



Možnost aplikace vysoko-pevnostních materiálů pro povrchové výlisky karoserie automobilu

Diplomová práce

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie a materiály

Autor práce: **Bc. Zbyněk Růžička**
Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Zbyněk Růžička**
Osobní číslo: **S14000299**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie a materiály**
Název tématu: **Možnost aplikace vysoko-pevnostních materiálů pro povrchové
výlisky karoserie automobilu**
Zadávající katedra: **Katedra strojírenské technologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Analýza současného stavu problematiky použití různých typů materiálů pro konstrukci karoserie automobilu (přehled typů materiálů, zpracovatelnost jednotlivých typů materiálů, dosažitelné přesnosti rozměrovosti dílů, atd.).
2. Využití numerických simulací tváření plechu pro návrh tvaru výlisku.
3. Experimentální zjištění materiálových dat nutných pro numerickou simulaci výroby výlisku z plechu.
4. Numerická simulace tváření zvoleného výlisku.
5. Deformační analýza zvoleného výlisku při použití vysoko pevnostního materiálu.
6. Vyhodnocení.
7. Závěr.

Rozsah grafických prací: **tabulky, grafy**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 50 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


- [1] DAVIES, G. *Materials for Automobile Bodies*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003. s. 277. ISBN 0-7506-5692-1.
[2] ASM HANDBOOK. *Volume 14, Metalworking: Sheet Forming*. 2nd ed. Materials Park: ASM International, 2006. s. 924. ISBN-10: 0-87170-710-1.
[3] HERTZBERG, R.W. *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*. 4th ed. New York: John Wiley & Sons, 1996. s. 786. ISBN 0-471-01214-9.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.**
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání diplomové práce: **31. října 2015**
Termín odevzdání diplomové práce: **31. března 2017**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 2. listopadu 2015

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum

Podpis

Možnost aplikace vysoko-pevnostních materiálů pro povrchové výlisky karoserie automobilu

Possibility of application of high strength steels for the surface parts of a car body

Anotace

Tato diplomová práce pojednává o možnosti aplikačního využití vysokopevnostních materiálů pro povrchové díly karoserie automobilů, způsobu jejich testování a získávání materiálových dat pro numerické simulace tváření. Práce je rozdělena na dvě části, a to na teoretickou a experimentální část. Teoretická část je zaměřena na přehled nejčastěji používaných ocelových materiálů pro stavbu karoserie automobilu, dále pak na přehled zkoušek tvářitelnosti a technologických zkoušek lisovatelnosti. V experimentální části jsou pro zvolený dvoufázový pevnostní materiál *CR330Y590T – DP – GI60/60 – U – O* provedeny zkoušky tvářitelnosti s cílem získání materiálových charakteristik pro následné numerické simulace konkrétního dílu v prostředí PAM Stamp 2G a Autoform Plus R6. Dosažené výsledky matematického modelování výroby zvoleného výlisku jsou konfrontovány s praktickým lisováním. Na základě získaných výsledků jsou formulovány závěry a doporučení pro další výzkum v této oblasti.

Klíčová slova: plechy v automobilovém průmyslu, tahová zkouška, zkoušky tvářitelnosti, technologické zkoušky, diagram mezních přetvoření, Bulge test, simulace.

Annotation

This thesis deals with the possibilities of application of high strength steels for the surface parts of a car body, their testing and acquisition of material for numerical simulation of forming. The work is divided into two parts, the theoretical and the experimental part. The theoretical section is focused to overview of commonly used steel materials for the construction of a car body, overview of the formability tests and technological tests. In the experimental section of the selected dual – phase strength material *CR330Y590T – DP – GI60/60 – U – O* are conducted formability tests to obtain material characteristics for the numerical simulations of a particular piece. The simulations are conducted in numerical program PAM Stamp 2G and Autoform Plus R6. The results of a mathematical modeling of a selected part are confronted with real stamping. The obtained results are formulated conclusions and recommendations for further research in this area.

Key words: sheets in a car industry, tensile test, technological tests, Forming Limit Diagram, Bulge test, simulations.

Poděkování

Mojí povinností je poděkovat svým rodičům a bratrovi za podporu při studiu. Dále musím poděkovat panu doc. Ing. Pavlu Solfronkovi, Ph.D., vedoucímu mé diplomové práce, za pomoc při měření a cenné připomínky vedoucí ke zpracování diplomové práce. Poděkování také patří členům katedry KSP za ochotu a cenné rady týkající se zpracování. Musím také poděkovat panu Ing. Petru Chaloupeckému ze Škoda Auto v Mladé Boleslavi za pomoc při psaní diplomové práce a zajištění materiálu potřebného pro testování a tažení.

Diplomová práce vznikla na základě finanční podpory projektu studentské grantové soutěže /SGS 21121/ ze strany Technické univerzity v Liberci v rámci podpory specifického vysokoškolského výzkumu.

Obsah

Prohlášení	4
Anotace	5
Annotation	5
Poděkování.....	6
Obsah	7
Seznam použitých zkratk a symbolů	9
1 Úvod	12
2 Teoretická část	13
2.1 Materiály používané na stavbu karoserí	13
2.1.1 Úvod	13
2.1.2 Vývoj plechů používaných v automobilovém průmyslu	13
2.1.3 Ocelové plechy používané v automobilovém průmyslu	15
2.1.3.1 Texturované hliníkem uklidněné oceli	16
2.1.3.2 Oceli bez intersticií (IF ocele)	17
2.1.3.3 Oceli vytvrzující se při vypalování laku karoserie (BH oceli)	18
2.1.3.4 Dvoufázové oceli (DP – Dual Phase steels)	22
2.1.3.5 Vysokopevné mikrolegované oceli (HSLA – High Strenght Low Alloy)	23
2.1.3.6 Oceli s transformačně indukovanou plasticitou (TRIP oceli)	23
2.1.3.7 Vícefázové oceli (CP - Complex Phase steels)	25
2.1.3.8 Martenzitické oceli (MS – Martensitic Steels)	26
2.1.3.9 Vícefázové oceli (TWIP – Twinning Induced Plasticity steels).....	26
2.1.3.10 Borové oceli.....	28
2.1.4 Porovnání struktury a vlastností materiálů.....	29
2.2 Zkoušky tvárnosti	30
2.2.1 Úvod	30
2.2.2 Tahová zkouška	30
2.2.3 Technologické zkoušky	35
2.2.3.1 Úvod	35
2.2.3.2 Hodnocení lisovatelnosti plechů ve vztahu ke karosářským výliskům	35
2.2.3.3 Zkouška lámavosti	37
2.2.3.4 Zkouška hlubokotažnosti podle Erichsena	37

2.2.3.5	Zkouška plechů a pásů střídavým ohýbáním	39
2.2.3.6	Zkouška vyboulením (Yoshida Buckling Test)	39
2.2.3.7	Zkoušky tvářitelnosti za tepla	40
2.2.4	Experimentální metody v tváření.....	40
2.2.4.1	Diagramy mezních přetvoření (FLC/FLD)	40
2.2.4.1	Zkouška rozšiřováním otvoru.....	44
2.2.4.2	Tahová zkouška.....	44
3	Experimentální část.....	45
3.1	Úvod.....	45
3.2	Volba vysokopevného materiálu	45
3.3	Tahová zkouška	46
3.4	Stanovení odvozených ukazatelů tvářitelnosti	48
3.5	Stanovení FLC křivky	49
3.6	Simulace konkrétního dílu	52
3.7	Výsledky simulace	54
3.7.1	Zhodnocení tvářitelnosti.....	54
3.7.2	Hlavní deformace	54
3.7.3	Vedlejší deformace	55
3.7.4	Zhodnocení ztenčení.....	55
3.7.5	Zhodnocení zvlnění	56
3.7.6	Zhodnocení kontaktního tlaku	56
3.7.7	Zhodnocení odpružení	57
3.8	Tažení konkrétního dílu.....	61
3.9	Zjištění a eliminace odpružení	63
3.9.1	Odpružení materiálu výtažku	63
3.9.2	Eliminace odpružení.....	65
3.10	Technologičnost konstrukce	65
4	Závěr.....	67
	Seznam použité literatury.....	69
	Seznam obrázků	73
	Seznam tabulek.....	75
	Seznam příloh	76

Seznam použitých zkratk a symbolů

<i>CQ</i>	Plechý běžné kvality (Comercial Quality)
<i>DQ</i>	Tažné plechy (Drawing Quality)
<i>DDQ</i>	Hlubokotažné plechy (Deep Drawing Quality)
<i>EDDQ</i>	Zvlášť hlubokotažné plechy (Extra Deep Drawing Quality)
<i>EDDQ - S</i>	Super hlubokotažné plechy (Extra Deep Drawing Quality - Super)
<i>IF</i>	Oceli bez intersticií (Interstitials Free steels)
<i>BH</i>	Oceli vytvrzující se při vypalování laku karoserie (Bake Hardening steels)
<i>DP</i>	Dvoufázové oceli (Dual Phase steels)
<i>HSLA</i>	Mikrolegované oceli (High Strength Low Alloy steels)
<i>TRIP</i>	Oceli s transformačně indukovanou plasticitou (Transformation Induced Plasticity steels)
<i>CP</i>	Vícefázové oceli (Complex Phase steels)
<i>TWIP</i>	Oceli se schopností dvojčatění za normálních rychlostí deformace (Twinning Induced Plasticity steels)
<i>UHSS – B</i>	Vysokopevné borové oceli (Ultra High Strength – Boron Steels)
<i>HSS</i>	Vysokopevné oceli (High Strength Steels)
<i>UHSS</i>	Ultra vysokopevné oceli (Ultra High Strength Steels)
<i>FLC/FLD</i>	Forming Limit Curve/Forming Limit Diagram
<i>C</i>	Uhlík (Carboneum)
<i>Mn</i>	Mangan (Manganum)
<i>Si</i>	Křemík (Silicium)
<i>S</i>	Síra (Sulphur)
<i>P</i>	Fosfor (Phosphorus)
<i>Al</i>	Hliník (Aluminium)
<i>Cr</i>	Chrom (Chromium)
<i>Mo</i>	Molybden (Molybdaneum)
<i>B</i>	Bor (Borum)
<i>V</i>	Vanad (Vanadium)
<i>Fe</i>	Železo (Ferrum)
<i>Ti</i>	Titan (Titanium)
<i>Zr</i>	Zirkonium (Zirconium)
<i>r</i>	Koeficient normálové anizotropie [-]

n	Exponent deformačního zpevnění	[-]
M_d	Hranice vzniku deformačního martenzitu	[°C]
M_s	Teplota martenzit start	[°C]
R	Smluvní napětí	[MPa]
R_e	Mez kluzu v tahu	[MPa]
R_m	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
A_x	Tažnost	[%]
ε	Poměrná deformace	[-]
L_0	Počáteční měřená délka	[mm]
L_u	Konečná měřená délka po lomu	[mm]
ΔL	Přírůstek délky	[mm]
S_0	Počáteční průřezová plocha zkoušené délky	[mm ²]
S_u	Minimální průřezová plocha po lomu	[mm ²]
ΔS	Rozdíl průřezu	[mm ²]
E	Youngův modul pružnosti v tahu	[MPa]
F_{\max}	Maximální síla dosažená při zkoušce	[N]
R_{eH}	Horní mez kluzu	[MPa]
R_{eL}	Dolní mez kluzu	[MPa]
Z	Kontrakce	[%]
A_g	Plastické prodloužení měřené průtahoměrem při maximálním zatížení	[%]
ΔL_{Rm}	Prodloužení na mezi pevnosti	[mm]
$\Delta \alpha$	Úhel odpružení	[°]
M	Modul plasticity	[MPa·mm ³]
L	Délka ohybu	[mm]
μ	Poissonovo číslo	[-]
J	Kvadratický moment průřezu	[mm ⁴]
b	Šířka pásu plechu	[mm]
t	Tloušťka pásu plechu	[mm]
l	délka ohybu	[mm]
R	Poloměr ohybu	[mm]
f_{eff}	Efektivní koeficient tření	[-]
f	Základní koeficient tření	[-]

p	Tlak mezi nástrojem a plechem	[MPa]
p_{ref}	Referenční tlak	[MPa]
e	Tlakový exponent	[-]
a	Rychlostní faktor	[-]
v_{ref}	Referenční rychlost	[m.s ⁻¹]
v_{rel}	Relativní rychlost	[m.s ⁻¹]
$\Delta\alpha$	Úhel odpružení	[°]
α	Úhel ohybu	[°]
M	Modul plasticity	[MPa.mm ³]
L	Délka ohybu	[mm]
J	Kvadratický moment průřezu	[mm ⁴]
R	Poloměr ohybu	[mm]
S	Tloušťka plechu	[mm]
D	Průměr výtažku	[mm]

1 Úvod

Cílem diplomové práce je analyzovat a vyhodnotit možnou aplikaci vysokopevných materiálů a zjistit lisovatelnost povrchových vysokopevných dílů jak technologickými zkouškami, tak i pomocí simulace. Dále je předmětem práce analýza odpružení povrchových dílů, virtuální kompenzace a porovnání s reálnými výsledky. To vše by mělo směřovat ke stanovení nejvhodnější metodiky tváření výlisků z vysokopevných materiálů.

Pro stavbu karoserií jsou jako hlavní materiály pro plechy využívány převážně hlubokotažné materiály válcované za studena. Tyto materiály mají výhodu v dobré zpracovatelnosti. Velkou nevýhodou však jsou jejich malé mechanické hodnoty. S vývojem automobilů jsou kladeny stále větší požadavky na bezpečnost jejich posádky. Tento požadavek již hlubokotažné plechy nesplňují. Je tedy nutné vyvinout nové materiály. Dalším sledovaným parametrem je hmotnost automobilu a z toho plynoucí spotřeba paliva a ekologická zátěž. Stranou ale nezůstává ani ochrana chodců či dobrá korozní odolnost plechů.

Moderní materiály v sobě spojují dobrou tvářitelnost při dodržení výborných mechanických hodnot po tváření. Některé materiály získají požadované mechanické vlastnosti fázovou transformací po tváření, jiné zase po vypalování laku karoserie, další mikrolegováním, atp. Je možné vytvářet i velmi složité výlisky díky materiálům s extrémními tažnostmi. Většina moderních materiálů bude probrána v teoretické části diplomové práce.

V aplikaci vysokopevnostních materiálů hrají velkou roli i tvářecí zkoušky. Ze zkoušek lze získat informace o tom, jak dobře jsou materiály tvářitelné a jakých jsou schopny deformací. Zkoušky lze provádět pomocí jednoduchých přípravků, ale i velmi sofistikovaných měřidel. I základní zkoušky tváření budou řešeny v teoretické části.

2 Teoretická část

2.1 Materiály používané na stavbu karoserií

2.1.1 Úvod

V dnešní době jsou na stavbu karosérií používány nejen ocelové, ale i jiné materiály. Prvním konkurenčním materiálem jsou hliníkové slitiny. Dále jsou používány i hořčíkové slitiny a v neposledním případě stále expandující plasty. Pro zachování konkurenceschopnosti ocelových materiálů je nutno vyvíjet nové ocele, které jsou lehčí, pevnější a lépe zpracovatelné. [1]

Nároky kladené na design karoserie jsou zvyšovány, stejně jako vlastnosti a kvalita používaných ocelí. Během nárazu karoserie musejí být splněny dva protichůdné požadavky: materiály musejí být *tvárné* (kvůli pohlcení nárazové energie) a zároveň musejí být *tvárově stabilní* (kvůli ochraně posádky automobilu). [1]

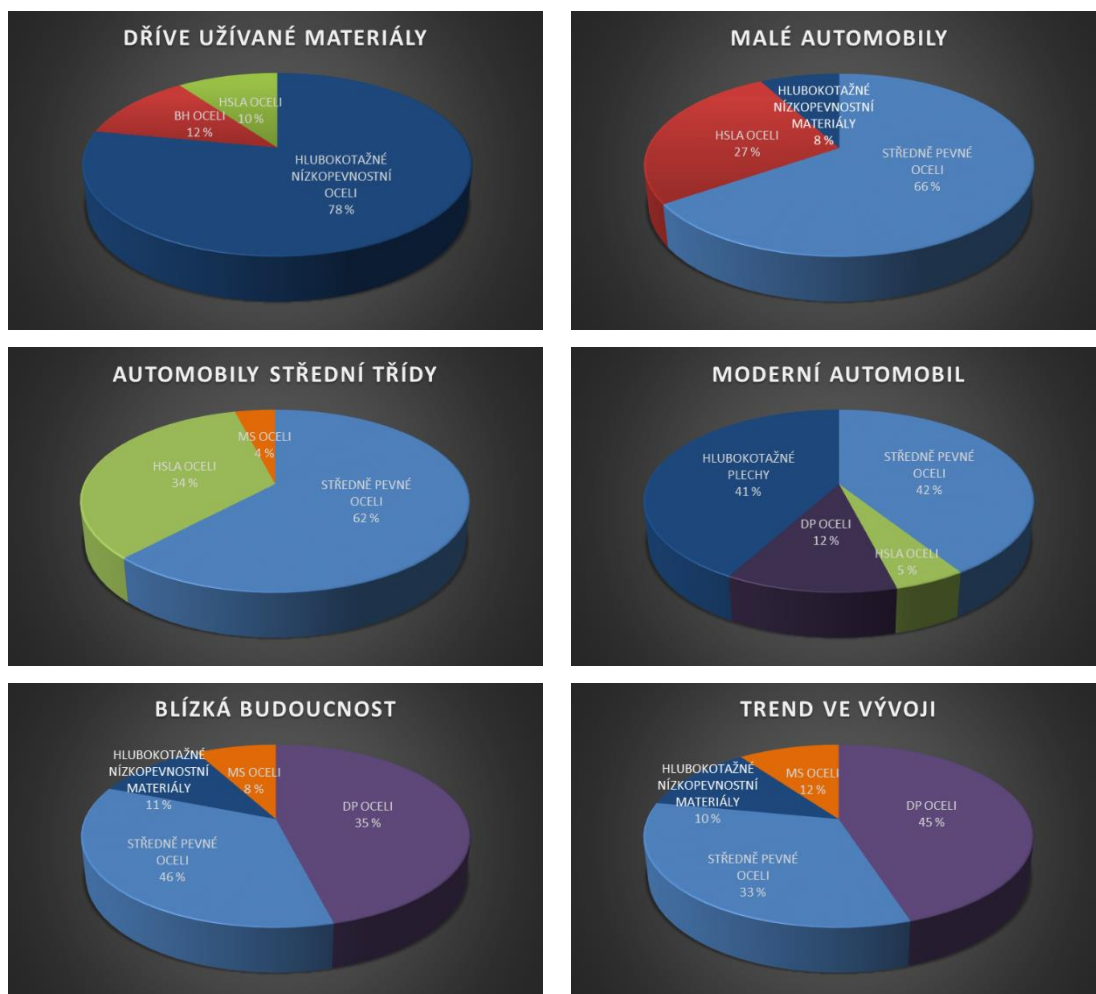
Dalšími, v dnešní době velmi sledovanými parametry, je snižování hmotnosti automobilů a z toho vyplývající snižování provozních nákladů, zvyšování aktivní i pasivní bezpečnosti, zvyšování bezpečnosti chodců, zvyšování užitných vlastností, snižování výrobních nákladů, použití levnějších materiálů a v neposlední řadě snadná recyklovatelnost. [2]

2.1.2 Vývoj plechů používaných v automobilovém průmyslu

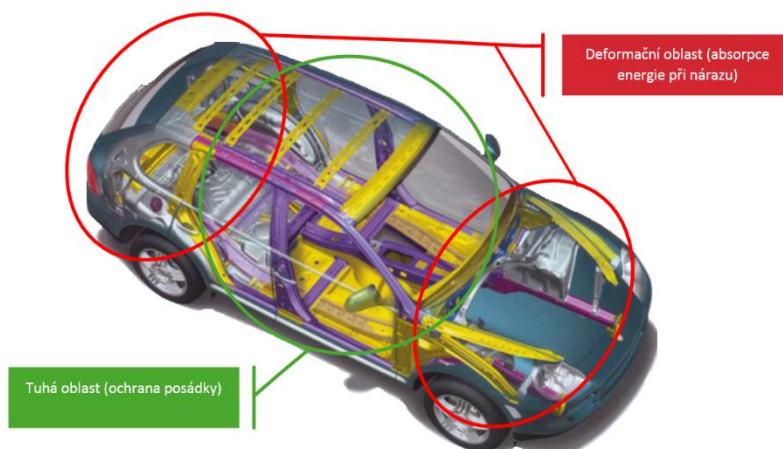
Druh plechů užívaných pro stavbu karosérií se za posledních pár desetiletí značně změnil. Zatímco počátkem devadesátých let byly karoserie vyrobeny z velké části z nízkopevnostních hlubokotažných materiálů, dnes jsou tyto materiály využívány v menší míře. Trendem je aplikovat oceli s vysokou pevností, ale současně i s dobrou tažností. Vysokopevnostní materiály jsou aplikovány kvůli dostatečné bezpečnosti, dobrá tvářitelnost zase napomáhá zjednodušit zpracovatelské operace a tím i snížit energii potřebnou k jejímu přetvoření. Na *obr. 2.1* jsou uvedeny přibližné podíly jednotlivých druhů materiálů a trend v používání materiálů.

