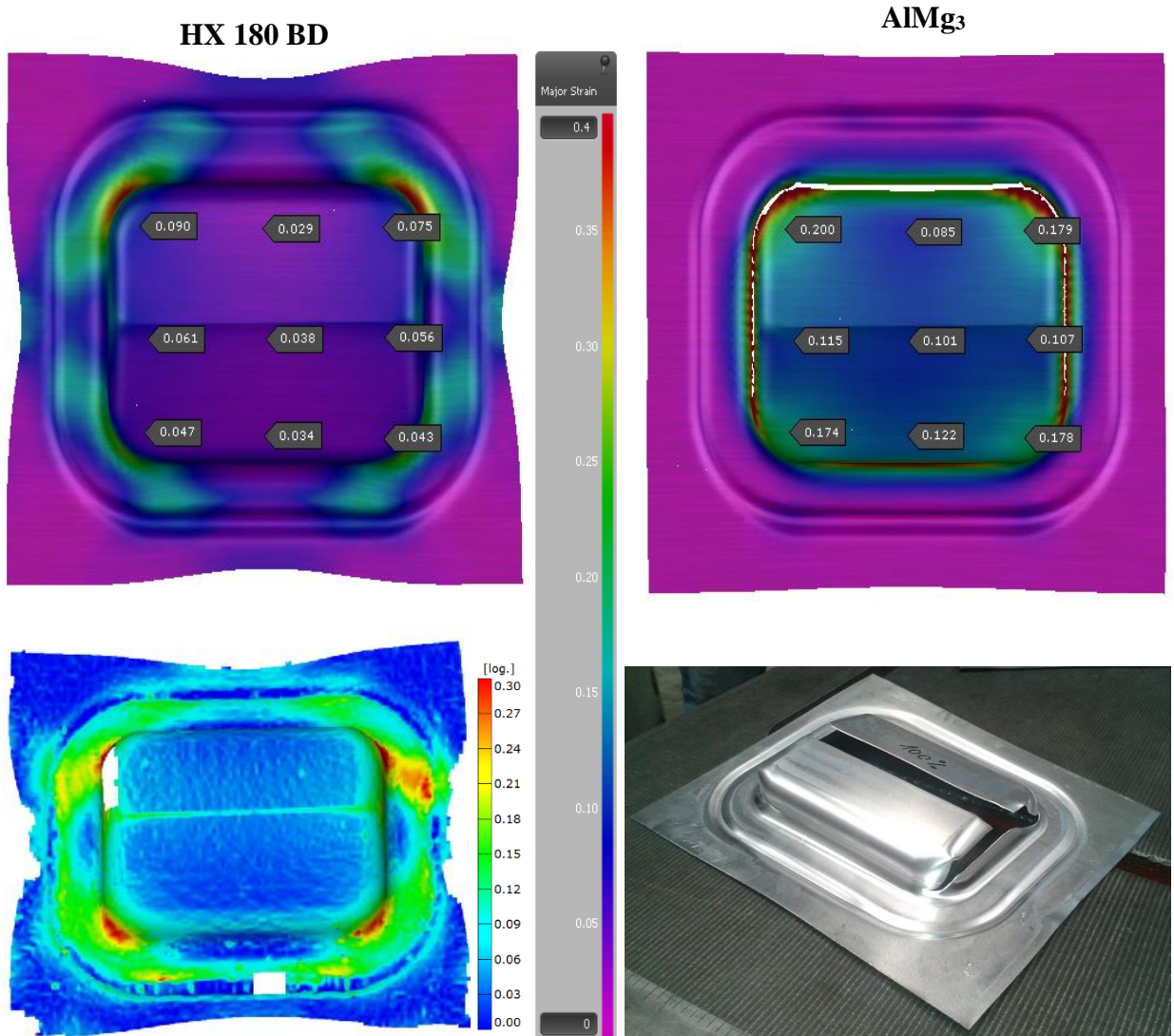
V následujících kapitolách byly zobrazeny výsledky z numerických simulací, které byly provedeny v programu AutoForm R6 a z reálného experimentu provedeném na zkušební přípravku a lise PYE 250 S. V simulačním programu byly provedeny simulace pro vyhodnocení maximální deformace, hlavního napětí, ztenčení, odpružení, deformačního zpevnění a vyhodnocení v FLD diagramu. To vede k predikci problematických oblastí, výsledky ze simulace lze s reálným stavem porovnat (výlisky se sítí, lze reverzně vyhodnotit systémem Argus). Na výlisky z materiálu HX 180 BD byly naneseny deformační sítě, na výlisky z materiálu AlMg₃ nebyla síť nanesena, nedovolují to technologické možnosti laboratoře ve ŠKODA AUTO a. s.. Veškeré výlisky byly posouzeny z hlediska vad vizuálně, v případě ocelového výlisku, kde nebyly pozorovány viditelné trhliny, byl vybrán výlisek a posouzen z hlediska hlavního a vedlejšího napětí a především posouzení bezpečnosti tvářecí operace proti vzniku trhlin (v FLD diagramu) za pomoci systému Argus. Dále byla porovnána i velikost vtažení materiálu, pomocí měření křivky vtažení, v simulaci a měření po reálném tažení.

10.1 Porovnání lisovatelnosti materiálu HX 180 BD a AlMg₃

Při lisování oceli nebo hliníkových slitin může vznikat odlišné chování materiálu a to zejména kvůli jiným mechanickým vlastnostem materiálu. Obecně lze předpokládat, že slitina hliníku bude vykazovat více problémů než ocel, to je způsobeno zejména horší tvařitelností hliníku a snadnějším vyčerpáním plasticity. Na následujících obrázcích jsou porovnány různé charakteristiky při tváření oceli a hliníku, které jsou popsány v úvodu kapitoly 10 a bude provedeno i srovnání numerické simulace a reálného výlisku v různých variantách.

10.1.1 Analýza hlavního napětí (Major strain)

Analýzu hlavního napětí pro oba lisované materiály zobrazuje obrázek č. 48. Můžeme vidět, že napětí u $AlMg_3$ je ve většině případů přibližně dvojnásobné oproti oceli. Můžeme tedy očekávat

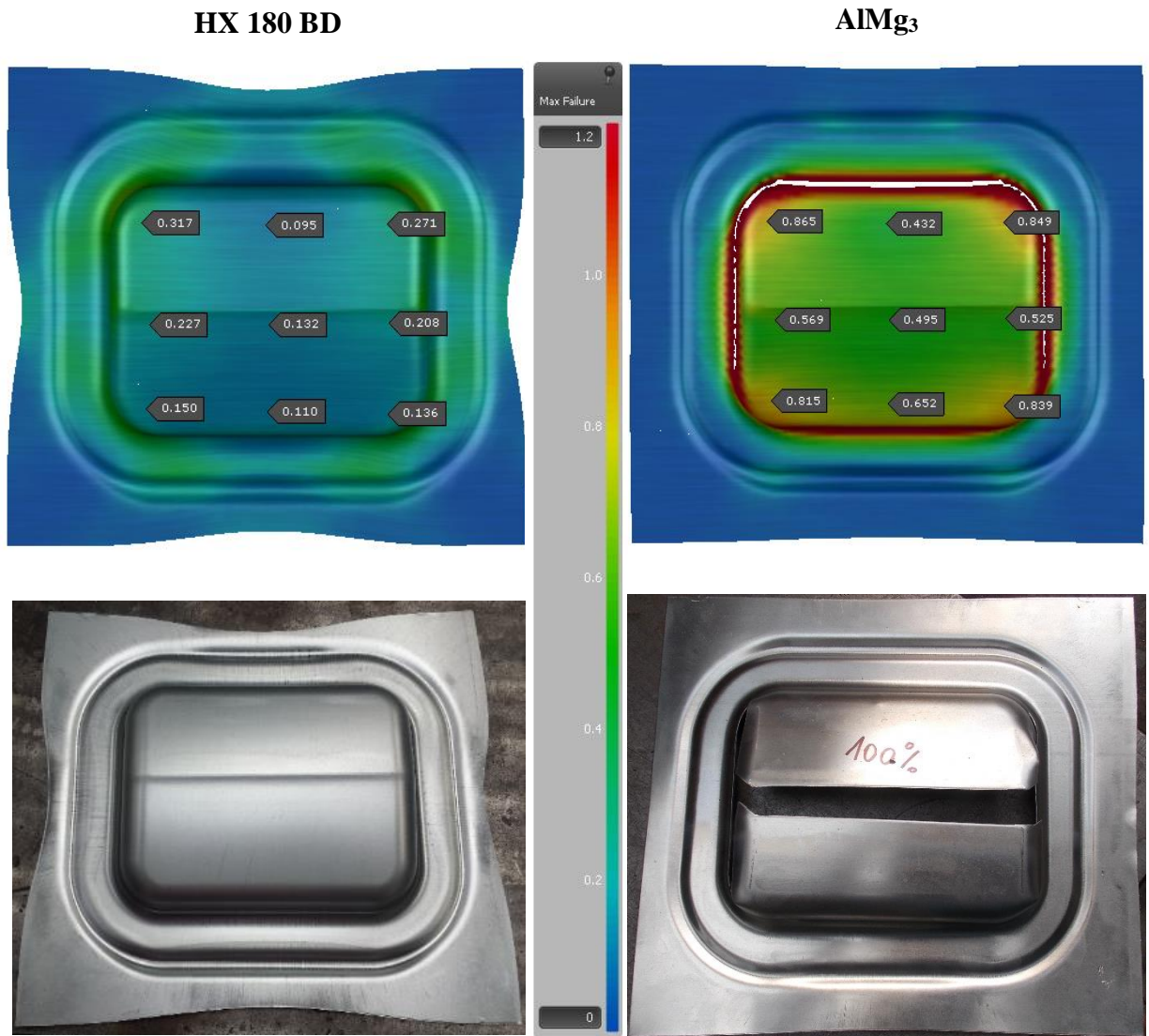


Obr. 48 Porovnání hlavního napětí při simulaci tažení HX 180 BD a $AlMg_3$, srovnání se systémem Argus pro HX 180 BD, foto deformace hliníkového dílu

i větší deformace. Při srovnání ocelového výlisku a jeho hlavního napětí v numerickém simulačním programu a v reverzním vyhodnocení pomocí systému Argus se výsledky příliš neliší a kritické místa vznikají v rozích výtažku. Ve srovnání simulace hliníkové slitiny s experimentem jsou diametrální rozdíly, v simulaci vznikají trhliny na bocích v realitě se však tvoří trhliny i v místě tornádo linie (designové hrany). Výstupní zpráva ze systému Argus viz přílohy VI a VII.