Plechové materiály musejí být v automobilu aplikovány podle jejich schopnosti absorpce energie při nárazu (*obr. 2.2*). Na oblastech, kde je požadováno vysoké absorpce deformační energie při nárazu, jsou používány materiály, které jsou po tváření ještě schopny velké deformace.

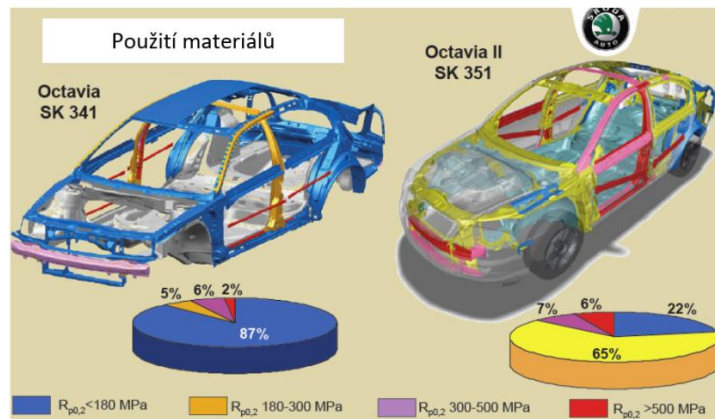
Naopak v místech, kde je nutno ochraňovat posádku, jsou s výhodou využívány materiály s minimální deformační schopností při nárazu. [3]



Obr. 2.1: Druhy materiálů a jejich podíl ve stavbě karoserie automobilu [4]



Obr. 2.2: Funkce karoserie automobilu při nárazu [3]



Obr. 2.3: Užití ocelí v konstrukci karoserie automobilu [5]

Cílem využívání modernějších materiálů je na prvním místě bezpečnost. Dalšími, neméně důležitými parametry, je dosáhnout nižší hmotnosti karoserie automobilu a z toho plynoucí menší spotřeby paliva. Ekologie je však také brána v potaz.

2.1.3 Ocelové plechy používané v automobilovém průmyslu

a) Hlubokotažné plechy z ocelí uspokojených hliníkem

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

b) Refosforizované a mikrolegované oceli,

c) Plechy z IF ocelí bez intersticií,

d) Plechy z IF ocelí s BH efektem,

e) Plechy z vysokopevnostních ocelí

- Plechy z DP ocelí (Dual Phase Steels – dvoufázové oceli),
- Plechy s transformačně indukovanou plasticitou (TRIP oceli),
- Plechy z TWIP ocelí (Twinning Induced Plasticity),
- Plechy z CP ocelí (Complex Phase Steels – vícefázové oceli),
- Mikrolegované oceli (High Strength Low Alloy steels),
- UHSS – B – Vysokopevné borové oceli (Ultra High Strength – Boron Steels). [1]

2.1.3.1 Texturované hliníkem uklidněné oceli

Pro karosářské aplikace jde o dvě jakosti určené pro hluboké tažení – DDQ (deep draving quality) a pro zvlášť hluboké tažení, tzv. EDDQ (extra deep draving quality). [6]

Z fyzikálně metalurgického hlediska jsou pro ocele přísně limitovány obsahy C, Mn, Si, S, P, Al a dalších doprovodných prvků. Musejí mít vysokou čistotu, rovnoměrnou strukturu s prodlouženým tvarem zrna, jemně a homogenně vyloučený cementit. K dosažení vysokého koeficientu normálové anizotropie musí být plech vybaven krystalografickou texturou typu $\{111\}; \langle uvw \rangle$. [6]

Z technologického hlediska je plnění požadavku na strukturu, čistotu a texturu vázáno na aplikaci moderních ocelářenských pochodů, jako je kombinované foukání do konvertoru, rafinace a kontinuální lití. Při výrobě ocelí je nutno eliminovat všechny faktory vedoucí ke zhoršení čistoty a rozptylu chemického složení. Proto je používán tříděný šrot, bezstruskový odpich, zásadité pánve, řízená dezoxidace, profukování taveniny argonem, perfektní ochrana licího proudu trubicemi, aplikace licích prášků s vysokou kvalitou, rovnoměrná rychlost lití atp. Při válcování za tepla je nutno dosáhnout co největší rovnoměrnosti struktury ve všech třech směrech. Současně je nutno potlačit precipitaci nitridu hliníku. Prakticky to znamená dodržet úzké rozpětí válcovacích teplot těsně nad dvoufázovou oblastí (850 °C), doběh rekrystalizace austenitu. Válcování za studena je prováděno, kvůli textuře, s vysokým celkovým úběrem. Od rekrystalizačního žíhání je vyžadováno rovnoměrnosti teplot po průřezu vsázky pecí. S výhodou je využíváno žíhání v ochranné vodíkové atmosféře s lepším vedením tepla a příznivými účinky na kvalitu povrchu. Technologie kontinuálního žíhání pásu mají v mnohých směrech přednosti. Hlavní odlišností oproti žíhání v poklopových pecích je rychlost ochlazování při rekrystalizačním žíhání pásu plechu. Optimální úběr při válcování je snižován se snižujícím se obsahem uhlíku. [6]

Vedle mechanických vlastností a geometrických charakteristik plechů je také vyžadováno kvalitní mikrogeometrie povrchu a množství povrchového uhlíku. Pod dobrou mikrogeometrií povrchu je míněno nejen velikosti reliéfu, ale i počet a morfologie prohlubní resp. výstupků. Těchto požadavků je dosahováno kvůli možnosti zachytávání mazadla na povrchu plechu a jeho účinku při lisování. Přední výrobci karosářských plechů přešli od techniky zdrsňování válců tryskáním k elektrojiskrovému nebo laserovému zdrsňování válců s jejich následným tvrdým chromováním. [6]

2.1.3.2 Oceli bez intersticií (IF ocele)

Další zlepšení plastických vlastností EDDQ ocelí je docilováno radikálním snižováním obsahu uhlíku až pod 15 ppm (0,005 %) a přeměnou intersticiálních prvků uhlíku a dusíku na stabilní precipitáty pomocí mikrolegujících přísad titanu, resp. niobu. Obsahy titanu a niobu, případně jejich kombinace, jsou voleny v závislosti na skutečném obsahu uhlíku a dusíku tak, aby bylo dosaženo vyvážení intersticií a aby nebylo v tuhém roztoku zbytečného přebytku mikrolegur. Plastické vlastnosti jsou zlepšovány se stoupající hodnotou poměru Nb/C, přičemž optimum je okolo 1. Z metalurgického hlediska IF oceli vyžadují vysokou čistotu a kontrolu morfologie vměstků. V důsledku absence intersticiálního zpevnění je dosaženo velmi nízké meze kluzu, pohybující se do 160 MPa. Důsledkem toho je absence diskontinuity plastického toku materiálu na mezi kluzu. Oceli jsou charakterizovány vysokou tažností (nad 42 %) a středním koeficientem normálové anizotropie r nad 1,7 a také velkým exponentem deformačního zpevnění. Mohou být náchylné na porušování na hranicích zrn při sekundárních tvářecích operacích. Je to důsledek ochuzení hranic zrn o intersticiální prvky. Přísadou několik ppm boru do ocelí s niobem a titanem je tento nedostatek eliminován a to prostřednictvím difuze boru na hranice zrn s následným zpevňováním. Náchylnost k interkrystalickému porušení je zvyšována s rostoucím obsahem fosforu a síry. Někdy je tedy vhodné snížení obsahu síry až pod hranici 0,002 %. V důsledku vývoje došlo k jejich zlepšení plastických vlastností, resp. kombinace pevnosti a plastičnosti. Z hlediska chemického složení došlo dalšímu snížení obsahu uhlíku na hodnotu 15 – 25 ppm a k aplikaci dávkování titanu, niobu, resp. k jejich kombinaci dle skutečných obsahů uhlíku, dusíku a síry. Typický obsah těchto ocelí bývá: Mn = 0,1 %; Si = 0,01 %; S = 0,005 %; P = 0,01 %; Al = 0,04 %. [6]

Současné IF oceli mají předpoklady pro aplikaci na nejnáročnější velkoplošné karosářské výlisky. Jejich odolnost proti stárnutí umožňuje jejich aplikaci na žárové pozinkování, resp. z opačného hlediska, žárově pozinkované plechy si mohou zachovat dostatečné plastické vlastnosti. [6]

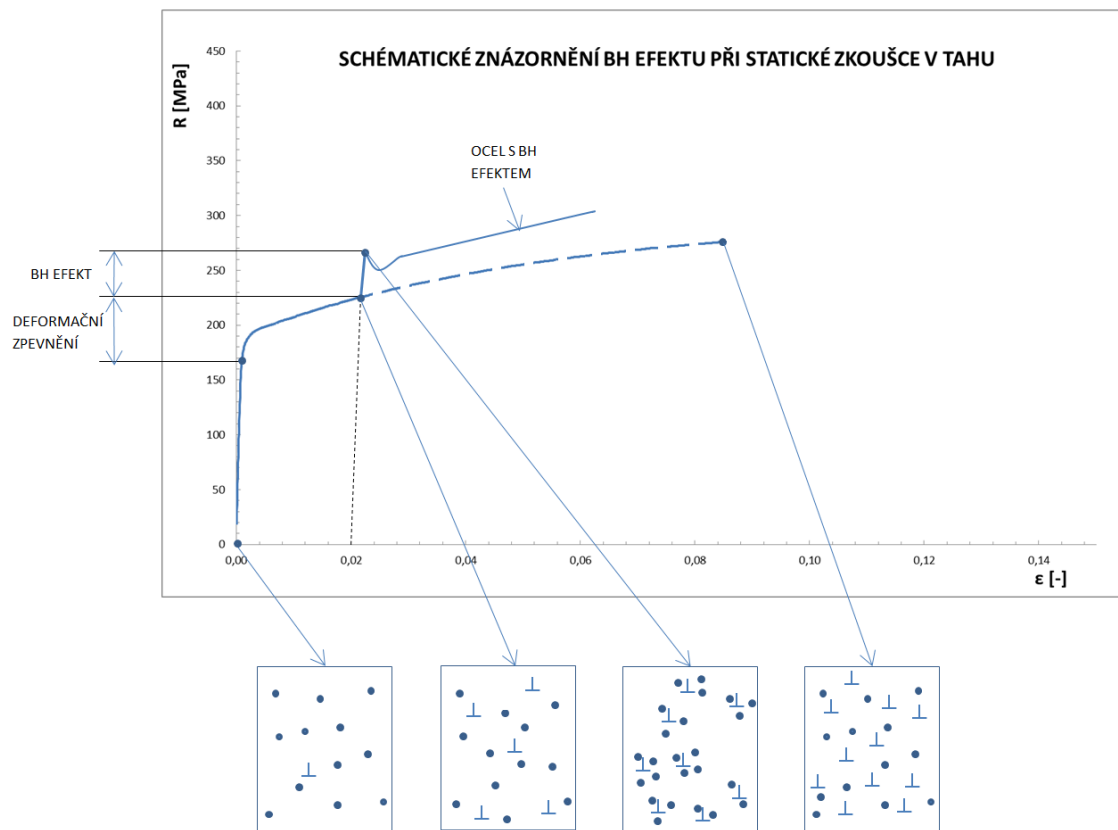
2.1.3.3 Oceli vytvrzující se při vypalování laku karoserie (BH oceli)

Před lisováním jsou charakterizovány nízkou hodnotou meze kluzu a vysokou hodnotou plastičnosti. Po vypalování laku na výliscích je dosaženo deformačně – termickým stárnutím k zvýšení pevnostních vlastností o 30 – 70 MPa. Tím plech dosahuje zvýšené odolnosti vůči deformacím. Pro docílení BH (bake hardening) efektu musí být splněno fyzikálně – metalurgických podmínek, mezi které patří:

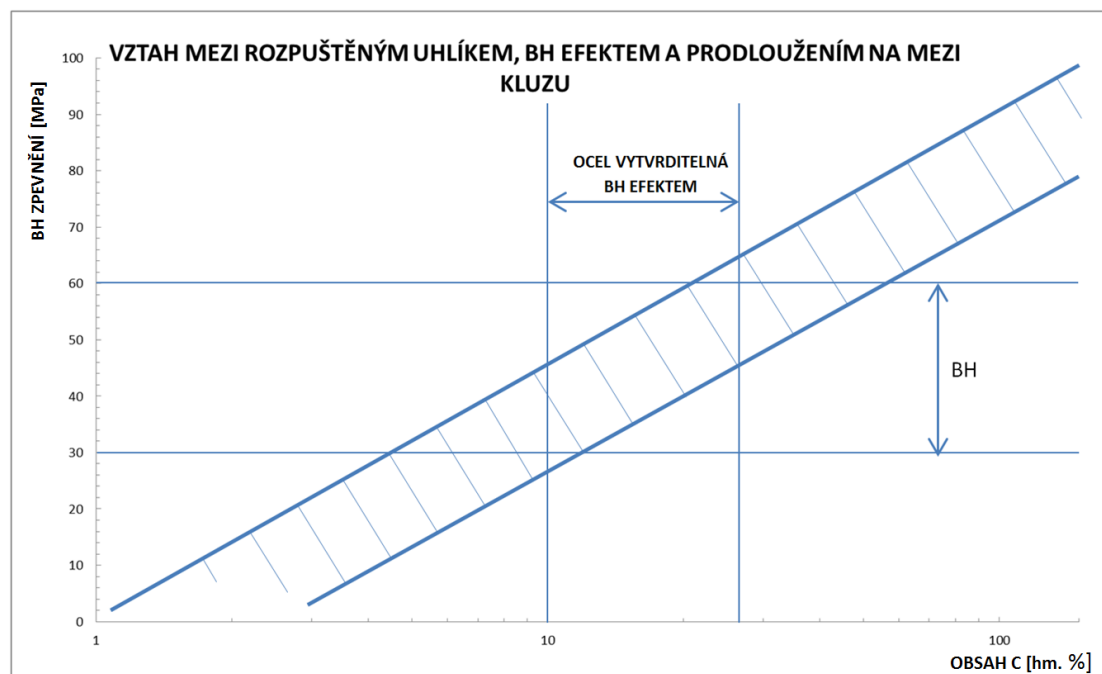
- a) Kontrola BH efektu prostřednictvím kontroly rozpuštěného uhlíku ve feritu vyžaduje, aby byl dusík dokonale vyvázaný na AlN. Precipitace AlN je kontrolována obsahem Al a N, teplotou svinování, rekrystalizačního žíhání a doprovodnými prvky.
- b) Po splnění první podmínky je třeba kontrolovat působení intersticiálního uhlíku ve feritu, protože primárně kontroluje velikost BH efektu. Na *obr. 2.4* je znázorněna podstata zvýšení meze kluzu. Při vypalovacích teplotách 150 – 200 °C, resp. při konvenční zkoušce při 170 °C, výdrži 20 minut, dochází k umělému stárnutí a kotvení dislokací ve feritu atomy uhlíku nebo jejich skupinami. Právě tento kotvicí efekt je příčinou vzrůstu deformačního napětí – BH efektu.
- c) Využitelný obsah intersticiálního uhlíku ve feritu pro kontrolu BH efektu je do 10 ppm. Tento obsah je limitován tím, že procesy stárnutí při zvyšování meze kluzu mohou vyvolat nežádoucí Lüdersovu deformaci. Je-li určeno dovolené prodloužení na mezi kluzu max. 0,2 %, potom maximální přírůstek zpevnění BH efektem je cca 50 MPa, viz. *obr. 2.5*. V diagramu je charakterizován vztah mezi rozpuštěným uhlíkem dosažitelným při BH efektu a prodloužením na mezi kluzu. Proto je v případě kontinuálního rekrystalizačního žíhání voleno žíhání v rozsahu 300 – 400 °C za účelem redukce rozpuštěného uhlíku na cca 10 ppm.
- d) Z hlediska chemického složení oceli je BH efekt nejvíce ovlivňován obsahem uhlíku. Při vysokých obsazích uhlíku v oceli (nad 0,04 %) buď je, nebo je během ochlazování vytvořeno velké množství krystalizačních zárodků cementitu a finální přesycení feritu uhlíkem je malé. Při velmi nízkých obsazích uhlíku není přesycení dosaženo. Optimální obsah uhlíku je proto 0,01 – 0,025 %C. Vzhledem na kinetiku rozpouštění a precipitaci cementitu je výhodné, je-li před rekrystalizačním žíháním cementit hrubozrný. Toto je patrné z prodloužení difuzních drah pro precipitaci karbidu železa a zlepšení podmínek pro přesycení

tuhého roztoku uhlíkem během ochlazování. Jako doprovodného prvku je využíváno fosforu, který během žíhání segreguje nahraňných zrn a brání tvorbě zárodků cementitu. Výhoda refoforizovaných ocelí spočívá ve zvýšení pevnostních vlastností po vypalování laku karosérií. Mírně pozitivní vliv na velikost BH efektu má i křemík. Naproti tomu, velmi negativní účinek má mangan. Snižování dosahovaného BH efektu manganem je vysvětlováno jeho vlivem na precipitaci cementitu. Vliv uhlíku je znázorněn na *obr. 2.6*, manganu a fosforu na BH efekt je znázorněn na *obr. 2.7*.

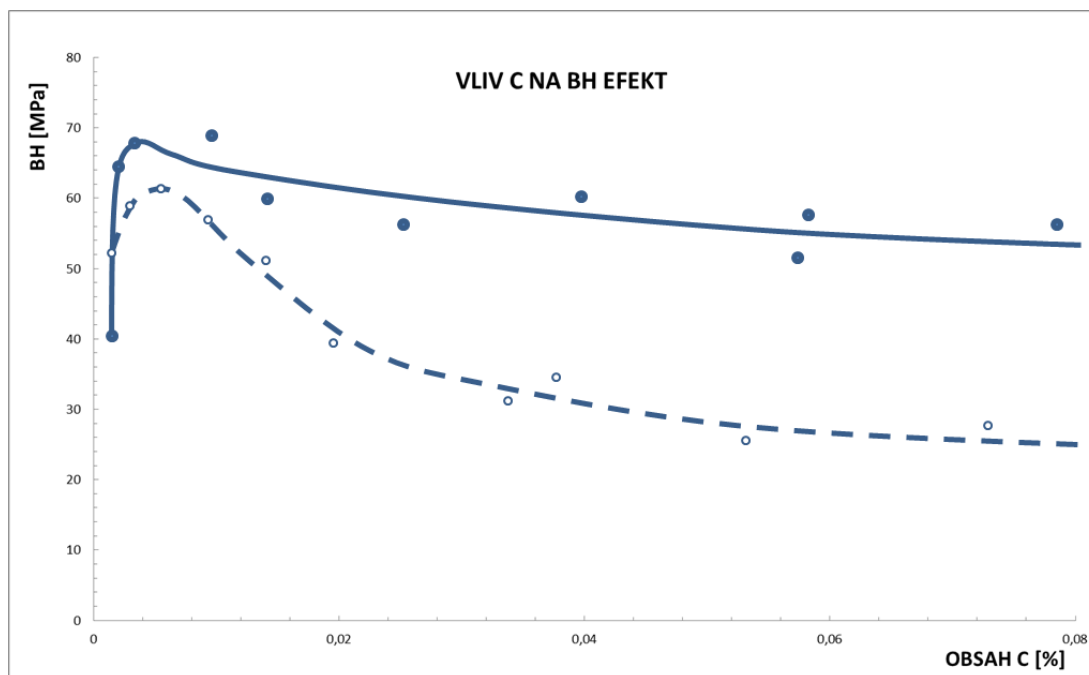
- e) Žíháním v pokloповých pecích je nutno dosáhnout rozpuštění cementitu a vytvoření ztížené podmínky pro jeho nové vylučování z tuhého roztoku. Přírozeným požadavkem je proto zvýšená teplota rekrystalizačního žíhání i rychlosti ochlazování. V praxi to znamená použití vodíkové atmosféry v pokloповých pecích a aplikaci volně svinutých svitků.
- f) Pro aplikaci BH ocelí je zajímavý jev, spočívající ve vyrovnávání skutečné meze kluzu na hotovém vypáleném výlisku v důsledku deformačního zpevnění a BH efektu.
- g) Pro tvarově náročnější součástky byly vyvinuty IF oceli s Nb, nebo Nb + Ti s poměrem Nb/C. Po kontinuálním žíhání z vysokých teplot (850 °C) následuje ochlazování rychlí vyšší než 20 °C/min. při žíhací teplotě dochází k částečnému rozpuštění NbC a rychlé ochlazování zachovává uhlík v roztoku. Sycením feritu uhlíkem v rozmezí 10 – 20 ppm je docíleno BH efektu 20 – 40 MPa. U IF ocelí s přísadou fosforu je přidáván bor za účelem snížení křehnoucího účinku fosforu na hranice zrn. [6]



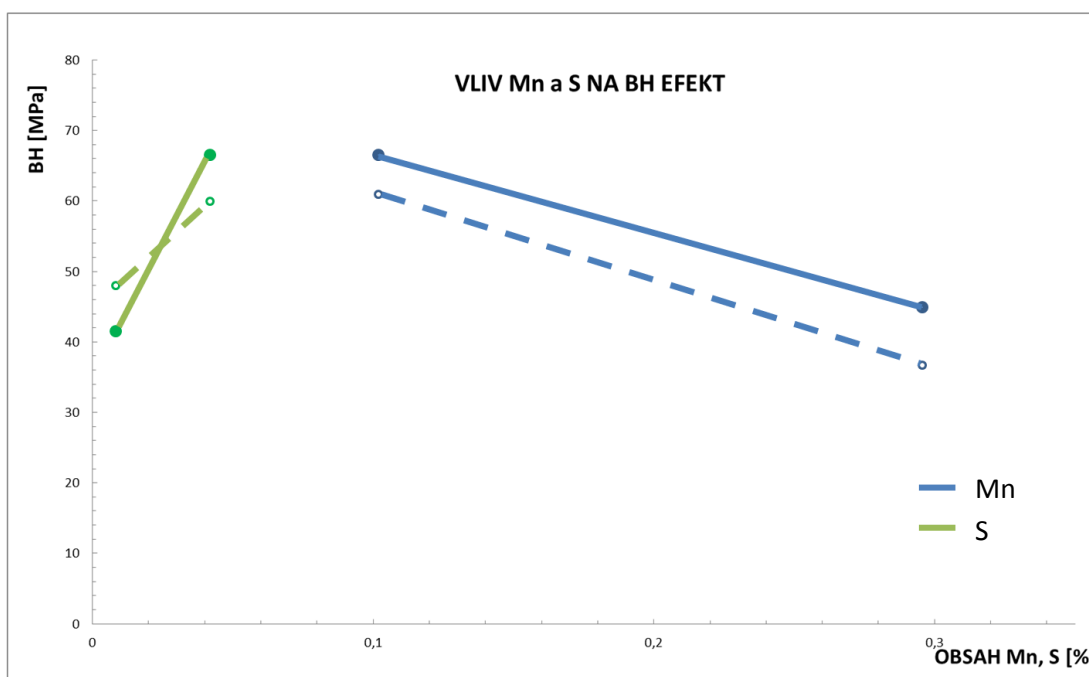
Obr. 2.4: Schématické znázornění BH efektu při statické zkoušce v tahu [6]



Obr. 2.5: Vztah mezi rozpuštěným uhlíkem, BH efektem a prodloužením na mezi kluzu [6]



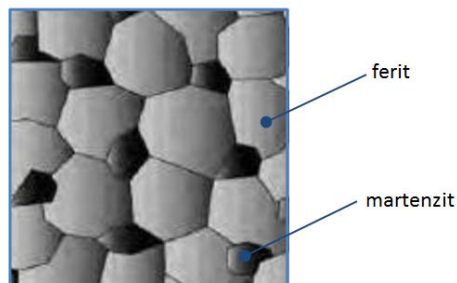
Obr. 2.6: Vliv uhlíku na BH efekt [6]



Obr. 2.7: Vliv manganu a síry na BH efekt [6]

2.1.3.4 Dvoufázové oceli (DP – Dual Phase steels)

Další alternativou zlepšení kombinace pevnostních a plastických vlastností za studena válcovaných plechů jsou DP (dual phase) oceli, jejichž struktura je tvořena feritem a martenzitem s objemovým podílem 5 – 25 % (obr. 2.8). Dvoufázové oceli mají vynikající poměr meze pevnosti a tažnosti resp. meze pevnosti a exponentu deformačního zpevnění. Velmi dobré hodnoty jsou vykazovány i poměrem meze kluzu a meze pevnosti. Nevýhodou jsou poměrně nízké hodnoty koeficientu normálové anizotropie. Tato

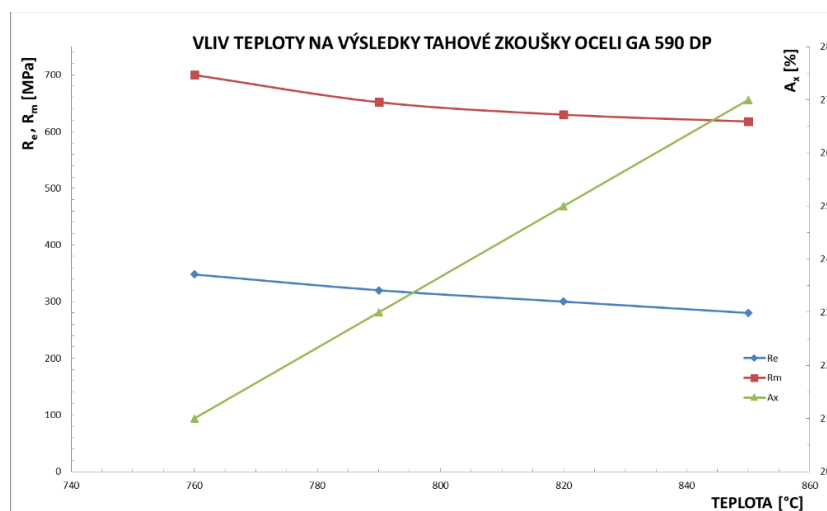


skutečnost vylučuje používání DP ocelí na zvláště

hluboké výtažky. Dvoufázové oceli jsou také kromě *Obr. 2.8: Struktura DP oceli [7]* toho charakterizovány velmi výrazným BH efektem, což je dáno tepelným zpracováním – kalením. Z těchto důvodů se hodí na části podvozků a karosérií, které mají přenášet vyšší hladiny napětí a současně jsou vyráběny středním tažením, ohýbáním, nebo jinými méně náročnými lisařskými operacemi. [6]

Chemické složení DP ocelí není tak úzce vymezeno jako u předcházejících skupin. Závisí od požadované úrovně pevnostních vlastností ale i od technologických podmínek u jednotlivých výrobců a jejich výzkumných a výrobních zkušeností. [6]

Základní technologickou operací, z které je dvoufázová struktura získávána, je kalení do vody na kontinuálních linkách rekrystalizačního žhání. Při rekrystalizačním žhání v pokloповých pecích je dvoufázové struktury docíleno speciálním legováním a přizpůsobeným tepelným režimem. Efektivnost těchto postupů je však diskutabilní. [6]



Obr. 2.9: Vliv teploty na parametry oceli GA 590 DP [8]

2.1.3.5 Vysokopevné mikrolegované oceli (HSLA – High Strength Low Alloy)

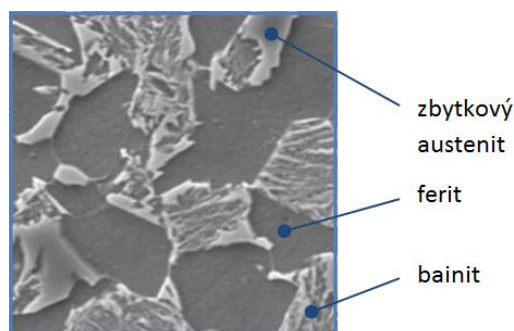
Velké množství automobilových součástí, včetně podvozkových dílů a nosných částí karosérie, jsou dynamicky namáhány a přenášejí značná napětí. V tomto případě jsou preferovány pevnostní a únavové vlastnosti, avšak při zachování výborné ohybatelnosti a lisovatelnosti na úrovni mírných a středních tahů. Pro tyto účely jsou vhodné mikrolegované oceli. Z fyzikálně-metalurgického hlediska jsou požadavky na stejnorodou jemnozrnnou strukturu, dobrou čistotu oceli a přesně regulovanou hladinu precipitačního zpevnění. Obsah uhlíku je v těchto ocelích limitován asi do hodnoty 0,09 %. Hlavní mikrolegující přísadou může být niob nebo titan. Obsah niobu je volen podle požadované úrovně pevnostních vlastností zpravidla v rozmezí 0,02 – 0,05 %. Obsah titanu závisí na aplikaci. Je-li přidáván k navázání dusíku, je aplikován v obsahu 50 – 200 ppm. Jestliže je přidáván kvůli precipitačnímu zpevnění, tak je používán v obsahu 200 – 600 ppm. Vyšší obsahy jsou aplikovány pro modifikaci sulfidických vměstků. Na tento účel je však vhodnější zirkonium. Obsahy manganu a křemíku jsou voleny dle požadované úrovně pevnostních vlastností. [6]

Technologické postupy válcování za tepla a za studena jako i rekrytalizační žhání mají mírné odlišnosti oproti hlubokotažným ocelím. [6]

2.1.3.6 Oceli s transformačně indukovanou plasticitou (TRIP oceli)

Materiál patří k vysokopevnostním typům ocelí. Dosahovaná pevnost je až 900 MPa a tažnost v rozmezí 20 až 80 %. Právě pro vysokou tažnost, která je způsobena transformačně indukovanou martenzitickou transformací, jsou oceli i pochod označovány jako TRIP, což značí přeměnu (transformačně) vyvolanou plasticitou. [9]

Jako podstata procesů probíhajících při zpevnění TRIP ocelí je martenzitická transformace, která je indukována napětím anebo deformací. Při vnějším napětí přebírají oblasti austenitu zatížení a jsou



Obr. 2.10: Struktura TRIP oceli [7]

transformovány na martenzit, který je současně dále deformován. Chemické složení těchto ocelí je voleno tak, aby měly oceli austenitickou strukturu a teplota M_s byla po rozpouštěcím žhání (homogenizaci) pod 0 °C. Homogenizovaná ocel je intenzivně tvářena při teplotě vyšší

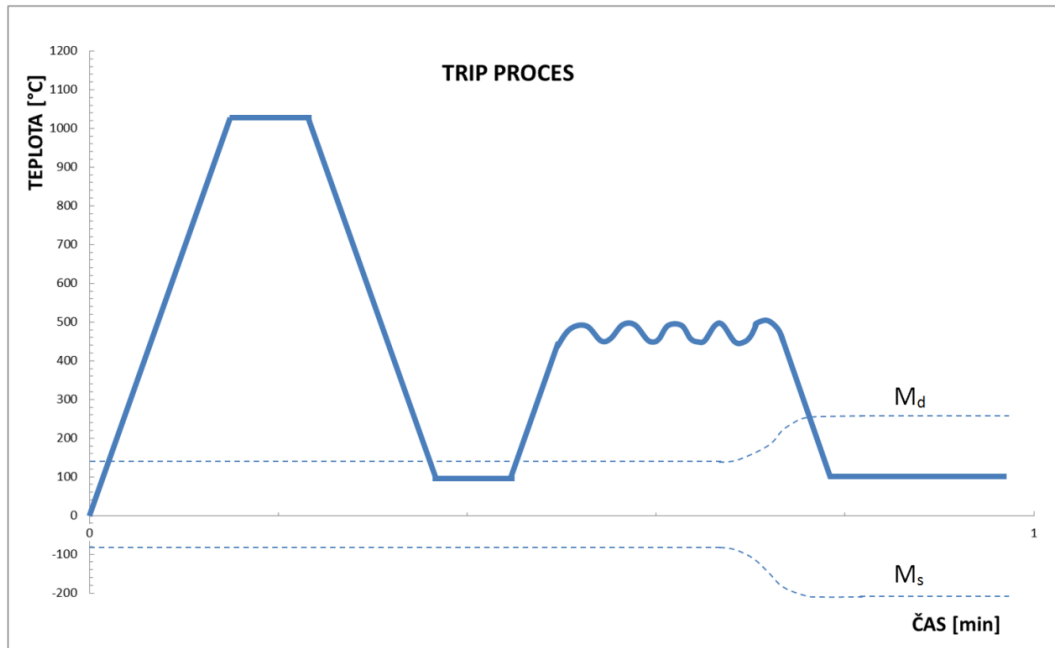
než M_d (hraniční teplota vzniku deformačního martenzitu). V průběhu tohoto tváření je teplota M_d , která je původně asi 100 °C, zvyšována o cca 100 °C a o stejnou hodnotu je snížena teplota M_s (obr. 2.11). Důsledkem procesu deformace je částečná martenzitická transformace austenitu při zatěžování oceli v rozmezí teplot M_s až M_d . destičky martenzitu, vznikající ve skluzových pásech, jsou velmi účinnou překážkou pro pohyb dislokací. Pokud je v průběhu zatěžování iniciována trhлина, je v deformované zóně indukována a na jejím čele martenzitická transformace a destičky martenzitu brání dalšímu šíření trhliny. [9]

Tento proces je charakterizován homogenní deformací martenzitu v rozmezí teplot M_s - M_d . to znamená, že deformace martenzitu není koncentrována v určitém místě, ale je rovnoměrně rozložena v celé oblasti. [9]

Tepelné zpracování a vlastnosti. TRIP oceli jsou známé již od šedesátých let, kdy byly specifikovány chemickým složením: 0,3 % C; 9 % Cr; 8 % Ni; 4 % Mo; 2 % Mn a 2 % Si. Tepelné zpracování je složeno z rozpouštěcího žhánání při teplotě 1120 °C, tváření při teplotě 450 °C s 80 % deformací a ochlazení pod normální teplotu. Výchozí struktura je tvořena austenitem s malým množstvím martenzitu. Polovýrobky jsou potom tvářeny při normální teplotě a 15 % redukci, aby bylo dosaženo vyššího obsahu martenzitu a tvrdosti austenitu. Nakonec je při teplotě 400 °C snižováno napětí. Po konečném tepelném zpracování je ocel charakterizována vysokou pevností v tahu při tažnosti 25 až 30 %, vrubové houževnatosti asi 40 J.cm⁻² a vysoké lomové houževnatosti. Přestože je ve struktuře obsažen vyšší obsah zbytkového austenitu, má ocel vyšší mez únavy. [9]

Všeobecně mají TRIP oceli vysokou pevnost a současně vynikající plastické vlastnosti. Zkoušky ukázaly, že jsou oceli odolné proti vzniku křehkého lomu. Nevýhodou těchto ocelí je relativně nízká mez kluzu. [9]

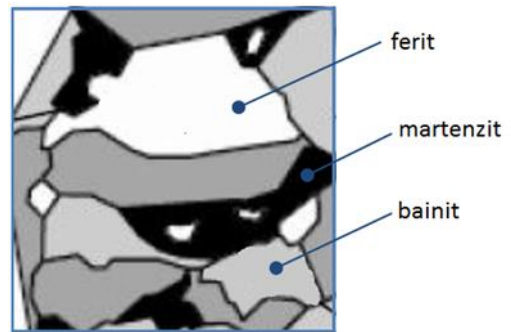
TRIP oceli jsou používány pro aplikace, kde je potřeba zajistit vysokou pevnost materiálu. Jsou také nejméně zvládnutou skupinou materiálů v teorii i praxi. Z aplikací je možno uvést potahy v leteckém a raketovém průmyslu, chirurgické jehly, speciální lana apod. [9]



Obr. 2.11: Schéma TRIP procesu [9]

2.1.3.7 Vícefázové oceli (CP - Complex Phase steels)

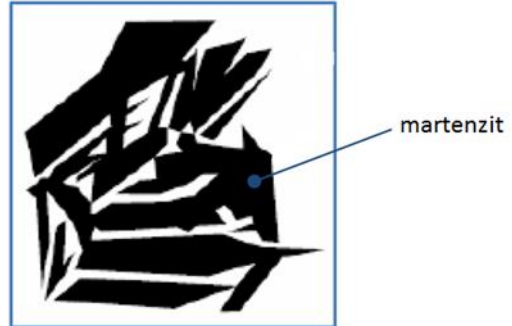
Struktura je tvořena malým množstvím martenzitu, zbytkového austenitu a perlitu ve feriticko – bainitické matrici. Mez pevnosti těchto ocelí je v rozmezí 800 – 1000 MPa. Pomalou rekrytalizací nebo precipitací mikrolegujících prvků, jako je např. Ti nebo Co, lze dosáhnout extrémního zjemnění zrna. Jsou charakteristické svojí dobrou schopností absorpce energie a vysokou zbytkovou deformační schopností. Mají výrazně vyšší mez kluzu než oceli DP při zachování stejné meze pevnosti v tahu. [10]



Obr.2.12: Struktura CP oceli [7]

2.1.3.8 Martenzitické oceli (MS – Martensitic Steels)

Matrice MS ocelí je tvořena martenzitem, v kterém se vyskytuje malé množství feritu, příp. bainitu (obr. 2.13). Martenzitické oceli vykazují nejvyšší pevnost v tahu v porovnání s ostatními. Jejich mez pevnosti v tahu je až 1700 MPa. Pro zvýšení plastických vlastností jsou často temperovány. Je-li do nich přidán uhlík, tak se zvýší jejich prokalitelnost a posiluje se martenzit. Za stejným účelem je do nich přidáván i Mn, Si, B, Cr, Mo, V a Ni a to buď zvlášť, nebo v jejich kombinaci. [11]