10.1.2 Analýza maximální deformace (Maximum failure)

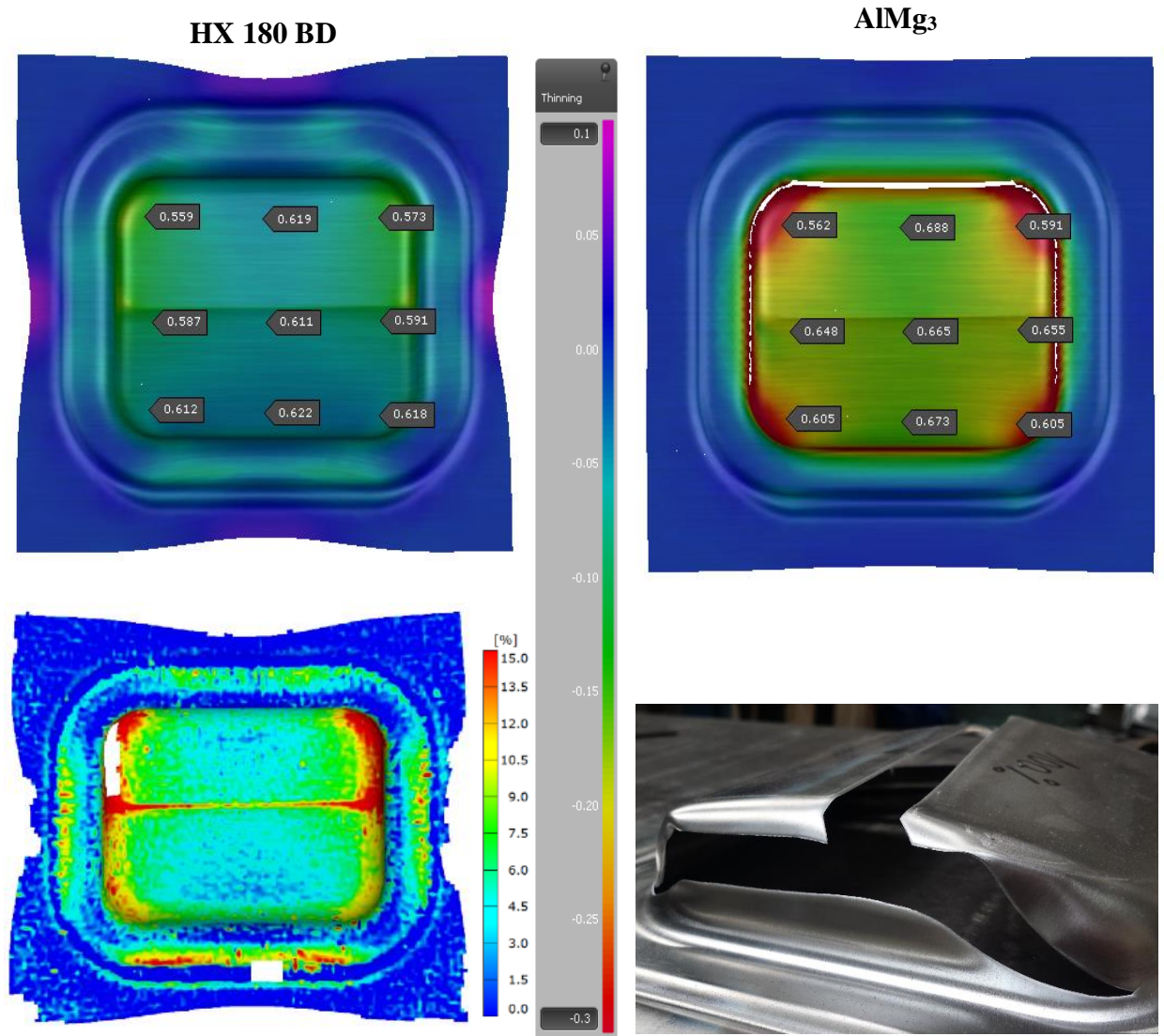
U ocelového výlisku je maximální deformace přijatelná, pohybuje se v dovoleném pásmu deformací (modrá a zelená) v případě hliníkové slitiny je deformace nepřijatelná pohybuje se především v zakázaném pásmu deformací (žlutá až červená), což vede ke vzniku trhlin. Při pohledu na ocelový výlisek na obrázku č. 49 můžeme vidět, že je bez zjevných vad.



Obr. 49 Porovnání maximální deformace při simulaci tažení HX 180 BD a AlMg₃; a reálné foto výlisků

10.1.3 Analýza ztenčení (Thinning)

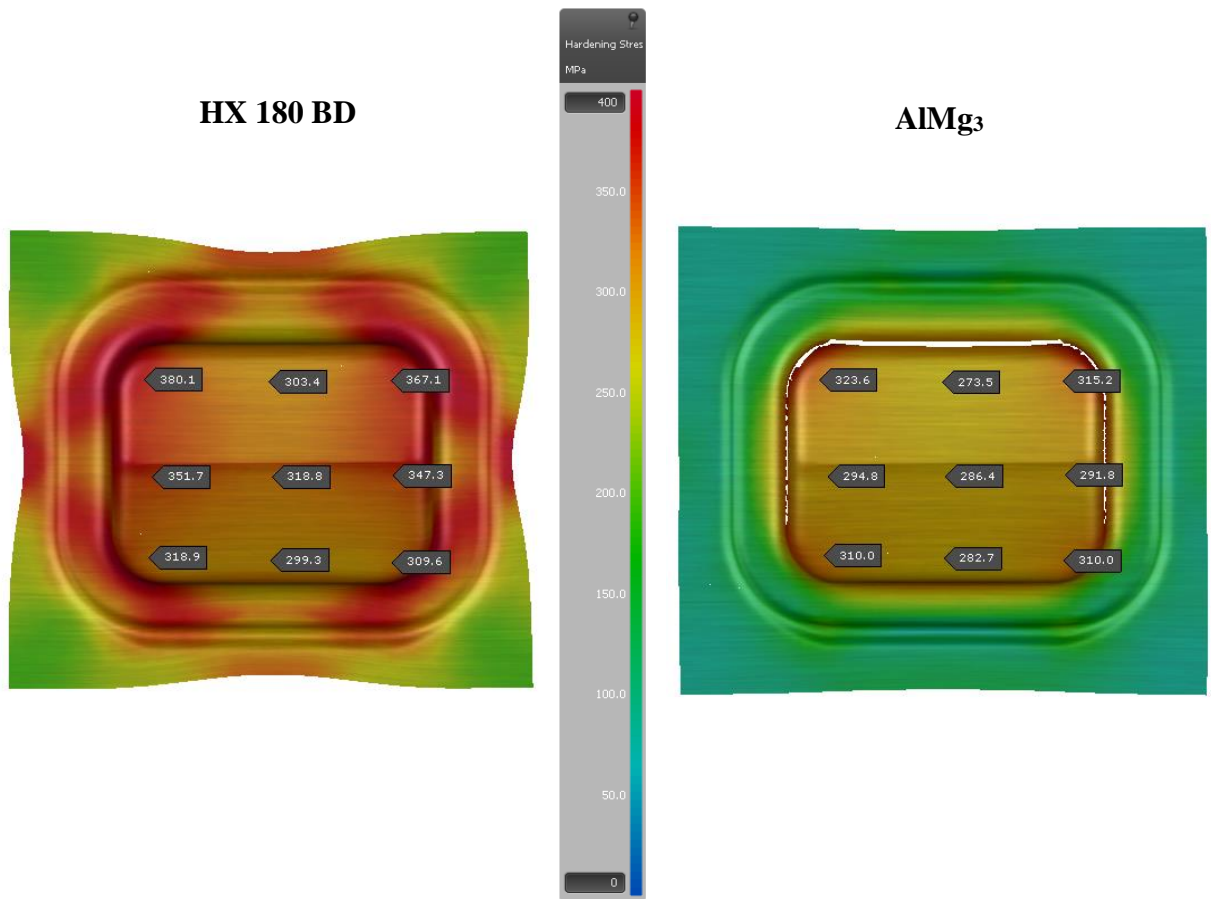
Na obrázku č. 50 můžeme vidět, že při tažení ocelového materiálu se tloušťka příliš nemění a pohybuje se v dovoleném pásmu ztenčení (modré a zelené, to je do hodnoty 0,25 respektive 25 %), u hliníkové slitiny se mění v některých místech příliš výrazně (v rozích) a zde pak dochází k utržení materiálu (bílé pásmo).



Obr. 50 Porovnání ztenčení při simulaci tažení HX 180 BD a AlMg₃, srovnání se systémem Argus pro HX 180 BD, detail roztržení vylisku materiálu AlMg₃

10.1.4 Analýza deformačního zpevnění (Hardening stress)

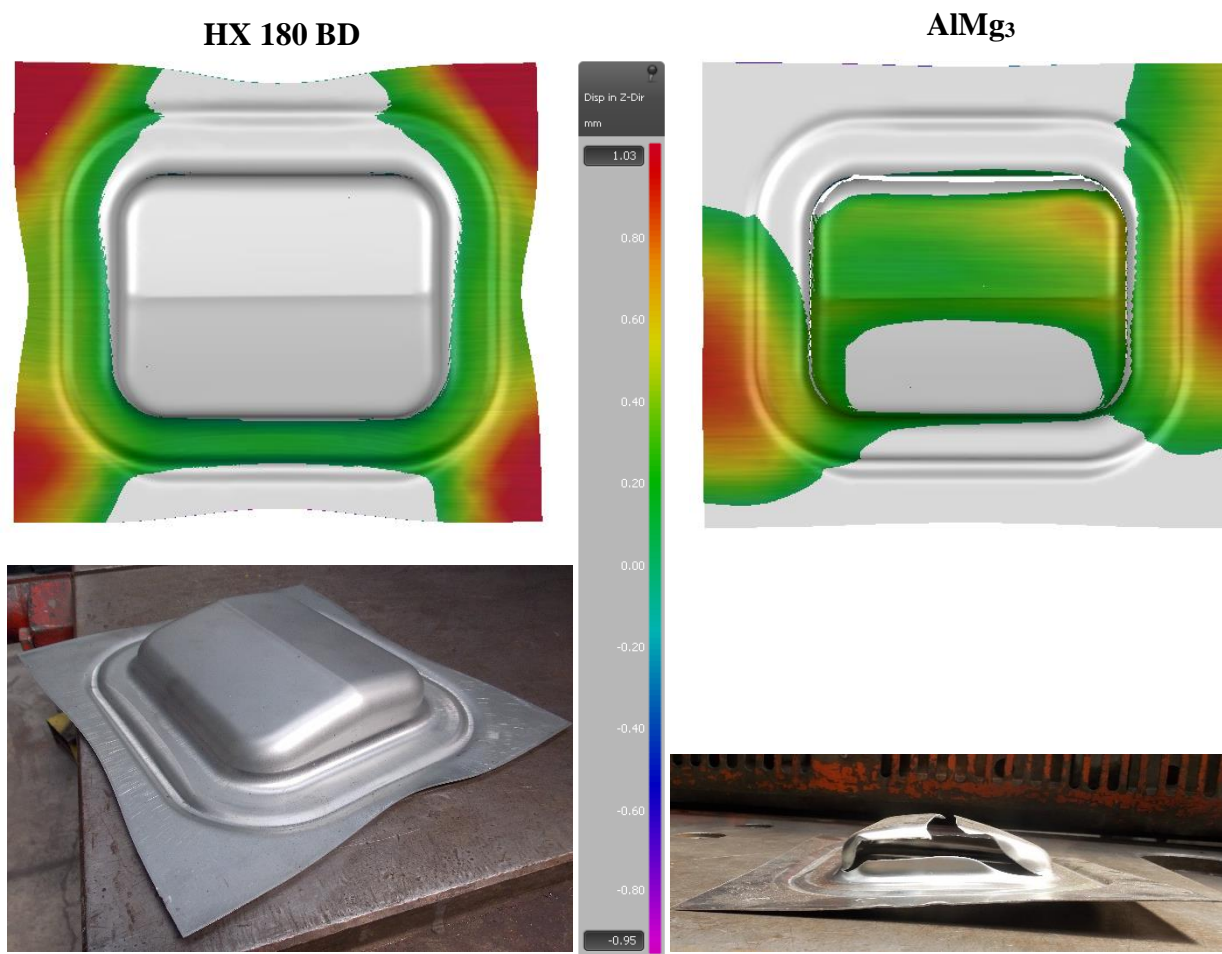
Při tváření materiálu za studena se pomocí zpevňovacích mechanismů (především pohybem a kupením dislokací na hranicích zrn) materiál zpevňuje. Toto zpevnění je v malé míře příznivé, pokud ale překročí určitou hranici, v materiálu mohou začít vznikat trhliny. Na obrázku č. 51 můžeme vidět hodnoty R_m po zpevnění. V tomto případě není možnost srovnat výsledky z numerické simulace a reálného experimentu, muselo by být použito speciálních zkoušek pro zjištění pevnosti po tváření v daných místech.