Obr. 2.13: Struktura MS oceli [7]

2.1.3.9 Vícefázové oceli (TWIP – Twinning Induced Plasticity steels)

Feromanganové TWIP oceli s obsahem 17 až 20 % Mn jsou plně austenitické a nemagnetické oceli, bez fázové transformace. Uspořádání mechanických dvojčat způsobí během deformace vysoké napěťové zpevnění, zabraňuje tvorbě krčku při tahovém zatížení a zajišťuje tak vysokou napěťovou kapacitu. Na základě výsledků experimentu jsou zjištěny pevnosti v tahu 600 až 1100 MPa a extrémní hodnoty tažnosti od 60 do 90 %. [1]

TWIP oceli jsou zajímavé díky vysoké schopnosti absorpce nárazové energie, která je více jak dvojnásobná v porovnání s konvenčními vysokopevnostními oceli. V případě srážky jsou TRIP oceli deformovány při zachování jejich tvárnosti. Každá část je nejprve prodloužena, zpevněna a následně je odevzdána její vyšší deformační energie jiným částem, které jsou také zdeformovány. Tím, že je energie rozložena po celém povrchu, je nárazová energie absorbována mnohem efektivněji. [1]

Mechanismus dvojčatění způsobuje vysoký nárůst koeficientu zpevnění n , mikrostruktura se stává jemnozrnější. U vysoko manganových TWIP ocelí je kombinována extrémně vysoká pevnost s velmi dobrou tvářitelností, vzhledem ke skutečnosti, že vznikající hranice dvojčatění se chovají jako hranice zrn a ocel tím zpevňována. Koeficient zpevnění je zvyšován na hodnotu 0,4 při hodnotách deformace okolo 30 % a dále zůstává konstantní až do celkového prodloužení 50 %. [1]

Výhodou TWIP ocelí je i kompatibilita se zaběhnutými výrobními postupy ocelí jiných jakostí včetně jejich následného zpracování kontinuálním odléváním, válcováním, lisováním a svařováním. Drobné technické problémy mohou být během metalurgické přípravy těchto

ocelí. Může docházet ke ztrátě manganu během tavení v důsledku vysokého tlaku. Vypalování podstatné procentuální části manganu během tavení vede k nutnosti přidávat mangan v přebytku. [1]

TWIP oceli poskytují velmi vysokou tažnost až 70 % a mírnou pevnost v tahu 800 MPa, ale také je schopná poskytnout ocel s velmi vysokou pevností nad 1400 MPa, která je v současné době vyvíjena firmami Arcelor a TKS. Pro automobilový průmysl jsou tyto oceli zajímavé díky své schopnosti vysoké absorpce energie, asi dvakrát vyšší než u konvenčních vysokopevnostních ocelí a vysoké tuhosti, která zlepšuje bezpečnost při nárazu. [1]

Aplikace TWIP oceli na moderní karosérii automobilu je znázorněna na *obr. 2.14* červenou a zelenou barvou v procentuálním zastoupení 3,3 % a 9,1 %. [1]

TWIP oceli bez hliníku a křemíku byly vyvinuty pro extrémní požadavky tvářitelnosti a pevnosti. Jsou považovány za oceli druhé generace pro automobilový průmysl. [1]

Porovnání vlastností a mikrostruktury TWIP a TRIP ocelí je znázorněno na *obr. 2.14*.

Závěrem lze konstatovat, že vysokopevnostními materiály typu TWIP umožňují nejen v automobilovém průmyslu v široké míře využívat jeho výhodné vlastnosti. Ocele druhé generace řady TWIP s vysokým obsahem manganu zabezpečují konstrukčnímu materiálu vysokou pevnost při zachování vysoké tažnosti. Kombinace těchto dvou mechanických vlastností je velmi žádaná při konstrukci bezpečnostních částí automobilových karosérií. Poznatky v oblasti metalurgie jsou směřovány právě tímto směrem. TWIP oceli jsou proto řazeny k moderním materiálům současnosti, které jsou stále ve vyšších mírách využívány v různých konstrukčních aplikacích a různých odvětvích výroby. [1]

2.1.3.10 Borové oceli

Oceli, jejímž základem jsou martenzitické oceli se zbytkovým austenitem a vysokým podílem boru. Jako známé označení je používáno UHSS – B (Ultra High Strength – Boron Steels). Je zpracovávána vždy za vysokých teplot, a to dvěma způsoby:

- a) Ohřevem na stanovenou teplotu kalení, výdrž na této teplotě, lisování požadovaného tvaru a následné ochlazení, které je velice rychlé.
- b) Proveďte se lisování oceli za studena, poté následuje kalení na požadovanou teplotu s určitou výdrží a rychlé ochlazení do vodní nebo olejové lázně. [12]

Takto zpracovaná ocel je charakteristická vysokou pevností a tvrdostí. Tyto vlastnosti jsou však doprovázeny i křehkostí, což je nežádoucí. V důsledku křehkosti mohou být iniciovány trhliny. [12]

Obsah boru, v porovnání s ostatními legurami, není nikterak vysoký. Bor má podstatný vliv na prokalitelnost a tím i na výsledné mechanické vlastnosti oceli. Bor má za úkol potlačovat nukleaci feritu na hranicích austenitických zrn a zároveň podpořit martenzitickou přeměnu. [12]

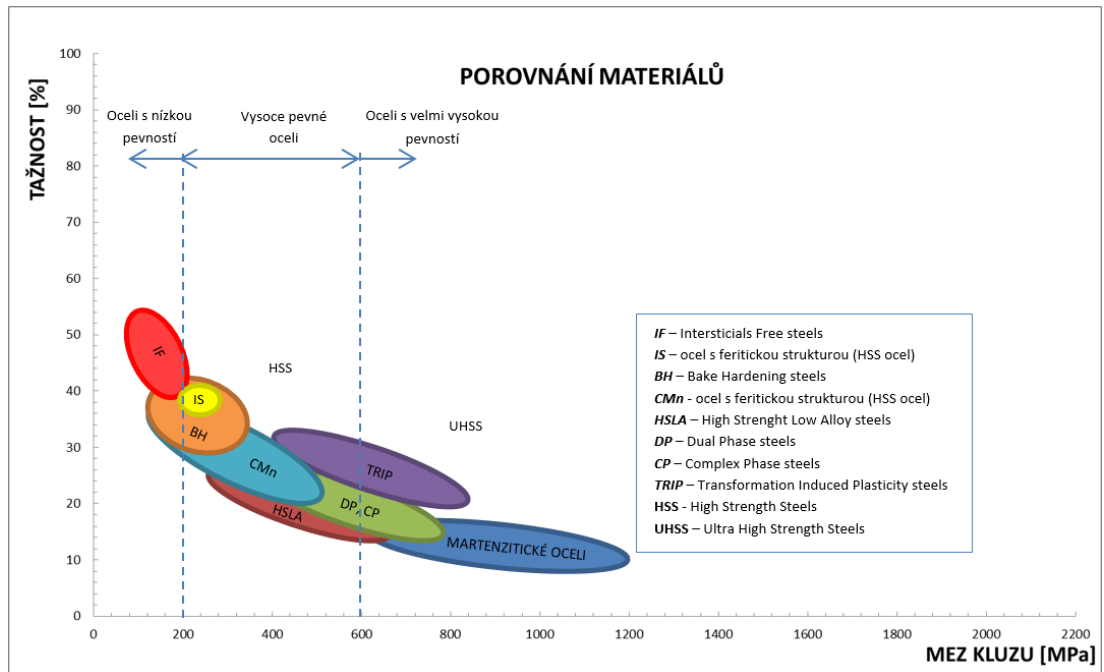
Borové oceli jsou používány především jako výztuhy A a B sloupků, střechy, dveří a prahů. [12]

2.1.4 Porovnání struktury a vlastností materiálů

Porovnání struktury a vlastností materiálů je shrnuto v následující tabulce (tab. 2.1). Na obr. 2.15 jsou graficky znázorněny vybrané mechanické hodnoty vybraných materiálů.

Tab. 2.1: Porovnání struktury a vlastností materiálů [2, 12]

Název	Mechanické vlastnosti		Struktura	Využití
	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]		
Hliníkem uklidněné oceli	až 210	270 až 350	Feritická matrice + legování Al, Mn, Si, S, P	Tvarově náročnější výlisky
IF oceli	až 160	120 až 290	Feritická matrice + mikrolegování Ti nebo Nb	Tvarově náročné výlisky
BH oceli	až 360	až 480	Feritická matrice + mikrolegování Ti nebo Nb	Tvarově náročné výlisky
DP oceli	až 1100	až 1180	Feritická matrice + legování Ni, V, Ti, Mo, Zr, B	Výztuhy
HSLA oceli	až 650	až 730	Feritická matrice (70 – 90 %) + oblasti martenzitu (10 – 35 %) + (zbytkový austenit)	Výztuhy
TRIP oceli	až 600	600 až 900	Feriticko – bainitická matrice + zbytkový austenit (6 – 10 %)	Deformační výztuhy
CP oceli	až 950	> 800	Feritická matrice + bainit + martenzit	Deformační výztuhy
MS oceli	min. 900	až 1800	Martenzitická struktura + oblasti feritu, příp. bainitu	Bezpečnostní výztuhy
TWIP oceli	až 1350	až 1470	Austenitická matrice + Mn (10 – 30 %), Al a Si	Pevnostní výlisky složitých tvarů, deformační členy
Borové oceli	až 1770	> 2000	Martenzitická struktura + zbytkový austenit + B	Výztuhy střeš, sloupků a prahů



Obr. 2.15: Porovnání tažností a mezí kluzů vybraných materiálů [13]

2.2 Zkoušky tvářitelnosti

2.2.1 Úvod

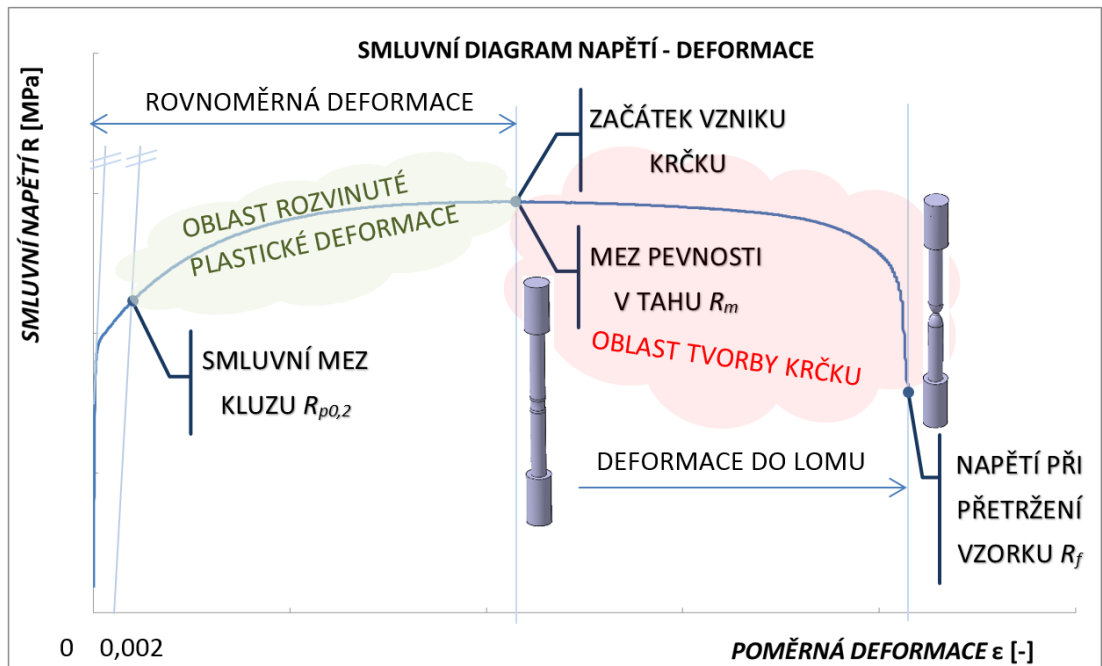
Tvářitelnost materiálů je schopnost materiálů vytvořit výrobek požadované jakosti plastickou deformací. Zkoušky mohou být prováděny za tepla nebo za studena. [14]

2.2.2 Tahová zkouška

Tahová zkouška je základní experimentální materiálovou zkouškou. Slouží ke zjišťování mechanických vlastností. Zkušební těleso je zatěžováno zpravidla až do jeho porušení. Je normalizována dle ČSN EN ISO 6892-1. [15]

V principu jde o tahové zatěžování vzorků (zkušebních těles) s cílem získat jednu nebo více materiálových charakteristik. Zkušební těleso je upnuto na obou koncích do čelistí. Délková změna je měřena pomocí průtahoměru, který může být bezkontaktní i kontaktní. Prodloužení lze také odečíst z pohybu příčnicku stroje. Zatížení je snímáno tenzometrem. [15, 16, 17]

Jelikož by vypracování tahové zkoušky dle normy výrazně překračovalo rozsah diplomové práce, bude přiblížena pouze v rozsahu hodnot potřebných pro výpočet odvozených ukazatelů tvářítečnosti.



Obr. 2.16: Smluvní diagram napětí – deformace [17, upraveno]

a) Smluvní diagram napětí – deformace:

Zkušební tyč s počáteční délkou L_0 a průřezu S_0 je zatěžována ve směru podélné osy silou F . V důsledku zatěžování se tyč prodlouží o hodnotu ΔL . [17]

$$L = L_0 + \Delta L \quad (2.1)$$

Průřez se zmenší na hodnotu S . [17]

$$S = S_0 - \Delta S \quad (2.2)$$

kde je:

L_0 – počáteční měřená délka [mm]

L – konečná měřená délka po lomu [mm]

ΔL – přírůstek délky [mm]

S_0 – počáteční průřezová plocha měřené délky [mm²]

S – koncový příčný průřez [mm²]

ΔS – úbytek průřezu [mm²]

Závislost síla – prodloužení získaná měřením lze přepočítat na jedinou závislost *smluvní napětí* (2.3) – *poměrná deformace* (2.4). [17]

$$R = \frac{F}{S_0} \quad (2.3)$$

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \text{ nebo } \varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad (2.4)$$

kde je:

R – smluvní napětí [MPa]

ε - poměrná deformace [-]

S_0 – počáteční průřezová plocha měřené délky [mm²]

L_0 – počáteční měřená délka [mm]

Přírůstek délky $L - L_0$ se často označuje ΔL .

Počáteční průběh křivky je popsán *Hookeovým zákonem* (2.5). [17]

$$R = \varepsilon E \quad (2.5)$$

kde je:

R – smluvní napětí [MPa]

E – Youngův modul pružnosti v tahu materiálu zkušební tyče [MPa]

ε – poměrná deformace [-]

b) Smluvní mez pevnosti:

Smluvní mez pevnosti lze získat z maximální síly dosažené při zkoušce a počátečního průřezu. Je to tedy maximální napětí. [17]

$$R_m = \frac{F_{\max}}{S_0} \quad (2.6)$$

kde je:

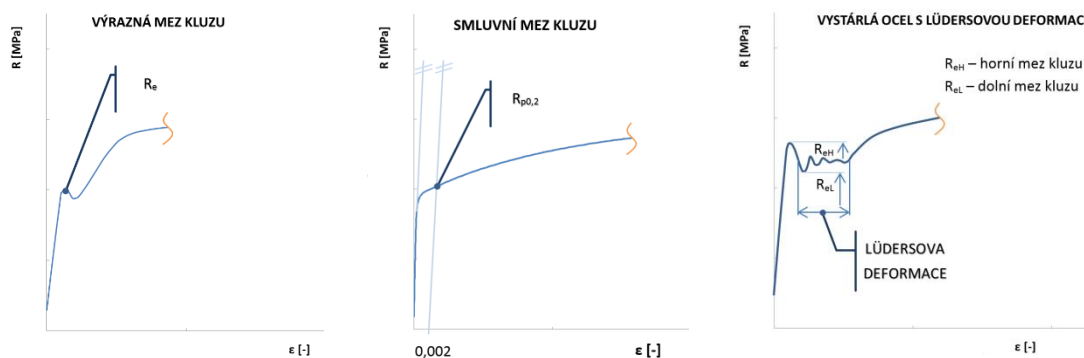
R_m – mez pevnosti [MPa]

F_{\max} – maximální síla dosažená při zkoušce [N]

S_0 – počáteční průřezová plocha měřené délky [mm²]

c) Meze kluzu:

Meze kluzu lze dle projevu materiálu při zkoušce rozdělit do třech skupin, a to na *výraznou mez kluzu* R_e , *smluvní mez kluzu* $R_{p0,2}$ (napětí vyvolávající plastickou deformaci $\epsilon_p = 0,002$) a *mez kluzu u vystárlé oceli* (oceli s tzv. *Lüdersovou prodlevou*; objevuje se zde horní R_{eH} a dolní R_{eL} mez kluzu). [15]



Obr. 2.17: Meze kluzu [15]

d) Deformační charakteristiky:

Mezi deformační charakteristiky patří tažnost A_x (2.7) a kontrakce Z (2.8). [17]

$$A_x = \frac{L_u - L_0}{L_0} \quad (2.7)$$

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \quad (2.8)$$

kde je:

A_x – tažnost [%]

Z – kontrakce [-]

L_0 – počáteční měřená délka [mm]

L_u – konečná měřená délka po lomu [mm]

S_0 – počáteční průřezová plocha měřené délky [mm²]

S_u – minimální průřezová plocha po lomu [mm²]

Homogenní tažnost A_g (2.9) je tažnost na mezi pevnosti R_m . [17]

$$A_g = \frac{\Delta L_{Rm}}{L_0} \quad (2.9)$$

kde je:

A_g – plastické prodloužení měřené průtahoměrem při maximálním zatížení [%]

ΔL_{Rm} – prodloužení na mezi pevnosti [mm]

L_0 – počáteční měřená délka [mm]

e) Diagram skutečné napětí – skutečná deformace:

Skutečné napětí lze získat podílem síly a okamžitého průřezu vzorku. [17]

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (2.10)$$

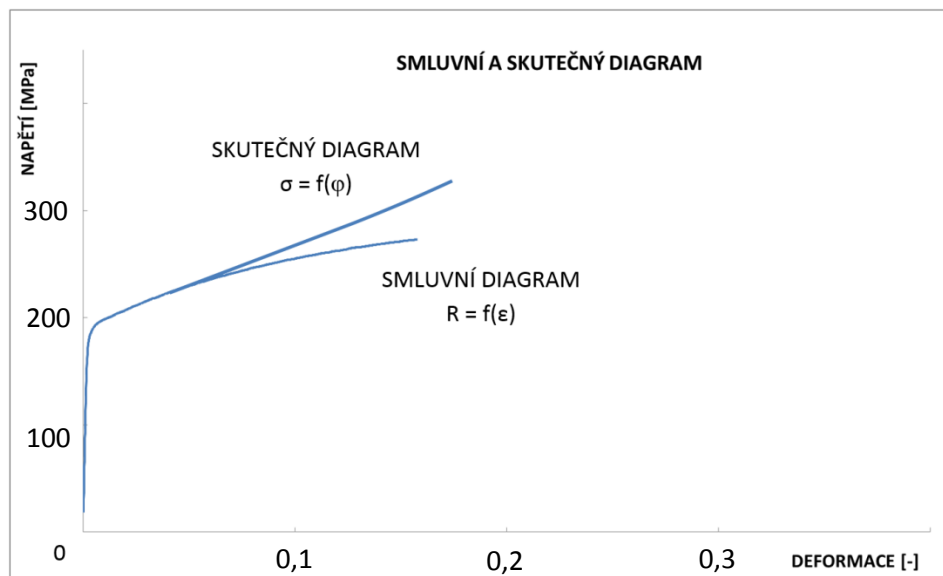
kde je:

σ – skutečné napětí [MPa]

F – síla [MPa]

S – okamžitý průřez [mm²]

f) Porovnání smluvního a skutečného diagramu:



Obr. 2.18: Porovnání smluvního a skutečného diagramu [17]

2.2.3 Technologické zkoušky

2.2.3.1 Úvod

Výroba výlisků nepravidelných tvarů karosářského typu je jednou z nejnáročnějších v oblasti plošného tváření. Jsou to výlisky většinou složitých prostorových obrysů a tvarů. Při jejich lisování je plech podrobován komplexnímu přetváření, které v sobě podle charakteru výlisku obecně ve větší nebo menší míře zahrnuje:

- a) Prvky hlubokého tažení při dominantním uplatňování posuvů,
- b) Přetahování přes tažnou hranu tažnice provázené ohybem a narovnáním – v těchto oblastech je plech přidržovačem záměrně brzděn (např. brzdícími lištami) kvůli vypínání plechu a nabíhání plechu na tažnou hranu,
- c) Ve tvarově složitých oblastech v důsledku omezeného styku plechu s nástrojem,
- d) V plochách na povrchu výlisků a v nich umístěných tvarových prvcích je uplatňováno převážně vypínání,
- e) V některých případech je uplatňováno i rozšiřování předstřižených (tzv. technologických) otvorů v návaznosti na tvarové prvky v plochách,
- f) V operacích následujících po první operaci tažení jsou mimo operace ostříhování a děrování realizovány dílčí tvarové změny (např. zmenšování přechodových rádiusů, dolisování, vytváření místních prolisů a kalibrace tvaru a rozměru). [18]

2.2.3.2 Hodnocení lisovatelnosti plechů ve vztahu ke karosářským výliskům

Společným rysem lisovaných dílů je uplatňování dvou základních procesů, a to posuvů a vypínání. [1]

Technologickou tvářitelnost lze hodnotit poměrem meze pevnosti a meze kluzu společně s jednoduchou plastičností, vyjádřenou tažností nebo rovnoměrnou tažností. V této souvislosti je používáno *komplexního ukazatele tvářitelnosti* uvedeného ve vzorci 2.11. [5]

$$KUT = \frac{R_m}{R_{p0,2}} \cdot A_x, \text{ resp. } KUT = \frac{R_m}{R_{p0,2}} \cdot \varepsilon_m \quad (2.11)$$

kde je:

KUT – komplexní ukazatel tvářitelnosti [- nebo %]

R_m – mez pevnosti v tahu [MPa]

$R_{p0,2}$ – smluvní mez kluzu v tahu [MPa]

A_x – tažnost [%]

ε_m – rovnoměrná tažnost [%]

V oblastech, kde dochází k většímu vypínání je nutno zohlednit vedle plastičnosti i exponent deformačního zpevnění n . z tohoto hlediska je nutno podpořit hodnocení plechů s použitím tzv. *indexu tvářitelnosti*, viz vzorec 2.12. [18]

$$IT = r \cdot n \cdot 1000 \quad (2.12)$$

kde je:

IT – index tvářitelnosti [-]

r – hodnota normálové anizotropie [-]

n – exponent deformačního zpevnění [-]

Další hodnotou, kterou lze získat z údajů získaných tahovou zkouškou, je zásoba plastičnosti, viz vzorec 2.13. [5]

$$ZP = k \cdot (R_m - R_{p0,2}) \cdot \varepsilon_{\max} \quad (2.13)$$

kde je:

ZP – zásoba plastičnosti [-]

k – koeficient (pro materiály s výraznou mezí kluzu je roven 2/3 a bez výrazné meze kluzu je roven 3/4) [-]

R_m – mez pevnosti v tahu [MPa]

$R_{p0,2}$ – smluvní mez kluzu v tahu [MPa]

ε_{\max} – celková tažnost [%]

Z poměru meze pevnosti a meze kluzu, příp. smluvní meze kluzu, lze vypočítat tzv. ukazatel hlubokotažnosti (vzorec 2.14). [5]

$$UH = \frac{R_m}{R_{p0,2}} \quad (2.14)$$

kde je:

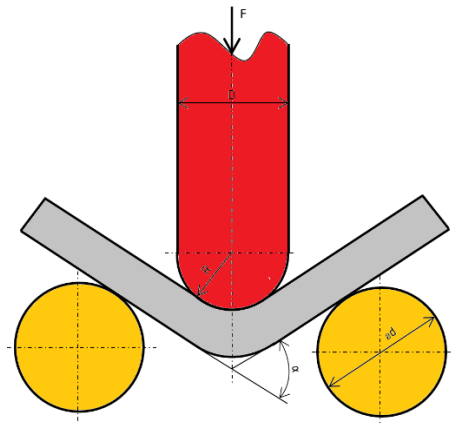
UH – ukazatel hlubokotažnosti [-]

R_m – mez pevnosti v tahu [MPa]

$R_{p0,2}$ – smluvní mez kluzu v tahu [MPa]

2.2.3.3 Zkouška lámavosti

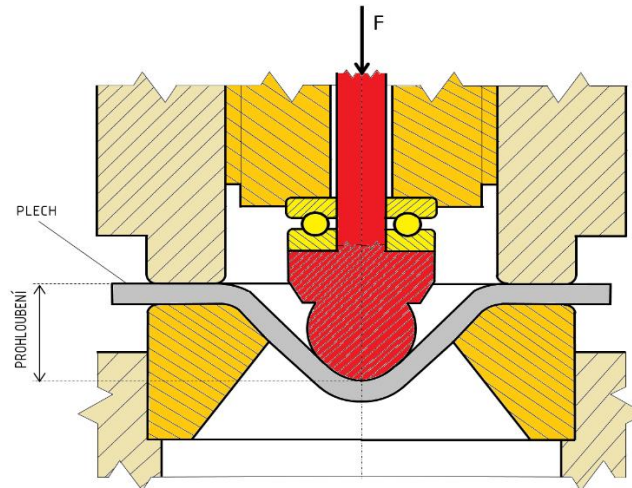
Výstupem ze zkoušky je velikost úhlu vytvořeného ohybem zkušební tyče. Zkušební tyče se používají o délce 200 až 400 mm a šířce 25 až 50 mm. Ohyb probíhá na dvou podporách, kde D je průměr válcové části trnu, d je průměr podpěrných válečků. Při zkoušce se určuje úhel ohybu, při kterém jsou na vnější straně vytvořeny první trhlinky. Princip je znázorněn na obr. 2.19. [14]



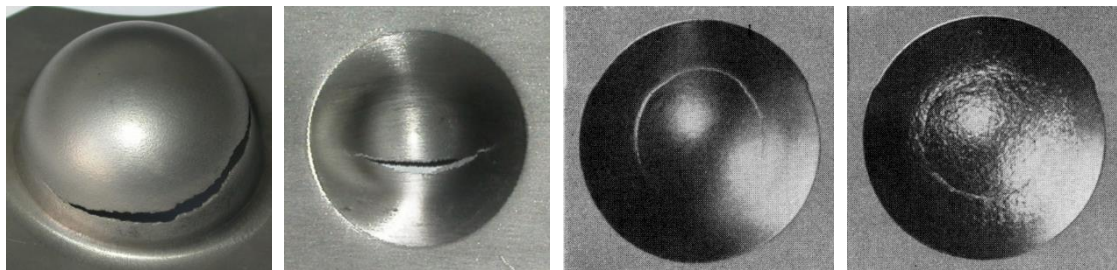
Obr. 2.19: Zkouška lámavosti [19]

2.2.3.4 Zkouška hlubokotažnosti podle Erichsena

Při zkoušce hloubením je vzorek plechu upnut mezi matrici a přidržovač plechu. Vzorek je čtvercového tvaru o délce hrany 70 mm. Následuje pak prohloubení tvrzeným vyleštěným kulovitým nástrojem. Tato procedura probíhá za předepsané rychlosti, dokud nezpůsobí jemnou nepřerušovanou trhlinu v plechu. Výstupem ze zkoušky je posuv razníku při výskytu první trhliny. Zkouška je vhodná jak pro vstupní inspekční kontrolu, tak i pro průběžnou výrobní kontrolu a to s málo časově náročnou přípravou vzorků. Princip hloubením plechu podle Erichsena je patrný z obr. 2.20, na obr. 2.21 jsou různé trhliny v materiálech po zkoušce. [14, 20]



Obr. 2.20: Princip zkoušky hloubením plechu [19]



Tvárné materiály

Křehké materiály

Materiály
s jemnozrnnou
strukturouMateriály s hrubou
licí strukturou

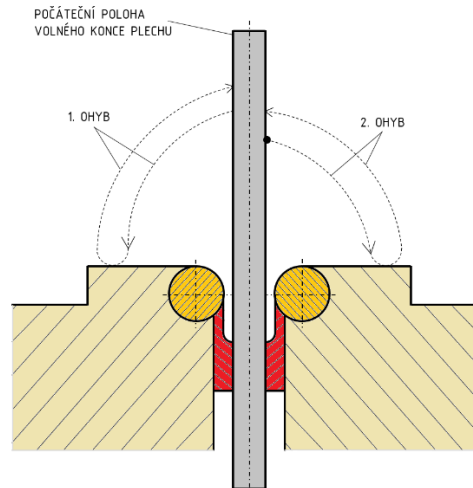
Obr. 2.21: Trhliny po Erichsenově zkoušce v materiálech s různou strukturou [21]

Misková zkouška hlubokého tažení je metoda testování plechu, při které je plech kruhového tvaru (rondel) vyražen z pásu plechu. Poté následuje tažení do tvaru misky. Nejlepší možný poměr mezi průměrem rondelu a tažníku, který dovoluje bezvadnou výrobu misky, je tzv. limitující poměr tažení, označovaný jako β_{max} , jenž představuje atribut kvality tvářecích možností plechů. Vzniklé cípy, způsobené anizotropií materiálu, jsou nežádoucí, protože vyžadují dodatečné oddělení od dílů v reálné výrobě. Touto zkouškou je možné najít i vhodný typ plechu, potřebný pro požadované technologické operace. [20]

Na univerzálních zkušebních strojích lze provádět vedle Erichsenovy zkoušky i zkoušku hloubením podle Olsena nebo Persoze, zkoušku hlubokého tažení čtyřhranných misek, miskovou zkoušku hlubokého tažení podle Swifta, zkoušku s nahřívacím zařízením, zkouška vydutí, lubrikace atp. [20]

2.2.3.5 Zkouška plechů a pásů střídavým ohýbáním

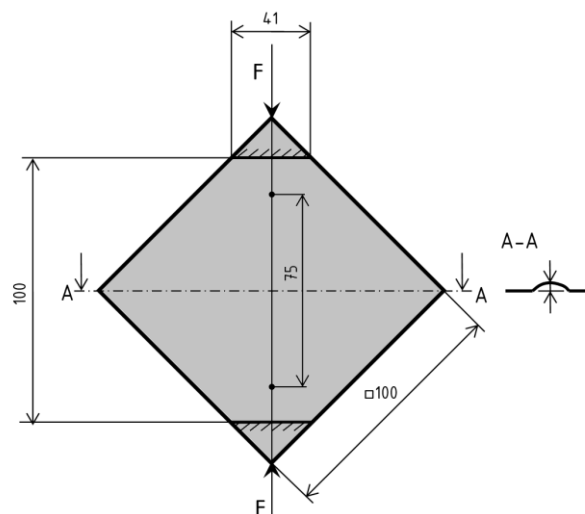
Je podobná zkoušce s drátem. Za jeden ohyb je však považován ohyb o 90° z výchozí do krajní polohy a zpět. Princip viz. obr. 2.22. [19]



Obr. 2.23: Zkouška plechů střídavým ohýbáním [19]

2.2.3.6 Zkouška vyboulením (Yoshida Buckling Test)

Vzorek čtvercového tvaru je upevněn v protilehlých rozích a ustaven ve stroji v diagonálním směru. Většinou je využíván vzorek o straně čtverce 100 mm a šířkou uchycení čelistí 41 mm a délkou rozpětí čelistí 75 mm. Prohnutá výška je měřena přes 25,4 mm (1 palec) šířku ve středu vzorku. Díky svému tvaru jsou nerovnoměrná napětí pohlcována ve vzorku a způsobují vznik vzpěru ve středu vzorku podél směru stlačování. Princip je na obr. 2.24. [15, 22]



Obr. 2.24: Schéma Yoshida testu ve vzpěru [15, 22]

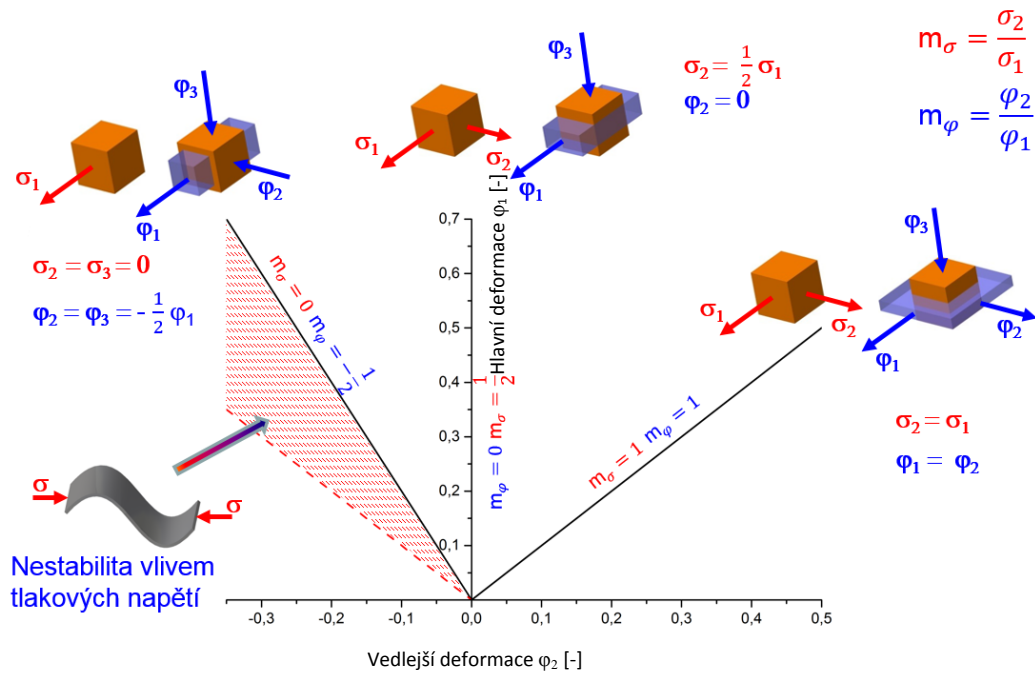
2.2.3.7 Zkoušky tvářitelnosti za tepla

Mezi tyto zkoušky jsou zařazeny zkoušky rozkováním, děrováním, rozštěpením, zkoušky ohybové, pýchovací, krutové, válcováním aj. Pro ilustraci uvedu zkoušku kovatelnosti oceli. Ze zkoušeného materiálu je vykována plochá tyč, do které jsou proraženy dva otvory. Krajní otvor je rozštěpen a oba konce se rozevrou. Druhý otvor je rozšířen na 15 mm a úplně se ohrnou rozštěpené konce. U dobře kovatelného materiálu se nesmí objevit trhliny. [17]

2.2.4 Experimentální metody v tváření

2.2.4.1 Diagramy mezních přetvoření (FLC/FLD)

Diagram mezních přetvoření (FLC/FLD – Forming Limit Curve/Diagram), je důležitým ukazatelem schopnosti materiálu se při daném stavu napjatosti bez porušení celistvosti deformovat. Diagramy mezních přetvoření jsou normalizovány dle normy *ISO/DIS 12004-2*. Z FLC je získána oblast bezpečná pro lisování a oblast nepřípustných deformací. Mezi těmito oblastmi leží tzv. pásmo mezních přetvoření. Pro stanovení FLC je nutno určit při daných teplotně-rychlostních podmínkách mezní deformaci materiálu při různém stavu napjatosti. Diagram mezních přetvoření lze získat více způsoby. FLC křivku lze získat buď experimentálně, použitím zjednodušeného modelu nebo numerickou simulací. Mezi experimentální metody patří například provedení *Nakazima* nebo *Marciniakova* testu. Mezi matematické modely lze zařadit například *Hill-Swift (Rees)*, *Sing-Rao*, *NADDRG (Levy)* nebo *Raghavan* model. V případech numerické simulace je možno kombinovat různé matematické či experimentální modely za použití nejrůznějších materiálových modelů. Na *obr. 2.25* jsou znázorněny stavy napjatosti v souřadnicích hlavní a vedlejší deformace ($\varphi_1 - \varphi_2$). [23, 24]



Obr. 2.25: Stavy napjatosti v souřadnicích hlavní a vedlejší deformace [24]

Pro napětově-deformační vyšetřování vzorků a komponent jsou stále častěji nasazovány nové technologie, následující nové softwarové přístupy. Jedním z příkladů zástupce nových trendů je optický měřicí systém *Aramis* od firmy GOM, který je určen pro bezkontaktní měření reálných 3D deformací (obr. 2.26). Díky systému *Aramis* lze získat data o kompletním 3D povrchu, objemu a deformacích. [23]



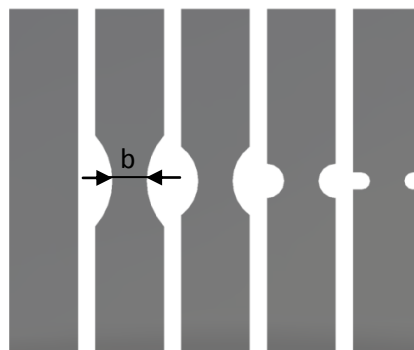
Obr. 2.26 Využití systému ARAMIS při tahové zkoušce [23]

Experimentální získání diagramu mezních přetvoření

Diagram mezních přetvoření lze pomocí experimentálních měření získat různými způsoby. Levá část může být získána pomocí *tahové zkoušky*, kdy jsou na vzorcích kvůli změně stavu napjatosti a s tím související hlavní a vedlejší deformací, vytvořeny vruby různých tvarů (*obr. 2.27*). Výhodou tohoto postupu je jednoduchá příprava vzorků. Pravou část diagramu, tj. oblast kladných hlavních a vedlejších deformací, lze určit pomocí zkoušky *hydrostatickým vyboulováním (Bulge test)*. Při tomto testu je eliminováno nežádoucí tření mezi tažníkem a vzorkem tlakovým olejem. Zkouška spočívá v nahrazení tažníku olejem, který je pomocí agregátu vtlačován pod přístřih a tím přístřih deformuje. Zamezením tření je zabezpečeno to, že je trhlinka ve vzorku iniciována v místě, kde je v toleranci podle normy. Zkouška je založena na použití tažnic různého tvaru, které simulují požadované deformace (*obr. 2.28*). Pro modelování levé i pravé oblasti FLC diagramu je využíváno tzv. *Nakazima testu*. K testu jsou využívány kruhové přístřihy s proměnnou velikostí odlehčení (šířkou b). Velikost vybrání je zmenšována od levé k pravé části diagramu, tj. od jednoosého tahu až po rovnoosé vypínání. Velkou nevýhodou tohoto testu je tření, které se zvyšuje se zmenšujícím se vybráním vzorku. Tím je zapříčiněno to, že v oblasti rovnoosého vypínání je téměř nemožné iniciovat trhlinku na nejvyšším bodě vrchlíku. Norma připouští vznik trhliny maximálně 15 mm od vrcholu. Zde lze s výhodou použít výše zmíněný Bulge test. Tvary vzorků jsou uvedeny na *obr. 2.29*.