Obr. 51 Hodnoty zpevnění při simulaci tažení materiálu HX 180 BD a AlMg3

10.1.5 Odpružení v ose Z (Springback in Z dir.)

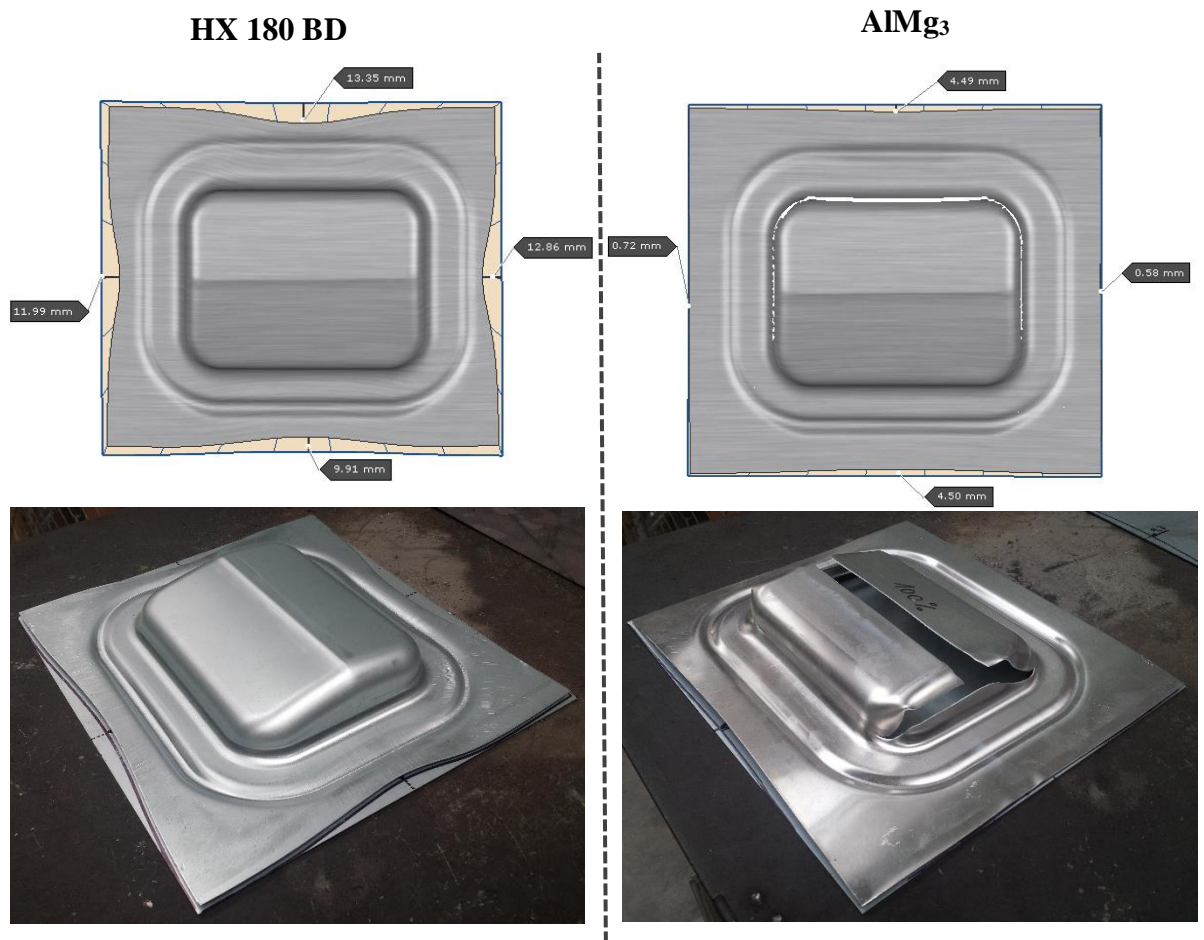
Dle obrázku č. 52 vzniká odpružení především v krajních volných částech, kde není žádný tvarový prolis. U oceli vzniká konkrétně největší odpružení v cípech rohů na okraji přístřihu. Na spodních snímcích obrázku můžeme vidět přibližné porovnání experimentu se simulací, kde jsou nafoceny z profilu reálné výlisky, tak aby bylo vidět odpružení. Při pohledu na výlisek z hliníkové slitiny je patrné, že odpružení je vysoké a nestabilní, při dotyku v tomto místě plech změní své odpružení (v tomto místě zmizí a přesune se na druhou stranu) takzvaně lupne.



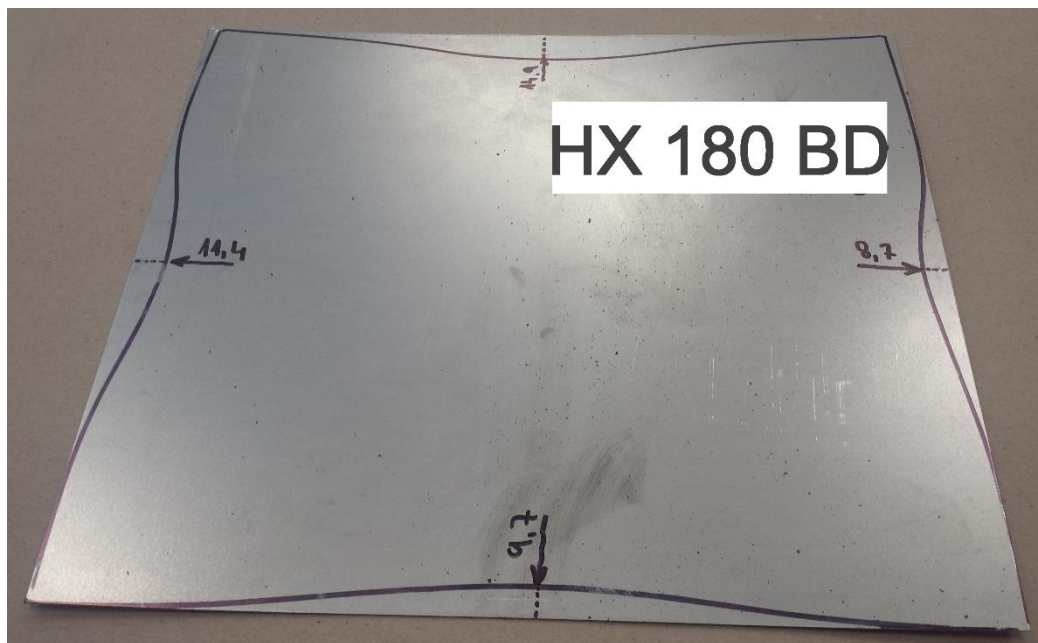
Obr. 52 Velikost odpružení v ose Z při simulaci tažení HX 180 BD a AlMg₃, reálné foto ukazující odpružení

10.1.6 Vtažení přístřihu (Draw-In)

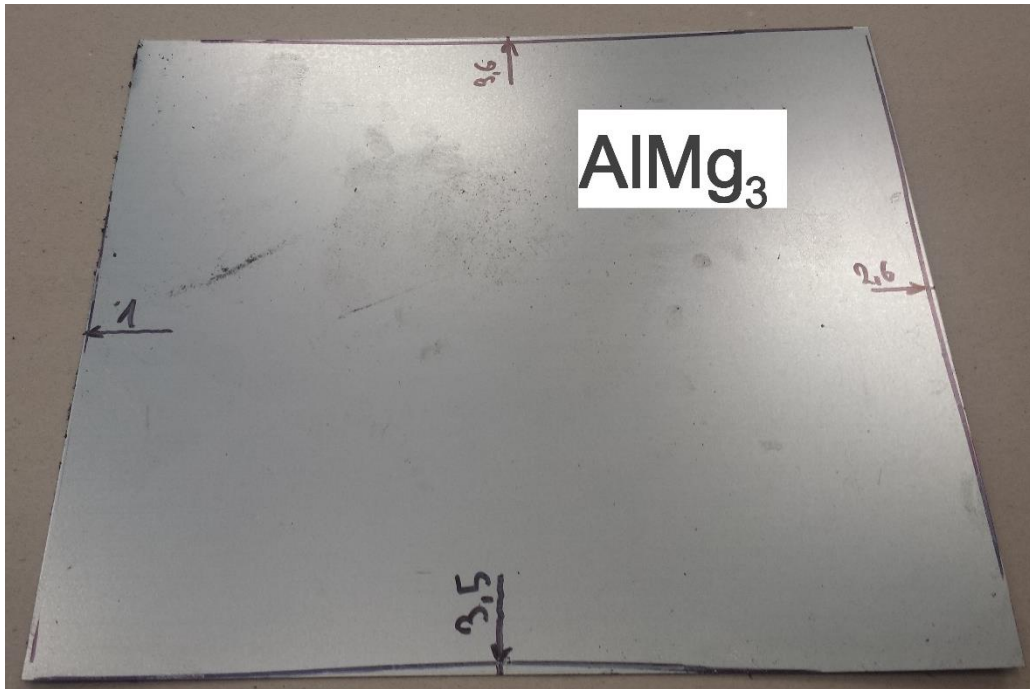
Následující obrázky zobrazují velikost vtažení materiálu do nástroje, to znamená, jsou změřeny největší výšky vtažení od původních obrysů přístřihu. Tyto křivky budou dále porovnány s měřením v experimentu, kde výšky byly orýsováním dílce na původním přístřihu změřeny za pomoci posuvného měřítka.



Obr. 53 Velikost vtažení materiálu při simulaci tažení materiálu HX 180 BD a AlMg₃



Obr. 54 Naměřené hodnoty reálného vtažení materiálu HX 180 BD



Obr. 55 Naměřené hodnoty reálného vtažení materiálu AlMg₃

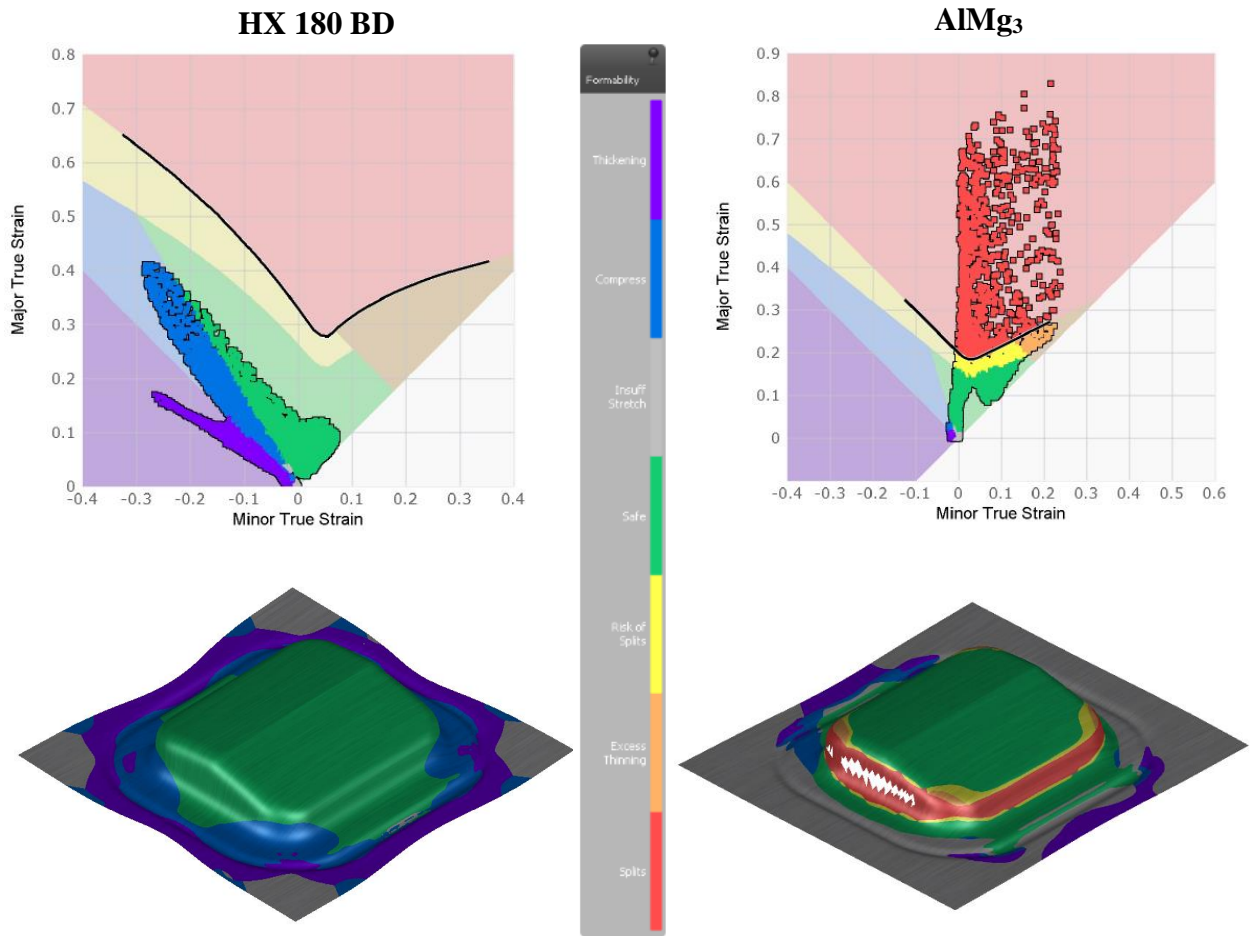
V tabulce č. 10 můžeme vidět, že v prvním případě pro materiál HX 180 BD se velikosti vtažení příliš neliší, vtažení je veliké, což značí, že materiál je dobře tvařitelný. Slitina AlMg₃ má vtažení materiálu o řád menší, materiál není tak dobře tvařitelný. U slitiny AlMg₃ se výsledky experimentu a numerické simulace liší poměrně razantně, chyba může být částečně v nepřesnosti měření nebo v nastavení numerické simulaci.

Tab. 10 Srovnání velikosti křivek vtažení pro HX 180 BD a AlMg₃ (zaokrouhлено na jedno desetinné místo)

Druh parametru	HX 180 BD		AlMg ₃	
	software	experiment	software	experiment
Vtažení levá strana [mm]	12,0	11,4	0,7	1
Vtažení pravá strana [mm]	12,9	8,7	0,6	2,6
Vtažení horní strana [mm]	13,4	14,9	4,5	9,6
Vtažení spodní strana [mm]	9,9	9,7	4,5	3,5

10.1.7 Posouzení dle diagramu FLD

Na následujícím obrázku lze vidět porovnání vybraných materiálů v diagramu mezního přetvoření FLD. Skutečné deformace oceli se nacházejí pod kritickou křivkou, vzniklé deformace nejsou nebezpečné z hlediska vzniku trhlin a porušení materiálu, jelikož ztenčení materiálu nedosahuje hodnot 0,25, nehrozí ani vznik trhlin i při kolísání mechanických hodnot materiálu. V případě hliníkové slitiny leží většina skutečných deformací v kritické oblasti nad kritickou křivkou, je jisté, že budou vznikat porušení materiálu. Na obrázku č. 56 je zobrazen pouze orientačně FLD diagram a pod ním snímky kde jsou barevně zobrazeny kritické oblasti, kompletní protokol s FLD diagramem a měřítkem je v přílohách II a III.



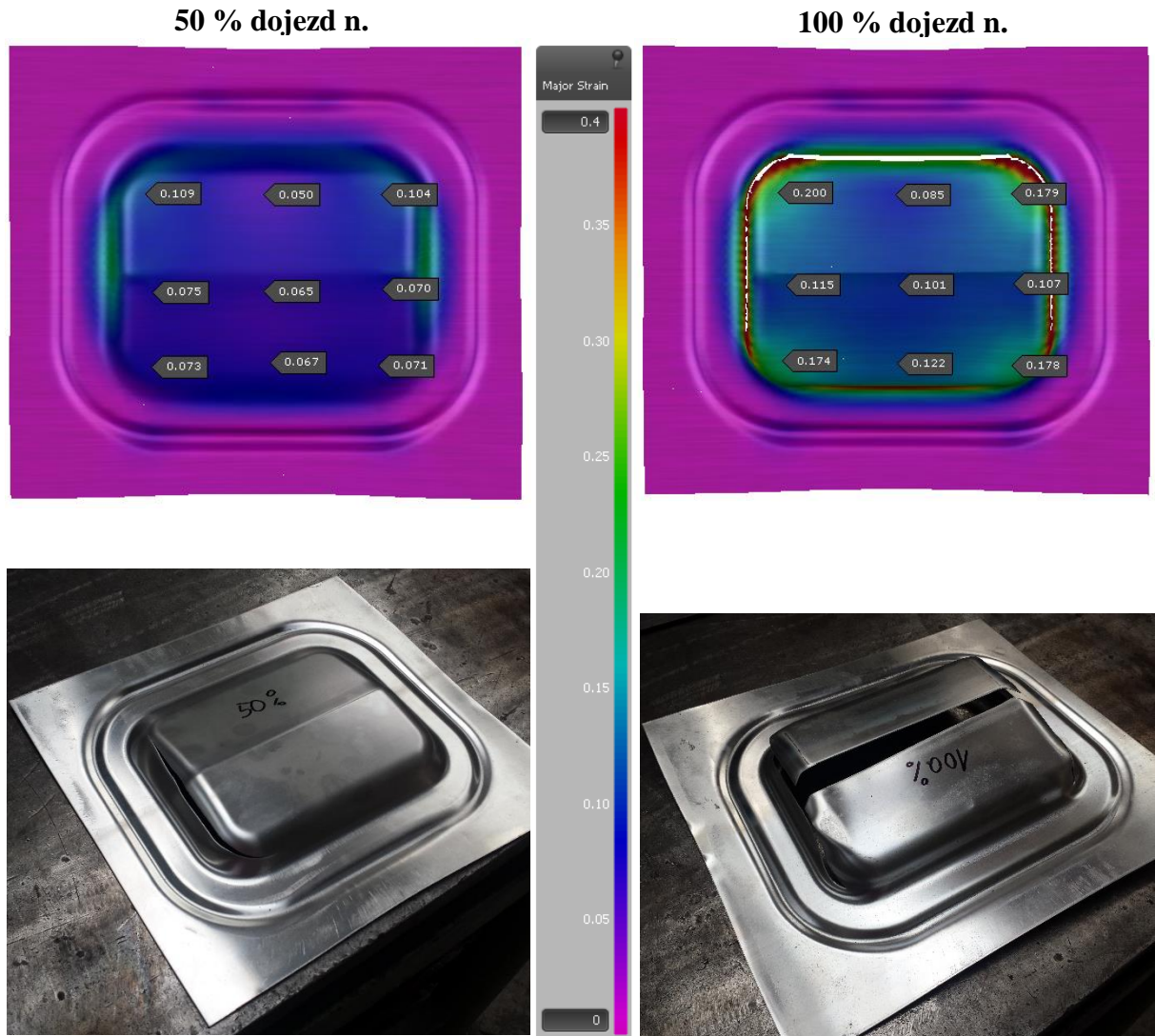
Obr. 56 Posouzení bezpečnosti z hlediska vzniku trhlin dle FLD diagramu

10.2 Porovnání lisovatelnosti materiálu AlMg₃ při 50% a 100% dojezdu nástroje

Při neúspěchu v simulaci lisování slitiny hliníku AlMg₃ je nyní snížen dojezd nástroje pouze na 50% a je zde uvedeno i porovnání se 100% dojezdem nástroje. Tento proces byl proveden i v reálném experimentu a jsou zde přiloženy fotografie pro srovnání. Dojezd nástroje 50% byl realizován pomocí podložek, které zajišťovaly maximální dojezd nástroje na stanovenou vzdálenost.

10.2.1 Analýza hlavního napětí (Major strain)

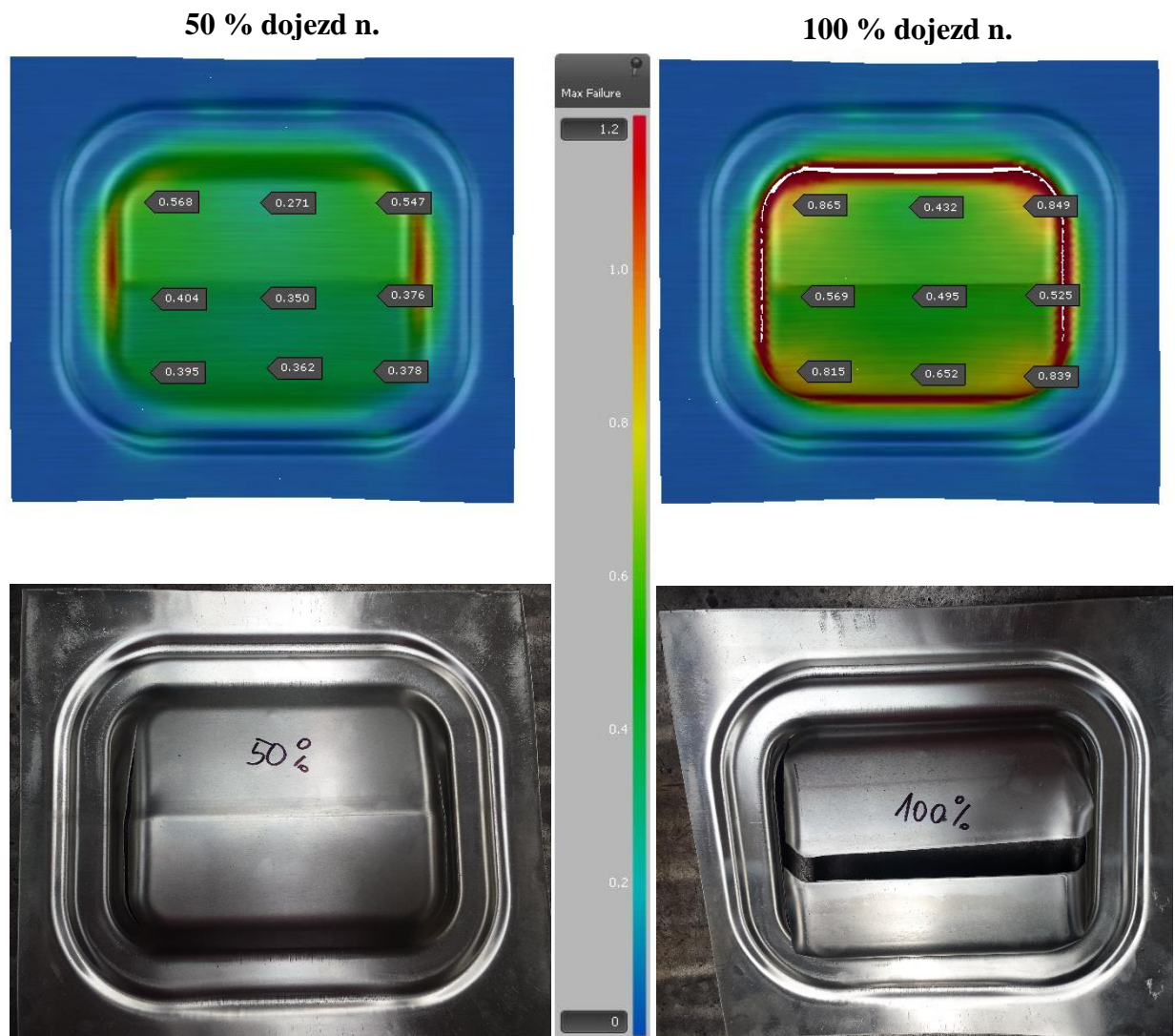
Při 50% dojezdu nástroje (na obrázcích označeno 50% dojezd n.) je nyní vidět, že hlavní napětí se nyní pohybuje v zeleném a modrém pásmu, což není kritické, oproti 100% dojezdu (na obrázcích označeno 100% dojezd n.). Na výlisku s menším dojezdem nástroje vzniká prasklina pouze na kratších stěnách tělesa, oproti roztržení výlisku, který je na obrázku vpravo dole.



Obr. 57 Porovnání hlavního napětí při simulaci tažení $AlMg_3$ (50% a 100% dojezdu nástroje)

10.2.2 Analýza maximální deformace (Maximum failure)

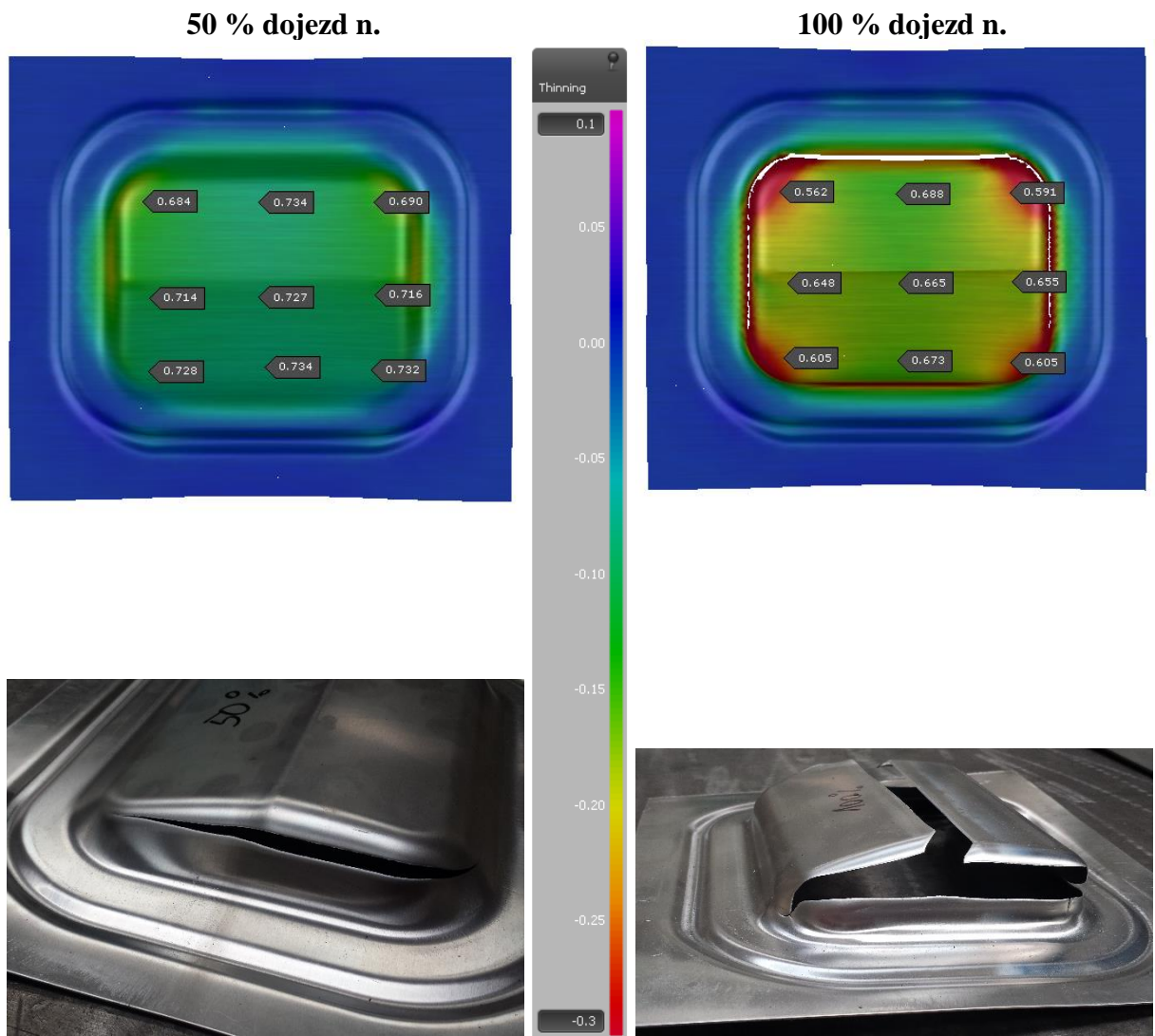
Při menším dojezdu nástroje se tato varianta jeví jako téměř optimální, avšak červené pásmo na bocích značí možnost vzniku trhlin, jak je tomu u reálného výlisku. Ostatní části výlisku se pohybují v dovolených pásmech deformace (modrá a zelená).