[23, 24, 25]

Pro napěťově-deformační analýzy vzorků a komponent jsou stále častěji nasazovány nové technologie, následující nové softwarové přístupy. Jedním z příkladů zástupce nových trendů je optický měřicí systém Aramis od firmy GOM, který je určen pro bezkontaktní měření reálných 3D deformací. Díky systému Aramis lze získat data o kompletním 3D povrchu a deformacích. [23]



Obr. 2.27: Tvary vzorků pro tahovou zkoušku [24]



Obr. 2.28: Tvary tažnic pro zkoušku hydrostatickým vyboulováním [24]



Obr. 2.29: Tvary přístřihů pro Nakazima test [24]

Princip měření

Je využívána záznamová technika v podobě dvou CMOS (nebo CCD) kamer. Princip zjišťování posunutí a deformace spočívá v nanesení kontrastního vzoru na povrch zkoumaného objektu. Zkoumaná oblast je pak pomocí softwaru rozdělena do menších podoblastí, na kterých je následně spočítán přesný poměr bílých a černých pixelů, tzv. stupeň šedi. Nanesení vzoru je prováděno ručně, proto se jedná o náhodnou veličinu a určování oblasti je pevně definováno. [23]

Systém pracuje díky dvěma kamerám ve 3D a po zaznamenání referenčního stavu jsou hledány v následném (zatíženém) stavu stejné podoblasti. Poloha podoblastí je zjištěna pomocí stupně šedi. Snímání může probíhat i za velkých frekvencí snímání. [23]

Pro získání přesných výsledků je nutno nanášet nástřík (tzv. pattern) správnou technikou. Musí být dosaženo nanesení s dostatečnou hustotou nástříku a přitom je nutno zabránit tvorbě velkých černých oblastí na povrchu plechu (obr. 2.30). Je-li hustota nástříku menší, tak dochází k ponechání velkého podílu bílé podkladové barvy ve fazetce. Následkem toho je fazetce přiřazena šedá barva s takovou stupní šedi, která může být velmi blízká jiné fazetce. Toto platí i při velmi vysoké hustotě nástříku, kdy vznikají velké černé oblasti. [26]



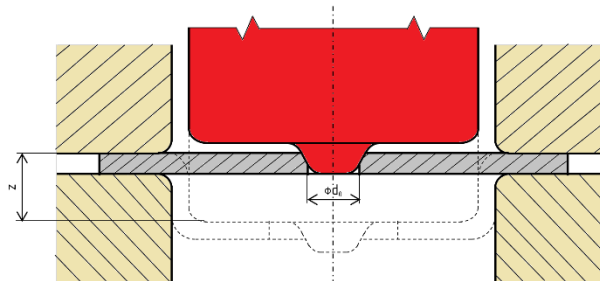
Obr. 2.30: Příklad nesprávného nanesení patternu [26]

Křivky mezních přetvoření (FLC/FLD)

Systém Aramis je možné použít v procesu měření materiálových charakteristik či křivek mezních deformací. V diagramu mezních deformací jsou obsaženy informace o hlavních a vedlejších napětích šetřených míst výlisku. Křivku mezních přetvoření lze využít jak pro posuzování tvářitelnosti materiálu na základě měření deformací na výlisku (např. optickou metodou), tak i pro posuzování tvářitelnosti materiálu na základě výsledků numerické simulace. V obou případech je možné zjistit tvářitelnost materiálu. V případě, že se v některém místě stav deformace přibližuje anebo převyšuje FLC, je nutné proces tváření navrhnout jiným způsobem. Zlepšení stavu lze získat například zlepšením třecích poměrů, zvětšením tažné mezery, změnou konstrukce výlisku nebo změnou materiálu. [23]

2.2.4.1 Zkouška rozšiřováním otvoru

Je nazývána též jako zkouška dle Siebela – Pompa. Spočívá v tažení zkoušeného přístřihu s kruhovým otvorem válcovým tažníkem s rovným čelem. Při tažení je zvětšován původní otvor. Zkouška je zastavena v okamžiku, kdy jsou v okolí otvoru indikovány první trhliny. Výsledkem zkoušky je hloubka tahu, rozšíření a plošná anizotropie. Princip je patrný z obr. 2.31. [27]



Obr. 2.31: Zkouška rozšiřováním otvoru [24]

2.2.4.2 Tahová zkouška

Statickou zkoušku tahem lze kromě použití s cílem zjištění základních materiálových charakteristik využít i ke stanovení odvozených ukazatelů tvářitelnosti. viz. kapitola 2.2.2.

3 Experimentální část

3.1 Úvod

Cílem experimentální části diplomové práce je zhodnocení možnosti použití pevnostního materiálu pro aplikaci na povrchové výlisky. Pro zjištění tvářecí schopnosti tohoto materiálu je nutno naměřit materiálové charakteristiky. Tato data je nutno zjistit kvůli numerické simulaci a výpočtům. Simulovaný díl je potřebné i prakticky vylisovat kvůli porovnání výsledků simulace s reálnými výsledky. Po simulaci a analýze odpružení musí následovat kompenzace odpružení. Závěrem je navržen nejvhodnější metodiky pro tváření výlisků z vysokopevných materiálů pro pohledové díly karoserie.

3.2 Volba vysokopevného materiálu

Za materiál výlisku byla zvolena DP (Dual Phase) ocel, přesněji ocel s označením CR330Y590T-DP-GI-60/60-U-O dle interní normy VW 50065, HC340XD+Z140-M-B-O dle DIN EN. Byla použita v tloušťce 0,6 mm. Tato ocel spadá do ocelí vysokopevnostních, je tedy vhodná pro tuto aplikaci. DP oceli mají menší hodnotu normálové anizotropie r , nejsou tedy vhodné pro zvláště hluboké výtažky. Jako povrchová úprava byla vybrána tato ocel jako žárově pozinkovaná. Žárové pozinkování je totiž v dnešní době nejfrekventovaněji používanou povrchovou úpravou pro hlubokotažné plechy. V neposlední řadě patří také k těm levnějším. V následující tabulce (tab. 3.1) jsou uvedeny základní charakteristiky uvedené oceli.

Tab. 3.1: Základní mechanické charakteristiky materiálu CR330Y590T-DP-GI-60/60-U-O [28, 29]

	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Tažnost A_{80mm} [%]	Exponent deformačního zpevnění n [-]	BH [MPa]	Youngův modul E [MPa]
Materiálový list	370	620	20	0,191	>30	210 000
Naměřeno	362*	669*	25	0,215*	-	217 758

*platí pro směr 0°

3.3 Tahová zkouška

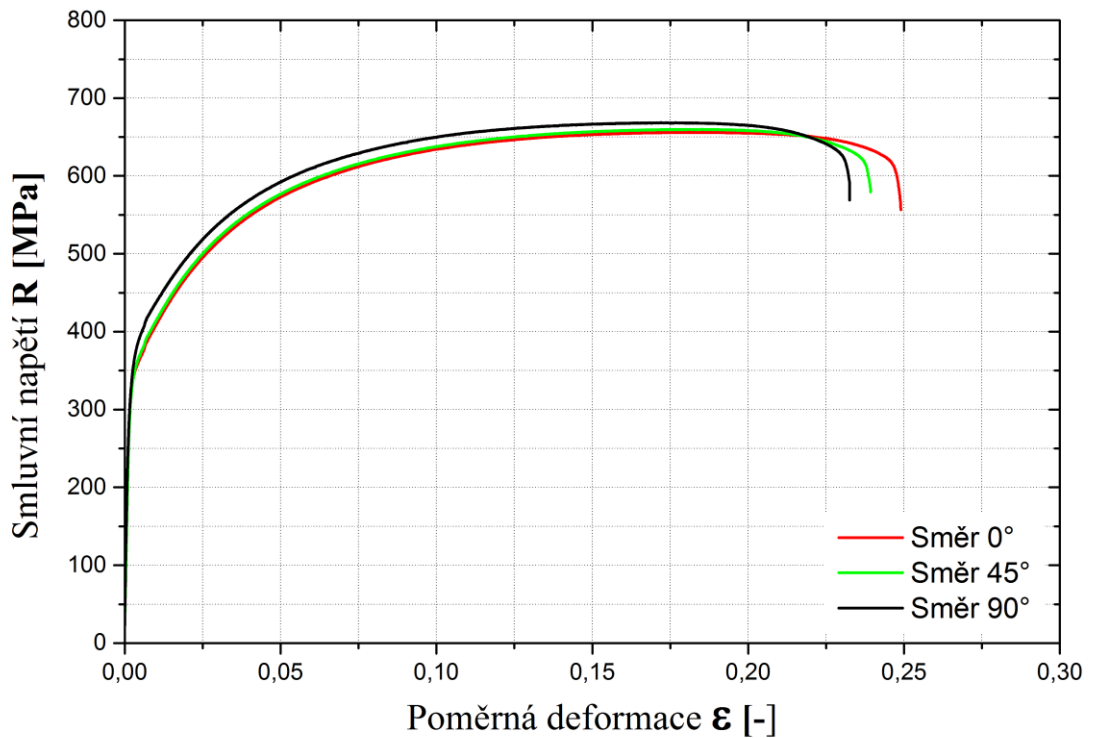
Statická zkouška tahem byla provedena celkem na devíti vzorcích, tj. na třech sériích vzorků ve třech směrech válcování (0° , 45° , 90°) po třech tyčinkách. Postup měření je následující:

- 1) *Příprava vzorků*: Vzorky byly vytvořeny ustřížením plechů, na jejichž bocích byly vyfrézovány krčky. Přetržený vzorek je na obr. 3.4.
- 2) *Broušení stran vzorků*: Kvůli zamezení nebo alespoň zmírnění vrubových účinků po obrábění.
- 3) *Trhání vzorků*: Byla použito trhací zařízení TIRA TEST 2300 s měřením průtahu pomocí průtahoměru stroje.
- 4) *Zpracování výsledků*: Byly spočteny hodnoty smluvní meze kluzu, meze pevnosti, tažnosti, exponentu deformačního zpevnění a koeficientu normálové anizotropie (r_0 , r_{45} , r_{90}). Dále byla zjištěna hodnota Youngova modulu pružnosti v tahu E . Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tab. 3.2, v tab. 3.1 je porovnání zjištěných a zadaných hodnot materiálovým listem.

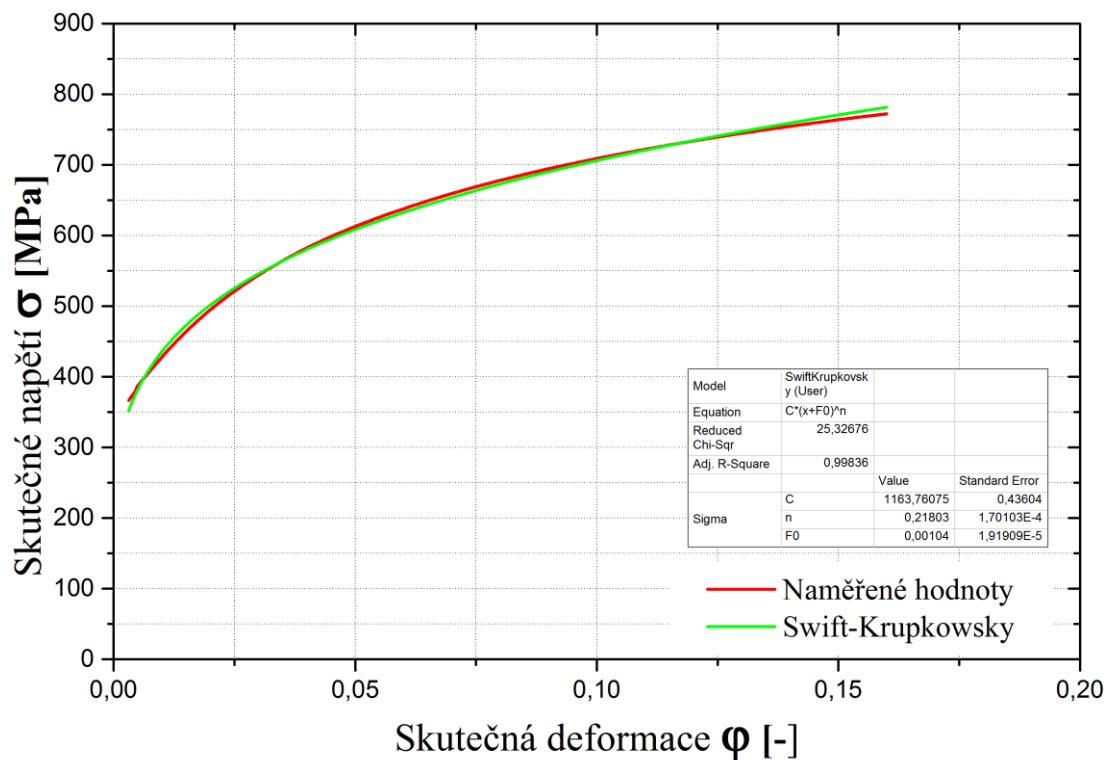
Smluvní diagram oceli CR330Y590T-DP-GI-60/60-U-O je uveden na obr. 3.1, na obr. 3.2 je aproximace tahové zkoušky pro směr 0° .

Tab. 3.2: Změřené mechanické charakteristiky materiálu CR330Y590T-DP-GI-60/60-U-O

		Směry		
		0°	45°	90°
Naměřené hodnoty	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	362,0±4,002	358,0±0,198	370,0±4,603
	Mez pevnosti v tahu R_m [MPa]	669,0±11,144	661,0±1,633	667,5±1,252
Spočtené hodnoty	Tažnost A_{80mm} [%]	24,6±0,113	24,3±0,919	22,7±0,495
	Homogenní tažnost A_g [%]	17,8±0,042	17,9±0,354	16,9±0,339
	Modul monotónního zpevnění C [MPa]	1163,76±0,436	1156,16±0,40432	1176,23±0,44907
	Exponent deformačního zpevnění n [-]	0,21803±0,00017	0,21390±0,00016	0,21398±0,00017
	Skutečná deformace φ [MPa]	0,27716±0,00107	0,27467±0,00873	0,25928±0,00477
	Offsetová deformace φ_0 [MPa]	0,00104±0,00002	0,00122±0,00002	0,00209±0,00002
	Koef. normálové anizotropie r_0 [-]	0,925±0,007	-	-
	Koef. normálové anizotropie r_{45} [-]	-	1,029±0,124	-
	Koef. normálové anizotropie r_{90} [-]	-	-	1,046±0,019
Modul pružnosti v tahu E [MPa]	217 758±4234			



Obr. 3.1 Smluvní diagram oceli CR330Y590T-DP-GI-60/60-U-O – porovnání směrů válcování



Obr. 3.2 Aproximace tahové zkoušky – směr válcování 0°

K aproximaci tahové zkoušky bylo použito teorie *Swift – Krupkowski* s tzv. offsetovou deformací φ_0 . Aproximace vychází ze vzorce 2.11.

$$\sigma = C \cdot (\varphi + \varphi_0)^n \quad (3.1)$$

kde je:

σ – skutečné napětí [MPa]

C – modul monotónního zpevnění [MPa]

φ – skutečná deformace [MPa]

φ_0 – offsetová deformace [MPa]

3.4 Stanovení odvozených ukazatelů tvářitelnosti

Ukazatele tvářitelnosti byly vypočteny dle kapitoly 2.2.3.2 a výsledky shrnuty v tab. 3.3.

- **Komplexní ukazatel tvářitelnosti:**

$$R_m = 669,0 \text{MPa}$$

$$R_{p0,2} = 362,0 \text{MPa}$$

$$A_{80\text{mm}} = 24,6\%$$

$$KUT = \frac{R_m}{R_{p0,2}} \cdot A_x = \underline{\underline{0,4546}} \quad (3.2)$$

- **Index tvářitelnosti:**

$$r = 0,925$$

$$n = 0,215$$

$$IT = r \cdot n \cdot 1000 = \underline{\underline{198,88}} \quad (3.3)$$

- **Zásoba plastičnosti:**

$$R_m = 669,0 \text{ MPa}$$

$$R_{p0,2} = 362,0 \text{ MPa}$$

$$k = 3/4$$

$$\varepsilon_{\max} = 0,246$$

$$ZP = k \cdot (R_m - R_{p0,2}) \cdot \varepsilon_{\max} = \underline{\underline{56,60}} \quad (3.4)$$

- **Ukazatel hlubokotažnosti:**

$$R_m = 669,0 \text{ MPa}$$

$$R_{p0,2} = 362,0 \text{ MPa}$$

$$UH = \frac{R_m}{R_{p0,2}} = \underline{\underline{1,85}} \quad (3.5)$$

Tab. 3.3: Odvozené ukazatele tvářitelnosti materiálu CR330Y590T-DP-GI-60/60-U-O

Ukazatel	Hodnota
Komplexní ukazatel tvářitelnosti	0,4546
Index tvářitelnosti	198,88
Zásoba plastičnosti	56,60
Ukazatel hlubokotažnosti	1,85

3.5 Stanovení FLC křivky

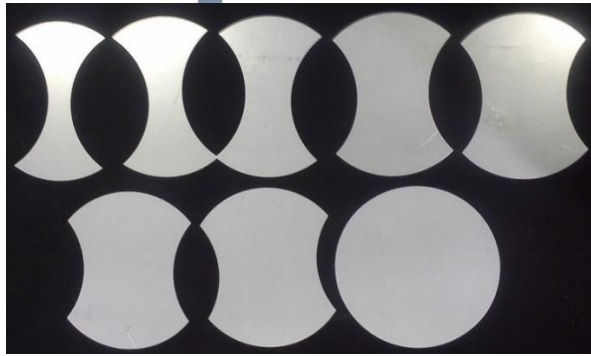
FLC křivka byla vytvořena pomocí 2M kamer a softwaru ARAMIS. Vyhodnocení dat probíhalo v softwaru ARAMIS, který umožňuje analýzu deformace a získání potřebných dat k sestavení FLC. Určení křivky probíhalo v souladu s normou *ISO/DIS 12004-2*. Postup zjištění je uveden níže.

Postup měření:

- 1) *Příprava vzorků:* Nejprve byly vystřižnuty vzorky. Příprava vzorků spočívala ve vystřižení přístřihů kruhových tvarů s různým bočním ostřihnutím, viz. obr. 3.3. Byly voleny šířky 30, 60, 90, 105, 120, 130 mm a plné vzorky o průměru 210 mm. Kromě toho bylo nutno na vzorky nanést vzor, tzv. pattern, kvůli následnému snímání deformací. Pattern (černá barva) byl nanesen kvůli kontrastu na světlém podkladu (bílá barva).
- 2) *Lisování vzorků:* Zde docházelo k trvalé deformaci vzorků při současném měření deformací pomocí optického systému ARAMIS. V tomto kroku bylo velmi důležité dostatečné mazání kvůli maximální eliminaci tření mezi tažníkem a vzorkem.
- 3) *Vyhodnocení dat:* Data naměřená na stroji bylo nutno vyhodnotit pomocí softwaru ARAMIS. Při vyhodnocení bylo nutno na vzorku vhodně zvolit startovací body (tj. bod, od kterého software začíná výpočet; musí být viditelný na všech snímcích) a kvůli rychlejšímu výpočtu vhodně aplikovat na vzorek masku (místo, které určuje, jakou část sítě program dále vyhodnocuje). Po tomto úkonu již mohl být proveden výpočet. Po vyhodnocení následovala tvorba řezu v místě největšího napětí těsně před přetržením vzorku. Prostředí softwaru je zobrazeno na obr. 3.4.
- 4) *Tvorba FLC:* I zde byl použit software ARAMIS. Tato procedura je v softwaru plně automatizovaná a postupuje podle již výše uvedené normy. Křivka je uvedena na obr. 3.3 a přiložena jako příloha práce č. 2.