Obr. 58 Porovnání maximální deformace při simulaci tažení $AlMg_3$ (50% a 100% dojezdu nástroje)

10.2.3 Analýza ztenčení (Thinning)

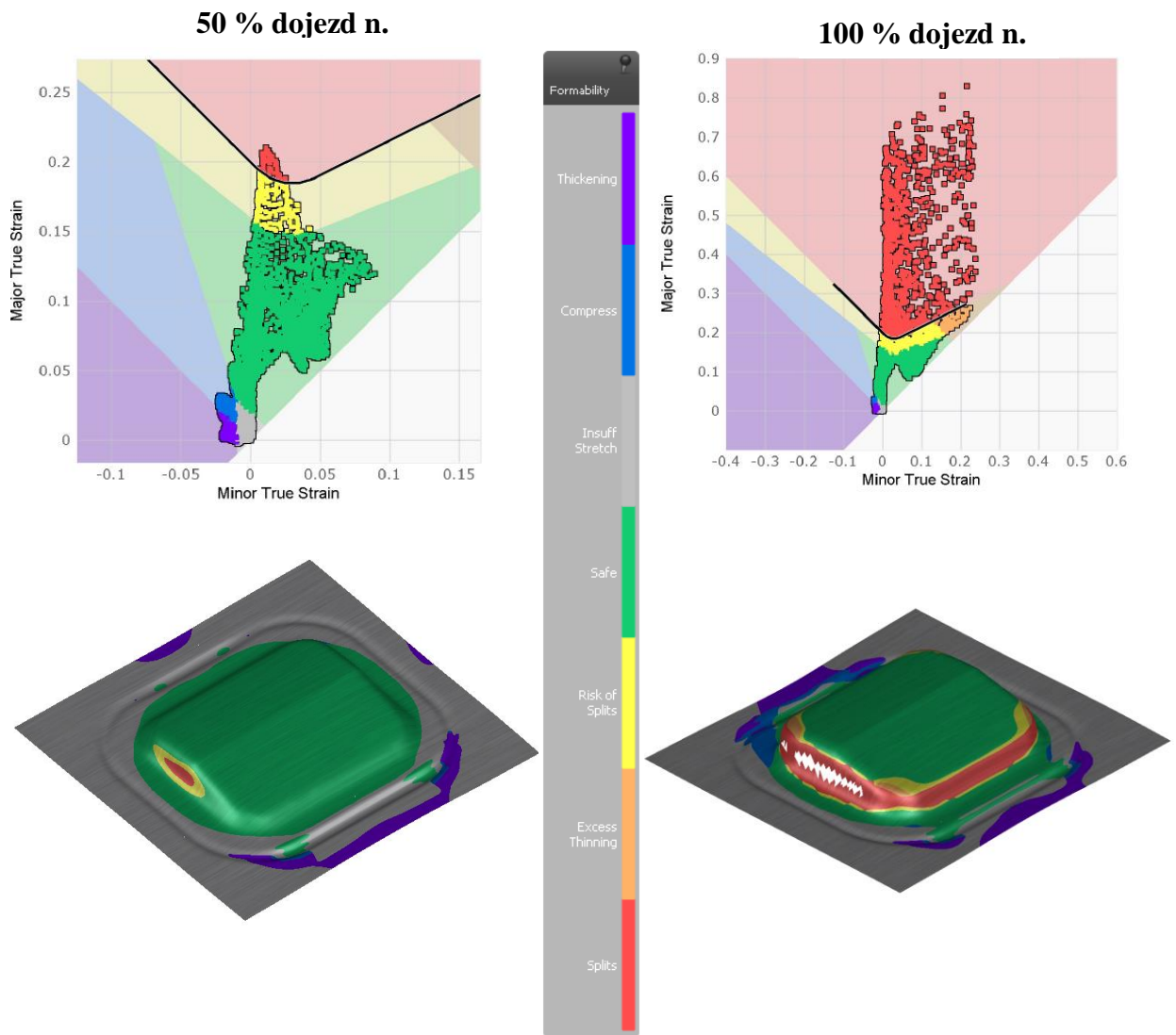
Při 50 % dojezdu nástroje nedochází ke kritickému ztenčení plechu, plech se ztenčí maximálně o 0,2 mm a neměly by vzniknout nějaké viditelné trhliny, až na boční roztržení, které už je popsáno v předchozích kapitolách. Na obrázku č. 59 jsou vidět ve spodní části detaily roztržených částí.



Obr. 59 Porovnání ztenčení při simulaci tažení AlMg3 (50% a 100% dojezdu nástroje)

10.2.4 Posouzení dle diagramu FLD

Na levé straně obrázku č. 60 je vidět, že většina skutečných deformací je pod kritickou křivkou v FLD diagramu, to snižuje riziko výskytu nepříznivých deformací a tím snižuje riziko vzniku trhlin, malá část v FLD diagramu se nachází v červeném poli, to vyjadřuje výskyt prasklin. Ve spodní části obrázku jsou pak barevně zobrazeny kritické části výlisku. FLD diagram pro hliníkovou slitinu s 50% dojezdu se všemi náležitostmi je v příloze V.



Obr. 60 Porovnání deformací v FLD diagramu při simulaci tažení $AlMg_3$ (50% a 100% dojezdu nástroje)

10.3 Zhodnocení experimentu

Experiment ukázal, že existují odchylky od numerických simulací provedených v softwaru Autoform R6. Především v tažení při 100 % dojezdu nástroje software nezaznamená vůbec vznik trhliny v oblasti tornado linie, na reálném výlisku je však v celé délce. Ani změny různých parametrů v numerické simulaci (úprava přidržení, tvar brzdících drážek, velikost přístřihu) nepomohly tomu, aby se dosáhlo stejného stavu (roztržení v oblasti tornado linie) jako na reálném výlisku. Výsledky experimentu a návrhy optimalizace budou dále zmíněny v závěru práce. Následují obrázky, které ukazují výsledky experimentu, vylisované nasíťované výlisky a poškozené výlisky z hliníkové slitiny.



Obr. 61 Pohled na výlisek z materiálu HX 180 BD



Obr. 62 Detail nanesené sítě na výlisku z materiálu HX 180 BD



Obr. 63 Vylisek z materiálu HX 180 BD s nanesenou sítí



Obr. 64 Vylisek z materiálu AlMg₃ (100% dojezdu nástroje)



Obr. 65 Výlisek z materiálu AlMg₃ (50% dojezdu nástroje)

11 Závěr

V diplomové práci byl přiblížen lisovací proces se zaměřením především na tažení plechů, jak v teoretické tak v praktické části. V teoretické části byly zmíněny procesy, které se uskutečňují při lisování reálného výlisku, dále byla popsána tvařitelnost materiálu se zaměřením především na materiálovou tvařitelnost a byl uveden přehled materiálů pro výlisky v automobilovém průmyslu. V praktické části pak návrh experimentu pro porovnání lisovatelnosti dílců z ocelového materiálu HX 180 BD a hliníkové slitiny AlMg₃, vyhodnocení experimentu společně s výsledky ze simulace, porovnání a zjištění odchylek.

Oproti oceli mají hliníkové slitiny z několika aspektů při hodnocení tvařitelnosti nevýhody, že se hůře tváří (mají horší tvařitelnost) a mohou být více náchylné na vyčerpání plasticity. Proto byl zvolen materiál slitiny hliníku s větší tloušťkou, protože již před experimentem bylo očekáváno, že tažení slitiny hliníku bude problematictější než tažení oceli.

Výsledky experimentu a numerických simulací provedených v simulačním softwaru AutoForm R6 se ve většině případů shodují, liší se pouze při vyhodnocení hliníkové slitiny při 100 % dosednutí nástroje a mírně i při 50 % dojezdu nástroje. Odchytky jsou především v oblasti tornado linie, kde simulační software nezaznamenal žádný kritický stav, který by měl vést ke vzniku trhlin, avšak při reálném experimentu byl materiál v oblasti tornado linie porušen velkou souvislou prasklinou. Odchytky by pravděpodobně mohly být způsobeny tloušťkou materiálu hliníkové slitiny, kde tento materiál má tloušťku 0,8 mm oproti 0,65 mm ocelovému materiálu, na který jsou konstruovány veškeré vŭle v nástroji. Pravděpodobnější variantou se jeví ustřížení plechu na tornado linii díky této ostré hraně, napětí v této části není tak vysoké, aby ho software vyhodnotil, že by mohlo být nějakým způsobem kritické, ale hrana je dost ostrá na to, aby v tomto případě zafungovala jako břit a dokázala materiál ustříhnout. V případě 50% dojezdu nástroje u hliníkové slitiny software předpokládá, že by praskliny mohly na kratších bocích tělesa vzniknout, znázorňuje je červeně, tedy s vysokou pravděpodobností, že trhlina vznikne. Na reálném výlisku praskliny vzniknou. Rozdíly jsou v předpokládaném rozsahu poškození (reálně má výlisek větší poškození) a mohly by být opět ve vŭlích nástroje, nebo že software předpokládá menší napětí než ve skutečnosti je. Pokud budeme srovnávat samotné vtažení materiálu v simulaci a při experimentu u oceli jsou výsledky pouze s malými odchylkami, u hliníkové slitiny jsou odchylky větší a ty mohou být důsledkem výše popsaného různého chování v simulaci a v experimentu.

Jak již bylo řečeno nejkritičtější pásma namáhání, kde následně dochází k prasklinám, se vyskytují na kratších bocích tělesa a následně na tornado linii. Nápravným opatřením při zachování materiálu a geometrie nástroje pro výlisek ze slitiny hliníku by mohlo být: snížení tlaku přidržovače, změna tvaru brzdící drážky v kritických úsecích (snížení výšky drážky, zvětšení rádiusu), snížení koeficientu tření mezi přístřihem a přidržovačem kvalitnějším mazivem. Při lisování ocelového výlisku žádné praskliny nevznikly, povrch byl kvalitní bez vyboulenin, poškrábání, promáčklín s výraznou ostrou hranou (tornado linie) bez poškození. Jediná kritická místa, kde došlo pouze ke snížení tloušťky materiálu o 15 %, jsou ve vrcholových rozích výlisku. Pro optimalizaci by se v těchto místech mohl změnit tvar brzdící drážky, avšak mohlo by to mít i negativní důsledek, že by se materiál dostatečně nevypnul a v těchto místech by se zvlnil.

V automobilovém průmyslu se neustále inovuje spousta věcí. Nejinak je to i s volbou materiálu na automobilovou karoserii. Pokud se budou hliníkové slitiny na stavbu karoserie používat, tak je nutné vzhledem k těmto zjištěním získat více zkušeností s tvářením tohoto materiálu a více provádět reálné experimenty a porovnávat je s výsledky ze simulací.

12 Seznam použitých informačních zdrojů

- [1] FABÍK, Richard. *Tváření kovů*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012, 1 DVD-ROM. ISBN 9788024825724.
- [2] DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. Vyd. 5., V Akademickém nakladatelství CERM 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013, 169 s. ISBN 9788021447479.
- [3] BŘEZINA, Richard a Jiří PETRUŽELKA. *Úvod do tváření II*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2002, 113 s. ISBN 8024800683.
- [4] Technologie tváření kovů. *Technologie II* [online]. Liberec, 2008 [cit. 2016-02-21]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/obsah.htm
- [5] ČADA, Radek. *Technologie tváření a slévání - teoretický základ: Tažení složitých výtahů*. 1. vyd. Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3015-5.
- [6] CHALOUPECKÝ, Petr. *Konstrukce a výroba karosářského lisovacího nářadí*. 2013.
- [7] SVITÁK, Martin. *Návrh technologie výroby plechového dílce karoserie automobilu*. Brno, 2009.
- [8] BOLJANOVIC, Vukota. *Sheet metal forming processes and die design*. 1. vyd. New York: Industrial Press, 2004, xix, 219 p. ISBN 0831131829.
- [9] VRBKA, Martin a Michal VAVERKA. *Metoda konečných prvků*. 2006.
- [10] *Numerické simulace v oblasti plošného tváření*. Praha, 2013.
- [11] *Návrh formy pro hluboké tažení plechů* [online]. Praha, 2001 [cit. 2016-04-08]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/navrh-formy-pro-hlubo-ke-tazeni-plechu.html>
- [12] *AutoForm* [online]. 2016 [cit. 2016-04-08]. Dostupné z: <http://www.autoform.com/en/>
- [13] TATÍČEK, František, Tomáš PILVOUSEK a Martin KUBELKA. *Akademie tváření: Odpružení v plošném tváření*. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2011, (5) [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-odpruzeni-v-plosnem-tvareni.html>
- [14] PETRUŽELKA, Jiří a Pavel SONNEK. *Tvařitelnost kovových materiálů*. 3. vyd. Ostrava, 2007.

- [15] *MCAE: 3D digitální technologie* [online]. b.r. [cit. 2016-04-08]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/>
- [16] SOLFRONK, Pavel a Tomáš JÍRA. *Využití optického systému argus 4M v kritických oblastech karosářského výlisku* [online]. Rožnov pod Radhoštěm, 2010 [cit. 2016-06-30]. Dostupné z: http://konsys-t.tanger.cz/files/proceedings/metal_10/lists/papers/150.pdf
- [17] DAVIES, Geoff. *Materials for automobile bodies*. 1. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003. ISBN 0 7506 5692 1.
- [18] Technologie tailored blanks. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2002, (7) [cit. 2016-06-15]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-tailored-blanks.html>
- [19] SOLFRONK, Pavel. *Teorie a technologie zpracování plechů: Materiály pro stavbu karoserie automobilu*. Liberec, 2013.
- [20] *High-strength IF steels HX*. Duisburg, 2013.
- [21] *Automotive Trends in Aluminum, The European Perspective: Part One* [online]. 2005 [cit. 2016-06-27]. Dostupné z: <http://www.totalmaterial.com/Article135.htm>
- [22] *PROAL: Hliník AlMg3* [online]. 2009 [cit. 2016-08-10]. Dostupné z: <http://www.proal.cz/info/424413.htm>
- [23] *ALFUN: Hliníkové plechy a pásy* [online]. b.r. [cit. 2016-08-10]. Dostupné z: <http://www.alfun.cz/plechy-a-pasy>
- [24] Plasty stále žádanější při stavbě automobilů. *Technický týdeník* [online]. 2006 [cit. 2016-06-27]. Dostupné z: http://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/plasty-stale-zadanejsi-pri-stavbe-automobilu_13275.html
- [25] NOVÁ, Iva a Jiří MACHUTA. Výrobky z hliníkové pěny. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2007, (12) [cit. 2016-06-27]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vyrobky-z-hlinikove-peny.html>
- [26] KALPAKJIAN, Serope a Steven SCHMID. *Manufacturing processes for engineering materials* [online]. 5th ed. Upper Saddle River, N.J.: Pearson Education, 2008, xxi, 1018 p. [cit. 2016-06-30]. ISBN 0132272717. Dostupné z: https://www3.nd.edu/~manufact/MPEM_pdf_files/Ch07.pdf
- [27] *Život s autem* [online]. 2010 [cit. 2016-03-18]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/do/ped/kat/fyzika/autem/pages/vyroba.html>

-
- [28] ABISHEK, Bandagar a Patel JUNED. *Drawing Processes in Manufacturing* [online]. 2015 [cit. 2016-03-20]. Dostupné z: <http://www.slideshare.net/pateljy/drawing-processes-in-manufacturing>
- [29] Deepdrawing. *Huetink.nl* [online]. 2012 [cit. 2016-03-20]. Dostupné z: <http://huetink.nl/www3/dieka/deepdrawing/index.html>
- [30] *Manufacturingscience* [online]. 2013 [cit. 2016-03-20]. Dostupné z: http://manufacturingscience.asmedigitalcollection.asme.org/data/Journals/JMSEFK/928605/manu_136_01_011006_f016.png
- [31] *Caradvice* [online]. 2015 [cit. 2016-03-29]. Dostupné z: <http://s3.caradvice.com.au/thumb/770/382/wp-content/uploads/2014/12/skoda-superb-sketch-front.jpg>
- [32] *Metal forming magazine* [online]. b.r. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://www.metalformingmagazine.com/>
- [33] TATÍČEK, František a Tomáš PILVOUSEK. *Akademie tváření: Ohýbání* [online]. 2010, (7) [cit. 2016-06-02]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-ohybani.html>

13 Seznam obrázků

<i>Obr. 1 Požadavky na automobil [19], [31] (upraveno)</i>	11
<i>Obr. 2 Materiálové složení vozu Škoda Octavia 1,9 TDi, 74 kW, 1363 kg, rok výroby od roku 2005 [27]</i>	13
<i>Obr. 3 Schéma jednoduchého tažení, základní pojmy [28] (upraveno)</i>	14
<i>Obr. 4 Tahový nástroj pro vnější a vnitřní postranici automobilu [6]</i>	15
<i>Obr. 5 Schéma rozložení napětí a deformace při prostém tažení [3]</i>	16
<i>Obr. 6 Princip ohýbání s vyznačeným napětím [33]</i>	16
<i>Obr. 7 Schéma stříhání s rovnoběžnými noži a závislost síly na tloušťce materiálu [3]</i>	17
<i>Obr. 8 Rozbor napětí při tažení válcového a čtyřhranného výtazku [2]</i>	18
<i>Obr. 9 3D Metodický plán pro postranici vnější [6]</i>	19
<i>Obr. 10 Poloměr zaoblení rohů pro situace a), b), c) [8] (upraveno)</i>	21
<i>Obr. 11 Tvar přístřihu pro bočnici automobilu [6]</i>	22
<i>Obr. 12 Tvar prvků sítě pro MKP [9]</i>	23
<i>Obr. 13 Druhy elementů používaných při MKP [10]</i>	24
<i>Obr. 14 3.) vygenerovaný povrch, 2.) 3D originální 3D model 1.) model formy (matrice) [12]</i>	25
<i>Obr. 15 Přístřih, simulační model a reálný model výrobku [12]</i>	25
<i>Obr. 16 Prasklina v nejnamáhanějších místech výtazku [26] (upraveno)</i>	28
<i>Obr. 17 Vznik lokalizovaného krčku [14]</i>	28
<i>Obr. 18 Zvlnění na kruhových výtazcích reálné a v simulaci [30] (upraveno)</i>	29
<i>Obr. 19 Zvlnění na dveřích automobilu (vyznačeno červeně) [29] (upraveno)</i>	29
<i>Obr. 20 Odpružení v závislosti na pevnosti materiálu [32]</i>	30
<i>Obr. 21 Umístění vzorků v závislosti na směru válcování, směry anizotropie [14]</i>	32
<i>Obr. 22 Vliv exponentu zpevnění n_m na tažný poměr K [14]</i>	33
<i>Obr. 23 Hodnocení tvařitelnosti podle Lileta [14]</i>	34
<i>Obr. 24 Vliv poměru R_e/R_m na mezní stupeň tažení podle Polláka [14]</i>	35
<i>Obr. 25 Keeler-Goodwinův diagram ve skutečných deformacích [14]</i>	36
<i>Obr. 26 Limitní křivky v FLD diagramu pro různé tloušťky materiálu (vlevo) a pro různé meze kluzu (vpravo) [14]</i>	37
<i>Obr. 27 Limitní křivky v FLD diagramu pro různé druhy materiálů [14]</i>	37
<i>Obr. 28 Stanovení velikosti logaritmické deformace [2] (upraveno)</i>	38
<i>Obr. 29 Systém ARGUS a jeho příslušenství [15]</i>	39

Obr. 30 Vyhodnocování pomocí systému Argus [15].....	40
Obr. 31 Vlastnosti ocelí používaných v automobilovém průmyslu [19]	41
Obr. 32 Princip technologie tailored blanks [19]	42
Obr. 33 Relativní a absolutní podíl použití Al slitin na vybraných druzích automobilů [21] ..	43
Obr. 34 Sendvičové materiály [19]	45
Obr. 35 Výztuha prahu Ferrari z pěnového hliníku ALULIGHT [25]	45
Obr. 36 Tažník a brzdící drážka (pohled šikmo zespoda)	47
Obr. 37 Tažník a brzdící drážka (pohled šikmo shora)	48
Obr. 38 Detail čela tažníku, pohled na tornado linii (vyznačeno červeně)	48
Obr. 40 Uzavření přístřihu přidržovačem	49
Obr. 39 Sestavení nástroje (matrice+přidržovač+tažník) v programu AutoForm.....	49
Obr. 41 Sestava tažného zkušebního nástroje na lise PYE 250 S.....	50
Obr. 42 Detail matrice tažného zkušebního nástroje	50
Obr. 43 3D data nástroje (vlevo tažník + základna, vpravo přidržovač + matrice)	51
Obr. 44 Detail tažníku tažného zkušebního nástroje.....	51
Obr. 45 Grafická závislost $R_m-\epsilon$, vyjádření součinitele plastické anizotropie, FLD diagram pro HX 180 BD.....	52
Obr. 46 Grafická závislost $R_m-\epsilon$, vyjádření součinitele plastické anizotropie, FLD diagram pro AlMg ₃	52
Obr. 47 Kruhová síť nanesená na přístřihu.....	53
Obr. 48 Porovnání hlavního napětí při simulaci tažení HX 180 BD a AlMg ₃ , srovnání se systémem Argus pro HX 180 BD, foto deformace hliníkového dílu.....	55
Obr. 49 Porovnání maximální deformace při simulaci tažení HX 180 BD a AlMg ₃ a reálné foto výlisků	56
Obr. 50 Porovnání ztenčení při simulaci tažení HX 180 BD a AlMg ₃ , srovnání se systémem Argus pro HX 180 BD, detail roztržení výlisku materiálu AlMg ₃	57
Obr. 51 Hodnoty zpevnění při simulaci tažení materiálu HX 180 BD a AlMg ₃	58
Obr. 52 Velikost odpružení v ose Z při simulaci tažení HX 180 BD a AlMg ₃ , reálné foto ukazující odpružení	59
Obr. 53 Velikost vtažení materiálu při simulaci tažení materiálu HX 180 BD a AlMg ₃	60
Obr. 54 Naměřené hodnoty reálného vtažení materiálu HX 180 BD	60
Obr. 55 Naměřené hodnoty reálného vtažení materiálu AlMg ₃	61
Obr. 56 Posouzení bezpečnosti z hlediska vzniku trhlin dle FLD diagramu.....	62

<i>Obr. 57 Porovnání hlavního napětí při simulaci tažení AlMg₃ (50% a 100% dojezdu nástroje)</i>	63
<i>Obr. 58 Porovnání maximální deformace při simulaci tažení AlMg₃ (50% a 100% dojezdu nástroje)</i>	64
<i>Obr. 59 Porovnání ztenčení při simulaci tažení AlMg₃ (50% a 100% dojezdu nástroje)</i>	65
<i>Obr. 60 Porovnání deformací v FLD diagramu při simulaci tažení AlMg₃ (50% a 100% dojezdu nástroje)</i>	66
<i>Obr. 61 Pohled na výlisek z materiálu HX 180 BD</i>	67
<i>Obr. 62 Detail nanesené sítě na výlisku z materiálu HX 180 BD</i>	67
<i>Obr. 63 Výlisek z materiálu HX 180 BD s nanesenou sítí</i>	68
<i>Obr. 64 Výlisek z materiálu AlMg₃ (100% dojezdu nástroje)</i>	68
<i>Obr. 65 Výlisek z materiálu AlMg₃ (50% dojezdu nástroje)</i>	69