Byly použity 4 kusy vzorků pro každou deformační stopu. FLC křivka materiálu CR330Y590T-DP-GI-60/60-U-O je uvedena na obr. 3.6 a přiložena jako příloha zprávy č. 1.

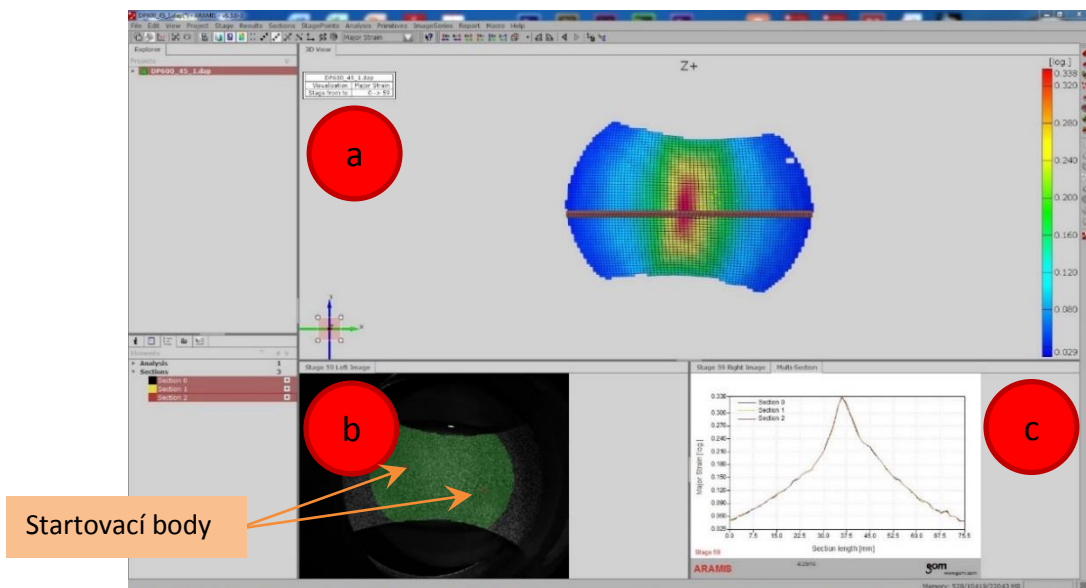
Pozn.: Levá a část pravé strany FLC křivky byla sestrojena pomocí tzv. *Nakazima* testu, tj. přístřihů s různou hodnotou vybrání. Naopak krajní hodnoty na pravé straně (oblast rovnoosého vypínání) bylo nutno zkonstruovat za použití *Bulge testu*, při kterém dochází díky vyboulování pomocí kapaliny k eliminaci tření mezi tažníkem a přidržovačem.



Obr. 3.3: Tvary vzorků

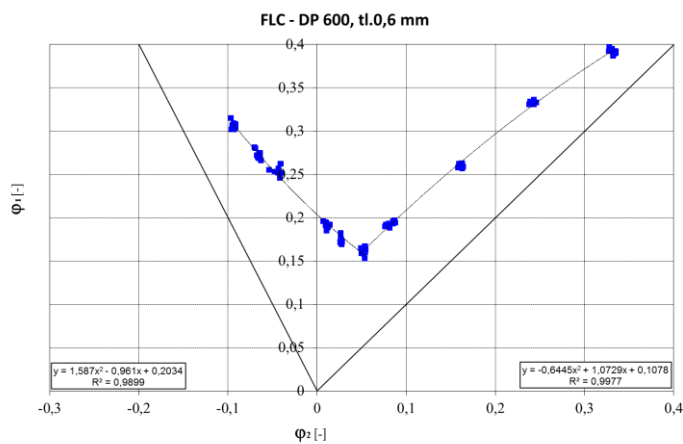


Obr. 3.4: Vzorek pro zkoušku tahem



Obr. 3.5: Prostředí softwaru ARAMIS

- a) Oblast znázornění deformace,
- b) Pohled z kamery - včetně startovacích bodů,
- c) Rozložení deformace v řezu.



Obr. 3.6: FLC křivka materiálu CR330Y590T-DP-GI-60/60-U-O

3.6 Simulace konkrétního dílu

Simulace vybraného dílu byla provedena ve dvou simulačních programech, a to *AutoForm Plus R6* a *PamStamp 2G*. Parametry simulací jsou uvedeny v tab. 3.4, výsledky byly porovnány a zapsány v kapitole 3.7.

S ohledem na technické vybavení KSP byl pro numerické simulace zvolen výlisek olejové vany. Tvar výlisku je patrný z obr. 3.7.

Pro numerické simulace byla všechna materiálová data naměřena. Měření bylo provedeno kvůli větší přesnosti výsledků.

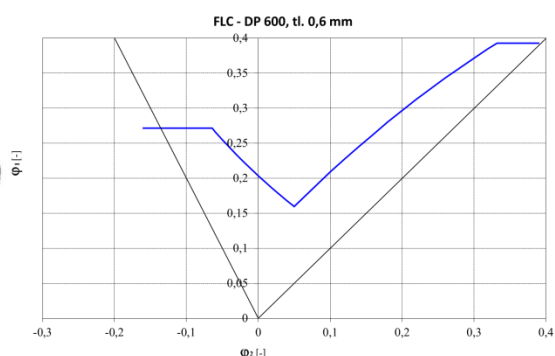
Tažení bylo nejprve odsimulováno v programu *AutoForm*, kde bylo provedeno zároveň odladění simulace, tj. byla určena velikost přístřihu, rychlost tváření, síla vyvozovaná přidržovačem, zdvih tažníku a v neposlední řadě způsob mazání. Zkoušená DP ocel se projevila jako velmi náchylná na velikost přidržovací síly a koeficient tření mezi nástrojem a polotovarem. Pro dosažení celistvého výlisku bylo nutno velmi snížit koeficient tření f (pod hodnotu 0,1) nebo tento parametr kontrolovat jiným způsobem. Druhý způsob spočíval v nastavení závislosti koeficientu tření na tlaku a rychlosti zatěžování. Při použití tohoto postupu bylo dále nutno zadat referenční tlak a referenční rychlost, tlakový exponent a rychlostní faktor. Vysvětlení je uvedeno ve vzorci 3.1. Výtažek byl zhotoven na jeden tah.

V tabulce 3.4 jsou uvedeny hodnoty, při kterých bylo možno v programu *AutoForm* výlisek zhotovit. Na obr. 3.8 je uvedena FLC křivka z programu *PamStamp*.

Optimalizace tvaru přístřihu byla provedena v programu *PamStamp*.



Obr. 3.7: Tvářený díl



Obr. 3.8: FLC křivka ze simulace

$$f_{\text{eff}} = f \cdot \left(\frac{p}{p_{\text{ref}}} \right)^{e-1} - \left(a \cdot \ln \frac{\max(v_{\text{rel}}, v_{\text{ref}})}{v_{\text{ref}}} \right) \quad (3.6)$$

kde je:

f_{eff} – efektivní koeficient tření [-]

f – základní koeficient tření [-]

p – tlak mezi nástrojem a plechem [MPa]

p_{ref} – referenční tlak [MPa]

e – tlakový exponent [-]

a – rychlostní faktor [-]

v_{ref} – referenční rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

v_{rel} – relativní rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] [29]

Tab. 3.4: Parametry simulací

Parametr		Hodnota
Tvářecí pohyb	Zdvih tažníku	700 mm*
	Rychlost tažení	233,3 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$
	Čas tažení	3 s
Mazání	Tažný olej (Mill Oil) – koeficient tření	0,15* 0,12**
	Referenční tlak	4 MPa*
	Referenční rychlost	10 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ *
	Tlakový exponent	0,9*
	Rychlostní faktor	0,015*
Přidržovač	Tuhost	50 $\text{MPa}\cdot\text{mm}^{-1}$ *
	Konstantní síla	450 kN*
Přístřih	Materiál	CR330Y590T-DP-GI-60/60-U-O (dle interní normy VW 50065), HC340XD+Z140-M-B-O (dle DIN EN)
	Velikost	660 x 480 mm, tvarový přístřih

*hodnota pro AutoForm

**hodnota pro PamStamp

3.7 Výsledky simulace

3.7.1 Zhodnocení tvářitelnosti

Tab. 3.5: Zhodnocení tvářitelnosti

	AutoForm Plus R6	PamStamp 2G
Vizualizace		
Zhodnocení	<p>Dle FLC (FLD) lze daný tvar vylisovat, všechny body leží pod křivkou. Bylo však nutné aktivovat funkci závislosti koeficientu tření na tlaku.</p>	<p>V simulačním programu PamStamp, při stejných podmínkách tažení, vyšel opačný výsledek. Daný tvar nelze bez porušení celistvosti materiálu vylisovat. Rozdíl byl v tom, že nebyla použita závislost koeficientu tření na tlaku.</p>

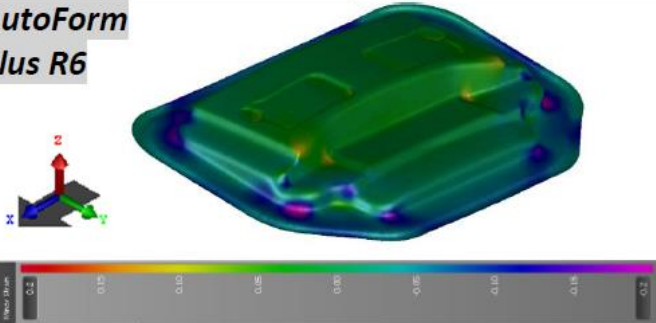
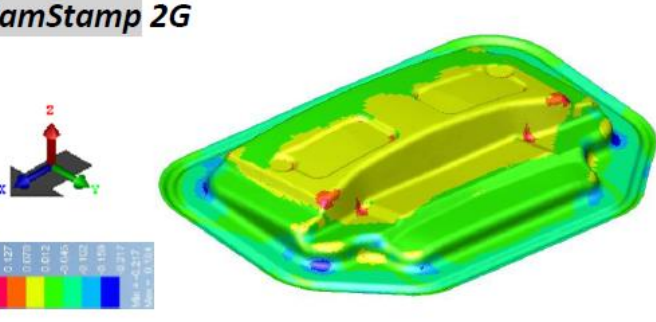
3.7.2 Hlavní deformace

Tab. 3.6: Zhodnocení hlavní deformace

HLAVNÍ DEFORMACE	Vizualizace	Zhodnocení a porovnání
AutoForm Plus R6		<p>Hlavní deformace dosahovala maximálních hodnot v nejostřejších rozích součásti. Naopak v plošších oblastech byla minimální.</p>
PamStamp 2G		<p>Stejně tvrzení platí i v druhém případě.</p>

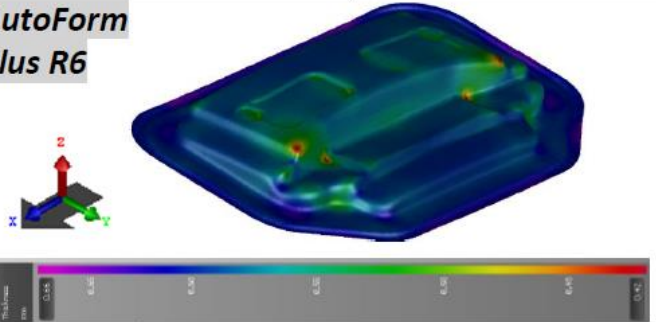
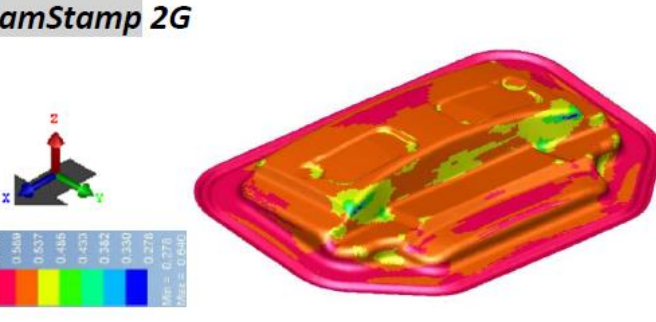
3.7.3 Vedlejší deformace

Tab. 3.7: Zhodnocení vedlejší deformace

VEDLEJŠÍ DEFORMACE	Vizualizace	Zhodnocení a porovnání
<p>AutoForm Plus R6</p> 		<p>Vedlejší deformace byly maximální v nejostřejších rozích výlisku.</p>
<p>PamStamp 2G</p> 		<p>I v tomto případě docházelo k největším vedlejším deformacím na stejných místech.</p>

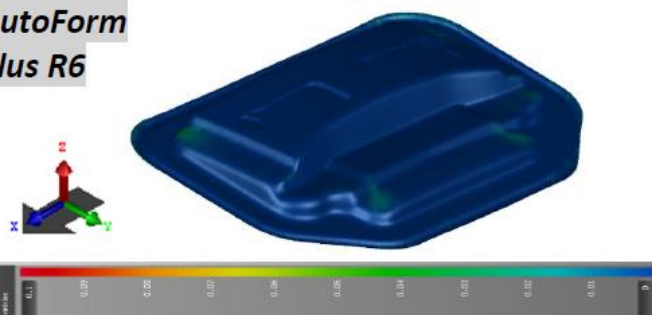
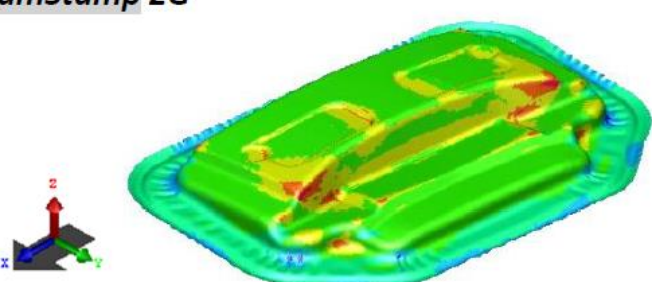
3.7.4 Zhodnocení ztenčení

Tab. 3.8: Zhodnocení ztenčení

ZTENČENÍ	Vizualizace	Zhodnocení a porovnání
<p>AutoForm Plus R6</p> 		<p>Největší ztenčení bylo situováno v ostrých rozích, kde bylo dosaženo největšího vypínání výtažku.</p>
<p>PamStamp 2G</p> 		<p>Ztenčení se vyskytovalo i v druhém případě na stejných místech. Dosahovalo i velice podobných hodnot.</p>

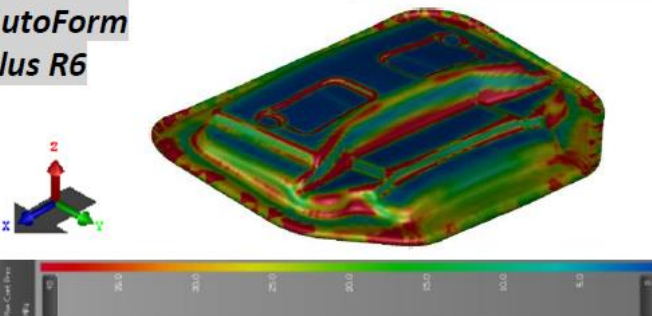
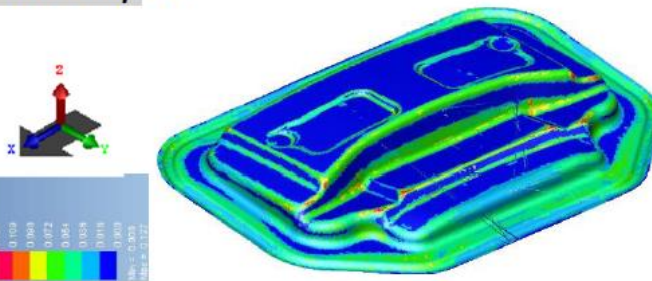
3.7.5 Zhodnocení zvlnění

Tab. 3.9: Zhodnocení zvlnění

ZVLNĚNÍ	Vizualizace	Zhodnocení a porovnání
AutoForm Plus R6 		Zvlnění nabývá nepatrně vyšších hodnot pouze ve dvou malých oblastech.
PamStamp 2G 		Zvlnění vzniká v oblastech za brzdící drážkou, tedy v místech, kde ho bylo možné predikovat i před simulací.

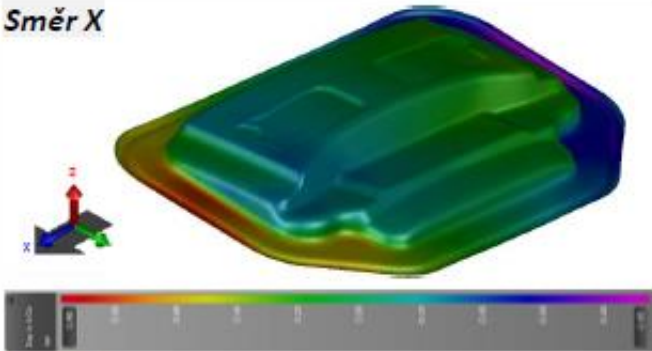
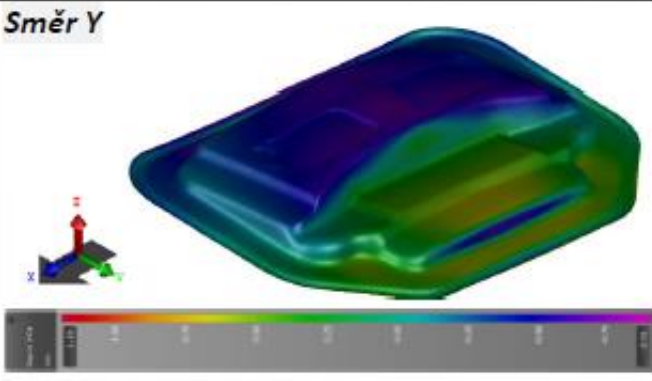
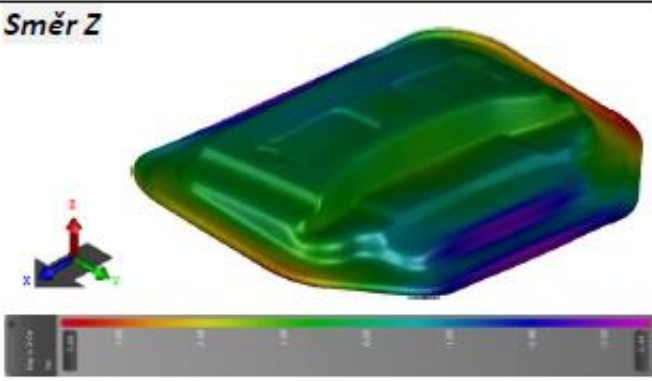
3.7.6 Zhodnocení kontaktního tlaku

Tab. 3.10: Zhodnocení kontaktního tlaku

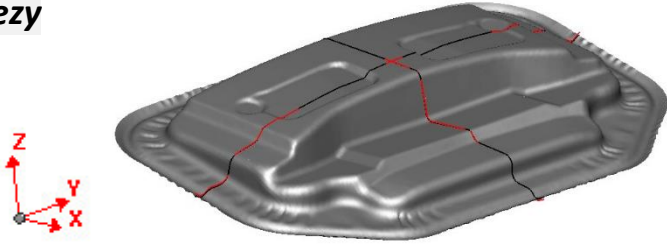
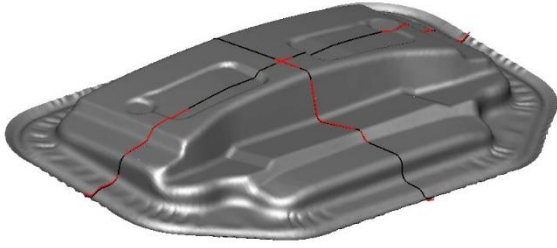
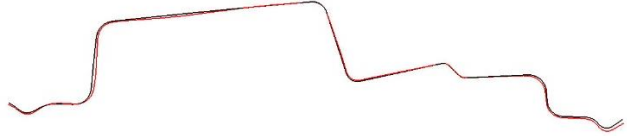

KONTAKTNÍ TLAK	Vizualizace	Zhodnocení a porovnání
AutoForm Plus R6 		Největší kontaktní tlaky jsou situovány v oblastech brzdných lišt a v místech ostrých přechodů. Ve zmíněných místech dochází díky pohybu mezi nástrojem a výliskem k největšímu tření, které může mít za následek až vytlačení maziva.
PamStamp 2G 		Kontaktní tlak spočítal program PamStamp na stejných místech.