14 Seznam tabulek

<i>Tab. 1 Mazací prostředky pro technologii tažení [8] (upraveno)</i>	27
<i>Tab. 2 Chemické složení oceli HX 180 (vyjádřeno v hmotnostních %) [20]</i>	43
<i>Tab. 3 Mechanické vlastnosti oceli HX 180 [20]</i>	43
<i>Tab. 4 Chemické složení hliníkové slitiny AlMg₃ (vyjádřeno v hmotnostních %) [22]</i>	44
<i>Tab. 5 Mechanické vlastnosti slitiny hliníku AlMg₃ [23]</i>	44
<i>Tab. 6 Parametry lisu PYE 250 S</i>	46
<i>Tab. 7 Materiálové charakteristiky HX 180 BD z knihovny materiálů AutoForm R6</i>	52
<i>Tab. 8 Materiálové charakteristiky AlMg₃ z knihovny materiálů AutoForm R6</i>	52
<i>Tab. 9 Procesní parametry simulace</i>	53
<i>Tab. 10 Srovnání velikosti křivek vtažení pro HX 180 BD a AlMg₃ (zaokrouhleno na jedno desetinné místo)</i>	61

15 Rejstřík symbolů

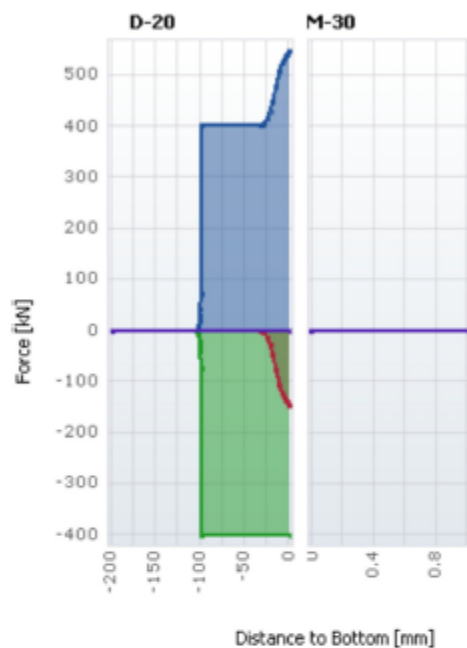
c	[-]	součinitel (0,005 – 0,035)
R_b	[mm]	poloměr přechodu stěny do dna,
R_e	[mm]	rohový poloměr
R	[mm]	navrhované redukované zaoblení
R_B	[mm]	poloměr zaoblení rohové části krabice
h	[mm]	výška výtažku
h_{kr}	[mm]	kritická hloubka výtažku
$h_{výt}$	[mm]	hloubka výtažku
m_{kr}	[-]	kritický součinitel tažení
m_{skut}	[-]	skutečný součinitel tažení
b_0	[mm]	výchozí šířka zkušební tyče
b	[mm]	šířka zkušební tyče po 20% plastické deformaci v tahu
s_0	[mm]	výchozí tloušťka zkušební tyče
s	[mm]	tloušťka zkušební tyče po 20% plastické deformaci v tahu
r_m	[-]	součinitel plastické anizotropie
r_0	[-]	souč. plastické anizotropie ve směru válcování plechu
r_{45}	[-]	s. pl. anizotropie ve směru 45° od směru válcování plechu
r_{90}	[-]	s. pl. anizotropie ve směru 90° od směru válcování pl.
$r_{0/20}$	[-]	s. pl. anizotropie ve sm. válcování při 20% deformaci
$R_{p0,2}$	[MPa]	smluvní mez kluzu
$R_{p0,2}(0^\circ)$	[MPa]	smluvní mez kluzu ve směru válcování plechu
$R_{p0,2}(\alpha^\circ)$	[MPa]	s. mez kluzu ve sm. o zvol. úhlu od sm. válcování plechu






R_m	[MPa]	mez pevnosti
φ	[-]	skutečná logaritmická deformace
φ_1	[-]	hlavní logaritmická deformace
φ_2	[-]	vedlejší logaritmická deformace
d	[mm]	průměr kružnice
l_1	[mm]	délka hlavní poloosy elipsy
l_2	[mm]	délka vedlejší poloosy elipsy
σ	[MPa]	skutečné napětí
n, n_m	[-]	exponent deformačního zpevnění
n_{10-20/A_g}	[-]	exponent def. zpevnění stanovený mezi 10 a 20 % pl. deformace, s homogenní tažností <20 %
E	[MPa]	Youngův modul pružnosti v tahu
A_g	[%]	homogenní tažnost materiálu
A_{80}	[%]	tažnost materiálu na zkušební tyčce o délce 80 mm
$A_{50 (t=0,5-1,5mm)}$	[%]	tažnost materiálu na zkušební tyčce o délce 50 mm, pro tloušťku plechu 0,5 – 1,5 mm
FLD		forming limit diagram (diagram mezních deformací)

16 Seznam příloh

[Příloha I] – Diagram sil při tažení oceli HX 180 BD

Forces Diagram - Overview



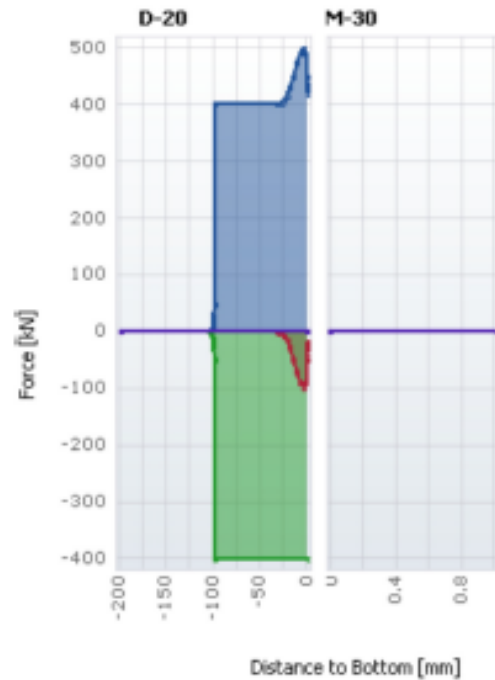
Tool Name		Max Force
D-20		
Die		545.8 kN
Punch		145.8 kN
Binder		400.0 kN
Weight		4 N
M-30		
Weight		4 N






ZKUSEBNI_NASTROJ_R10_CVUT_3D_HX180.afd



[Příloha II] – Diagram sil při tažení hliníkové slitiny AlMg₃

Forces Diagram - Overview

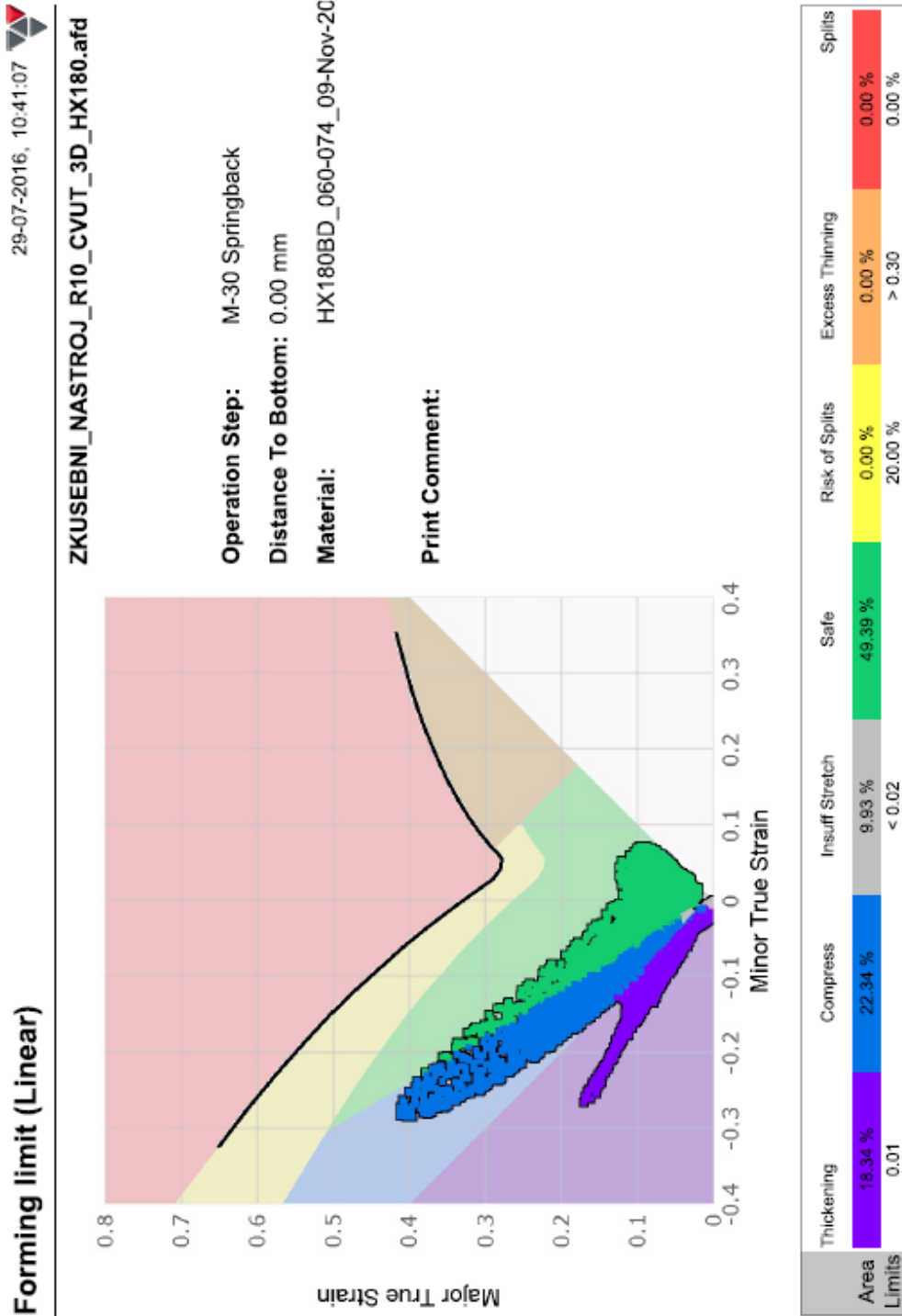


Tool Name		Max Force
D-20		
Die		498.6 kN
Punch		98.6 kN
Binder		400.0 kN
Weight		1 N
M-30		
Weight		1 N

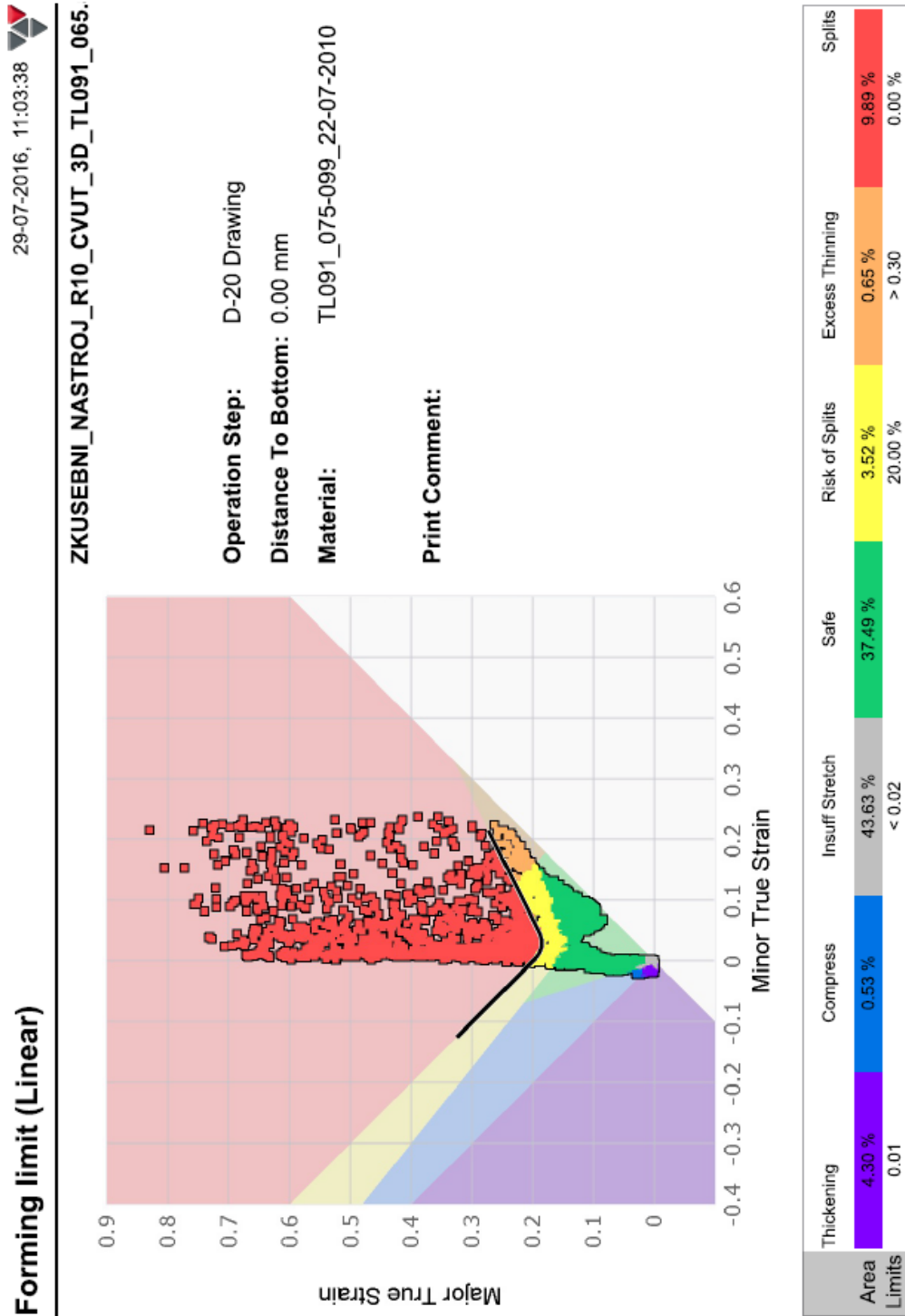
ZKUSEBNI_NASTROJ_R10_CVUT_3D_TL091_065.afd



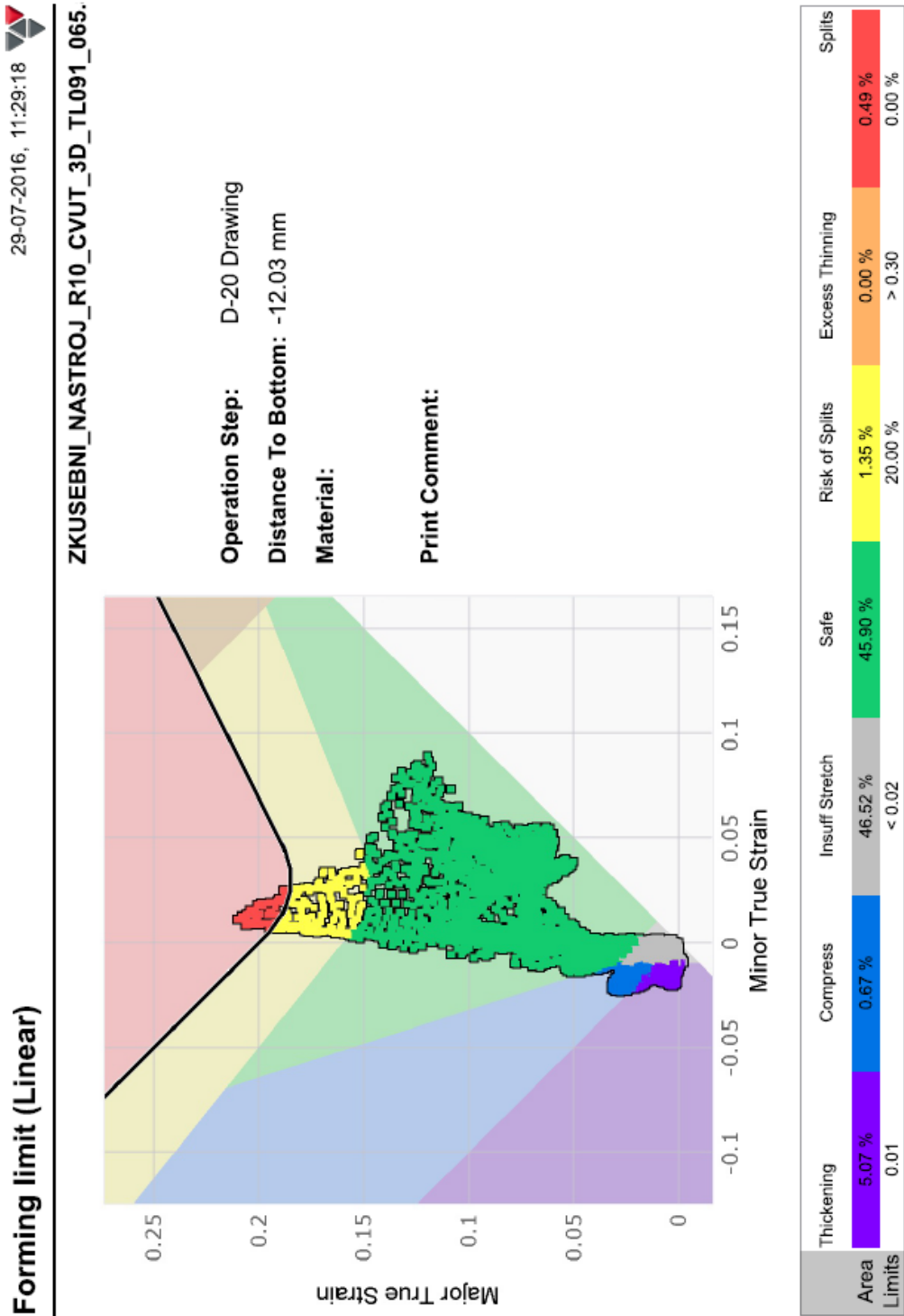
[Příloha III] – FLD diagram a zobrazení skutečných deformací pro HX 180 BD



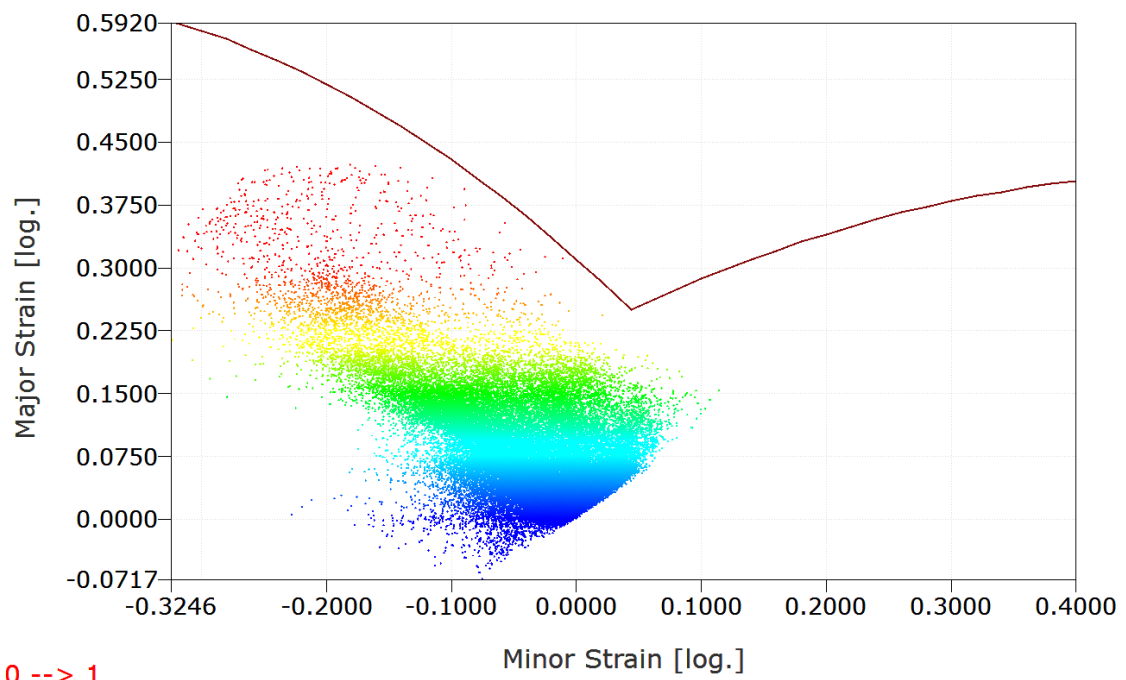
[Příloha IV] – FLD diagram a zobrazení skutečných deformací pro AlMg₃



[Příloha V] – FLD diagram a zobrazení skutečných deformací pro AlMg₃ (50% dojezdu)

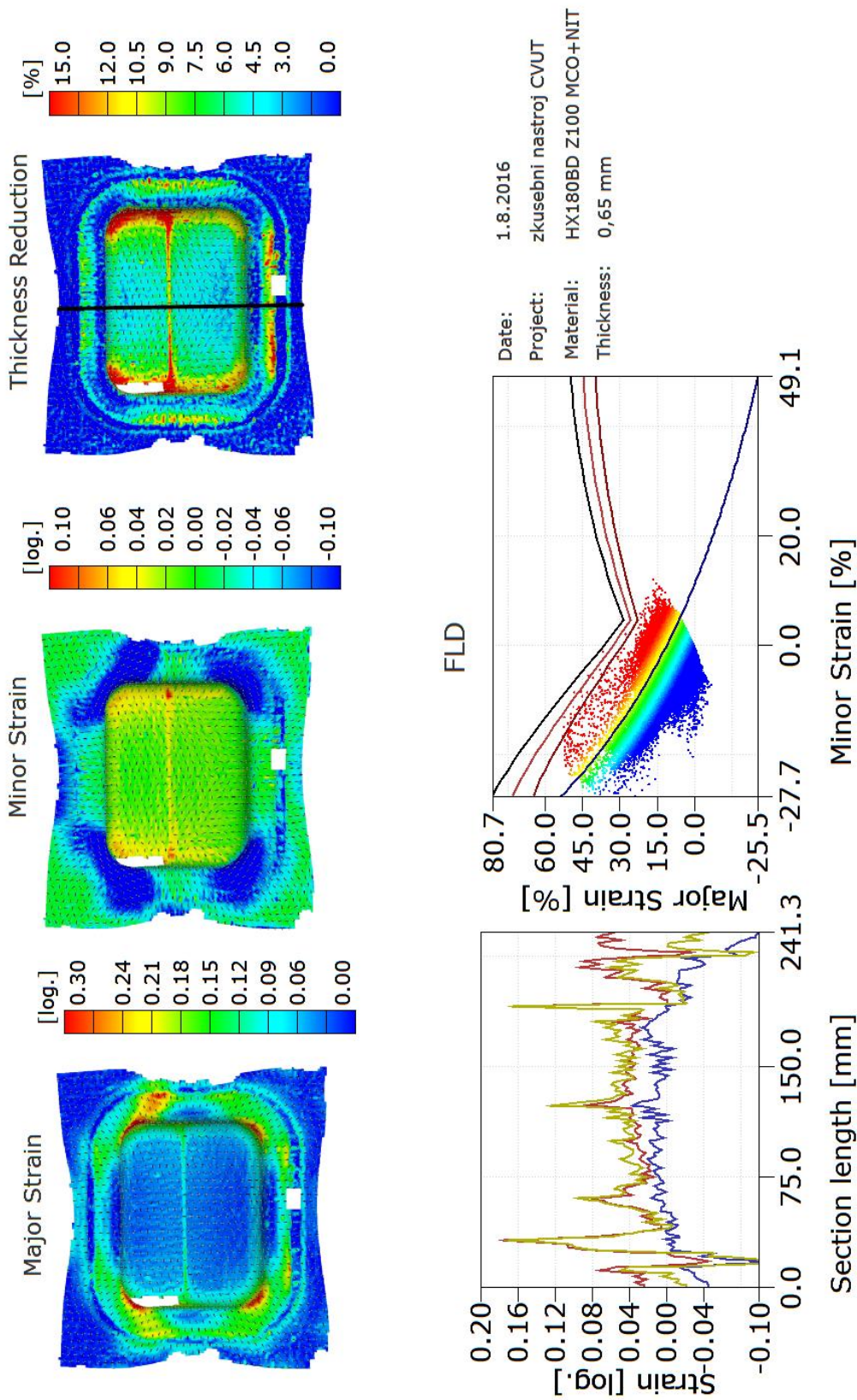


[Příloha VI] – FLD diagram pro HX 180 BD vyhodnocen reverzně dle systému Argus



ARGUS SKODA AUTO 1.8.2016 **gom** www.gom.com

[Příloha VII] – Výsledná zpráva ze systému Argus pro HX 180 BD



SKODA AUTO

1.8.2016

gom
www.gom.com

ARGUS