3.7.7 Zhodnocení odpružení

Tab. 3.11: Zhodnocení odpružení – AutoForm Plus R6

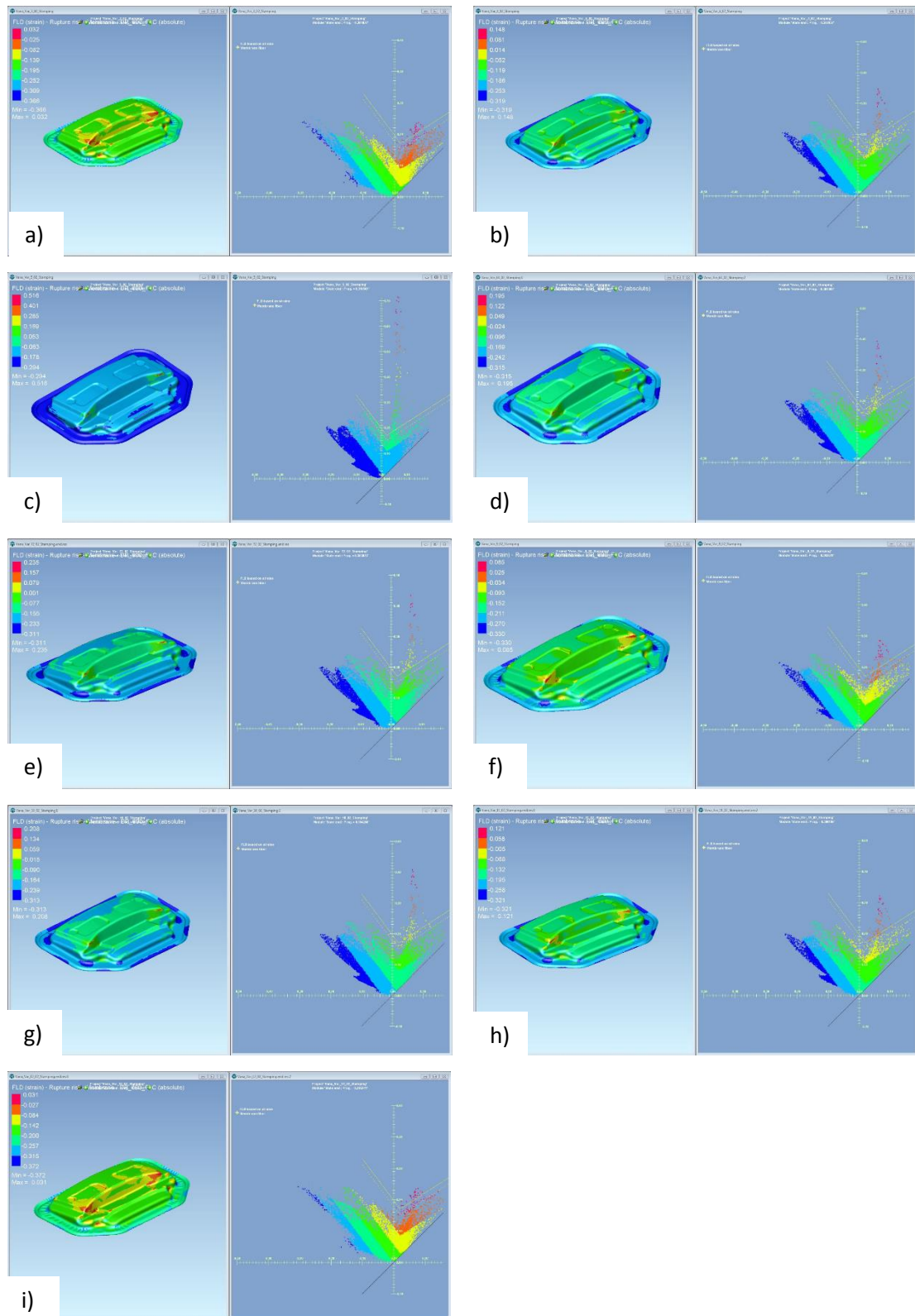
ODPRUŽENÍ	Vizualizace	Zhodnocení a porovnání
<p>Směr X</p> 		<p>V podélném směru nastává největší odpružení v krajních místech výtažku. Toto odpružení nabývá hodnot do 1 mm.</p>
<p>Směr Y</p> 		<p>Ve směru Y je odpružení maximálně 1,5 mm. Největší je též na krajích výtažku.</p>
<p>Směr Z</p> 		<p>Odpružení ve směru tažení dosahuje největších hodnot v rozích výtažku, které však přijde odštíhnout. Jako ve všech předchozích situacích dochází i zde k největším tvarovým změnám v místech, kde je vylisek nejméně přetvořen.</p>

Tab. 3.12: Zhodnocení odpružení – PamStamp 2G

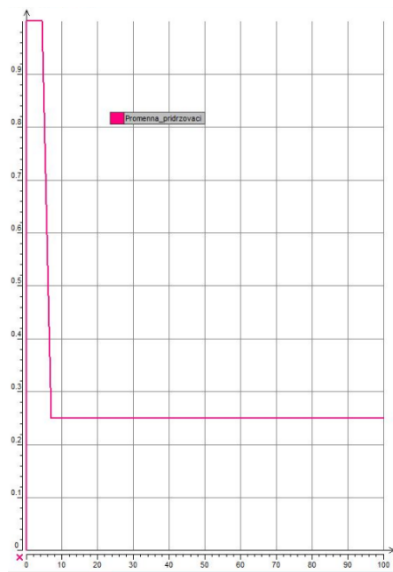
ODPRUŽENÍ	Vizualizace	Zhodnocení a porovnání
Řezy 		<p>Odpružení bylo zjištěno tak, že byly ve zkoumaných místech na dílu vytvořeny řezy a poté následovalo porovnání stavů před a po odpružení.</p>
Směr X  <p>Černá křivka - bez odpružení Červená křivka – s odpružením</p>		<p>Odpružení se nejvíce projevilo na krajích součásti.</p>
Směr Y  <p>Černá křivka - bez odpružení Červená křivka – s odpružením</p>		<p>Zde platí stejný závěr.</p>

Při simulaci v programu PamStamp bylo vyzkoušeno i několik různých variant parametrů tváření. Varianty spočívaly ve změnách přidržovací síly a v průběhu působení přidržovací síly. Cílem bylo stanovit takové parametry, při kterých by byl daný díly lisovatelný. Níže jsou uvedeny dané varianty.

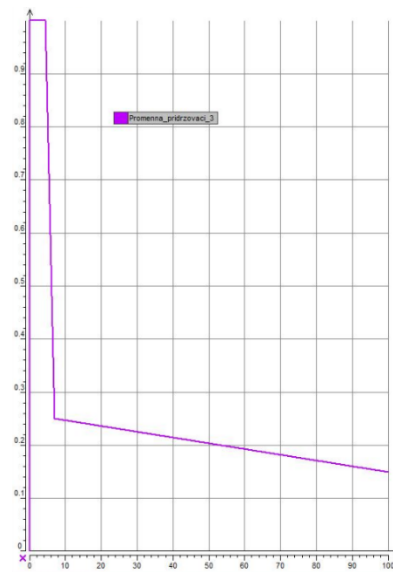
- 1) *Proměnná přidržovací síla 250 kN, průběh č. 1* (obr. 3.9a),
- 2) *Proměnná přidržovací síla 350 kN, průběh č. 1* (obr. 3.9b),
- 3) *Konstantní síla 450 kN* (obr. 3.9c),
- 4) *Proměnná přidržovací síla 350 kN, průběh č. 2* (obr. 3.9d),
- 5) *Proměnná přidržovací síla 350 kN, průběh č. 3* (obr. 3.9e),
- 6) *Proměnná přidržovací síla 300 kN, průběh č. 3* (obr. 3.9f),
- 7) *Proměnná přidržovací síla 300 kN, průběh č. 4* (obr. 3.9g),
- 8) *Proměnná přidržovací síla 300 kN, průběh č. 4* (obr. 3.9h),
- 9) *Proměnná přidržovací síla 250 kN, průběh č. 2* (obr. 3.9i),



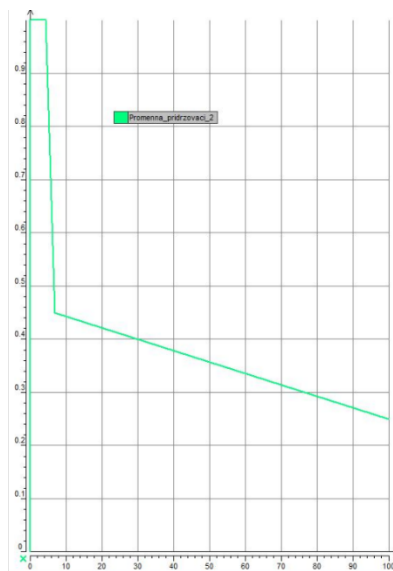
Obr. 3.9: Výsledky různých variant simulace



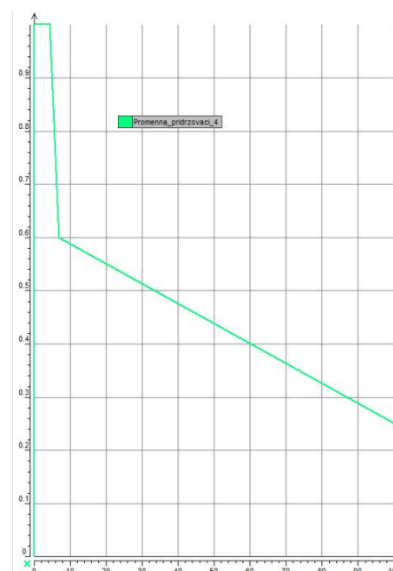
a) Průběh č. 1



b) Průběh č. 2



c) Průběh č. 3



d) Průběh č. 4

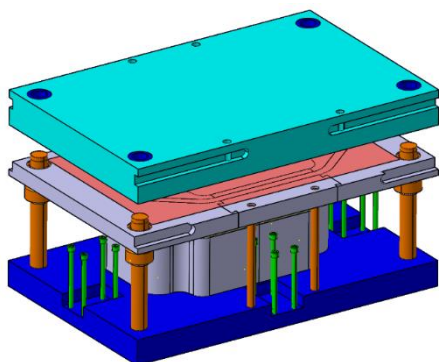
Obr. 3.10: Průběhy přidržovací síly

3.8 Tažení konkrétního dílu

Po konzultacích o požadavcích na tažený díl byl vybrán díl ve tvaru vany, který vyhovoval jak z hlediska konstrukce nástroje, tak i složitosti dílu. Díl byl složitějšího tvaru, tedy hodný pro zjištění lisovatelnosti, odpružení a zhodnocení technologičnosti konstrukce. Tažný nástroj je zobrazen na *obr. 3.11*. Tažení bylo provedeno podle následujícího postupu:

Postup experimentu:

- 1) *Upevnění nástroje do lisu.*
- 2) *Volba vhodného mazání:* K mazání byl zvolen olej FERROCOTE 6130 – HV od firmy Quaker a plastické mazivo s grafitem.
- 3) *Nastavení parametrů na stroji:* Tento krok spočíval v nastavení rychlosti zatěžování, zdvihu tažníku a síle a jejím průběhu na přidržovači. Nejprve byly zadány údaje ze simulace, při kterých bylo možné daný díl vylisovat.
- 4) *Lisování:* Bylo prováděno i na více tahů za účelem přimazání výlisku v kritických místech, protože při tažení dochází za působení velkých tlaků k vytlačování maziva.
- 5) *Optimalizace operace a následné lisování.*



Obr. 3.11: Sestava tažného nástroje



Obr. 3.12: Nástroj na stroji



Obr. 3.13: Reálný výtažek



Obr. 3.14: Optimalizovaný přístřih

Při tažení bylo použito několik obměn parametrů. Parametry byly použity následující:

- 1) *Výlisek tažený na jeden tah (obr. 3.15a),*
- 2) *Výlisek tažený na dvakrát (obr. 3.15b),*
- 3) *Výlisek tažený na dvakrát a přimazaný plastickým mazivem s grafitem (obr. 3.15c),*
- 4) *Výlisek z hlubokotažného plechu tloušťky 0,7 mm s fosfátovaným povrchem (obr. 3.15d),*
- 5) *Výlisek z optimalizovaného přístřihu zhotovený na čtyřikrát a přimazaným plastickým mazivem s grafitem (obr. 3.15e),*
- 6) *Výlisek tažený s fólií a přimazán plastickým mazivem s grafitem.*



a)



b)



c)



d)



e)



f)

TRHLINY

Obr. 3.15: Výtažky při různých parametrech tažení

Kontura optimalizovaného přístřihu byla získána následujícím způsobem. V programu *PamStamp* byl nejprve vypočten optimální obrys přístřihu. Tento obrys byl dále zpracován do formátu *igs*, který byl následně přenesen do laseru, kde bylo provedeno oříznutí.

Nejlepšího výsledku bylo dosaženo při namazání kritických míst plastickým mazivem a tažením na čtyři tahy. Naopak použití fólie se ukázalo jako chybné. Fólie totiž způsobovala snižování tření mezi brzdícími lištami a plechem. Brzdící lišty poté ztrácely svoji funkci. Bylo tím zapříčiněno velké zvlnění. Bylo by tedy vhodné aplikovat fólii jenom do vnitřní části formy, dovnitř brzdících lišt.

Ve všech případech, i po optimalizaci procesu, docházelo k tvorbě prasklin na výtažku. Praskliny nevznikly pouze při tažení hlubokotažné oceli. Praskliny vznikaly na nejkritičtějších místech, v ostrých rozích, kde již byla vyčerpána plastičnost materiálu. Toto predikovaly i oba simulační programy. Řešením by nejspíš bylo použití jiné povrchové úpravy materiálu plechu, např. fosfátování, nebo lisování méně složitěho dílu. DP oceli nejsou totiž určeny pro lisování více členitých součástí.

3.9 Zjištění a eliminace odpružení

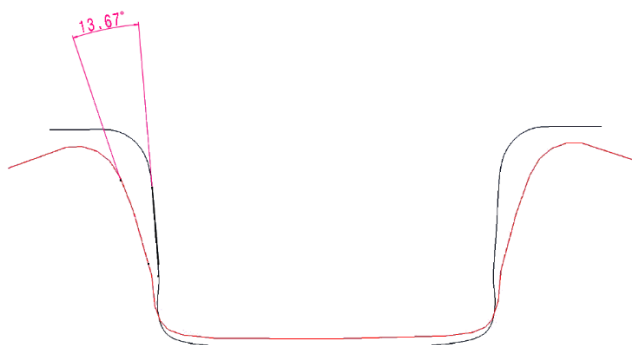
3.9.1 Odpružení materiálu výtažku

Odpružení materiálu *CR330Y590T – DP – GI60/60 – U – O* bylo zjištěno dvěma metodami. První metoda spočívala v experimentu, tj. k vytvoření ohybu *U* v nástroji. Další byla založena na simulaci ohybu *U*. Výsledky obou metod pro zjištění odpružení jsou porovnány v *tab. 3.13*.

Zkouška na stroji spočívala v ohybu a současném tažení vzorku v nástroji na obr. 3.16. následovalo oskenování vzorku a porovnání výsledku odpružení s výsledkem ve stejném řezu z programu *PamStamp*. Na obr. 3.17 jsou porovnány hodnoty odpružení podle programu *PamStamp* a hodnoty z experimentu s neodpruženým vzorkem.



Obr. 3.16: Simulace odpružení ohybu U



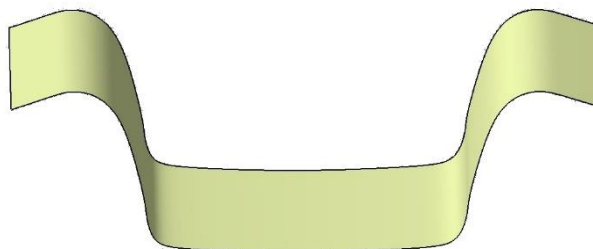
Obr. 3.17: Porovnání odpružení

Hodnota odpružení v nástroji byla změřena následujícími kroky:

- 1) *Vzorek byl připevněn na stůl měřicího zařízení (obr. 3.18a),*
- 2) *Byly naměřeny body, které leží na okraji vzorku (jelikož se měření provádí s kuličkou, tak skutečný bod leží vždy o hodnotu poloměru kuličky blíže do vzorku).*
- 3) *Zjištěné body byly exportovány do programu Catia, kde byly proloženy křivkou (obr. 3.18b),*
- 4) *Křivka byla vytažena na plochu a porovnána s hodnotou získanou z programu PamStamp (obr. 3.17),*



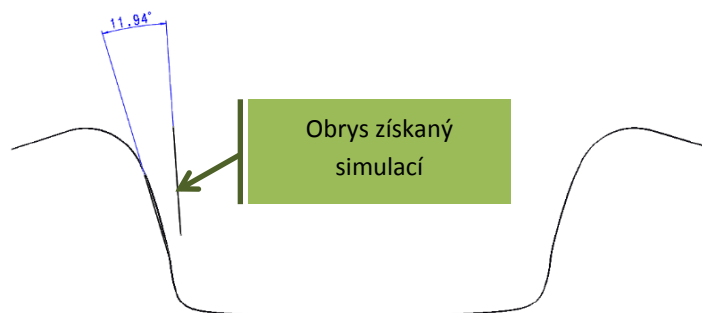
Obr. 3.18a: Měření odpružení



Obr. 3.19: Plocha získaná měřením obrysu vzorku



Obr. 3.18b: Křivka získaná měřením obrysu vzorku



Obr. 3.20: Odpružení získané měřením

Způsob zjištění	experiment	simulace
Odpružení $\Delta\alpha$ [°]	11,94	13,67

3.9.2 Eliminace odpružení

Odpružení lze snížit nebo se ho úplně zbavit větším úhlem ohnutí či tažení právě o daný úhel odpružení, konstrukcí nástroje, dodatečným ohnutím anebo závěrečnou kalibrací dílu. Je také nutno brát v potaz skutečnost, že se zmenšující se tloušťkou materiálu dochází ke zvětšování tohoto průvodního jevu.

3.10 Technologičnost konstrukce

Při konstrukci výtažků je nutno brát v úvahu několik aspektů. Prvním problematikou jsou ostré rohy výtažků, které je vhodné co nejvíce zaoblit. V opačném případě dochází v těchto místech k nadměrnému ztenčení a následně může dojít až k porušení celistvosti výtažku. Dalším parametrem, s kterým je nutno počítat, je výška vytažených součástí. Výšku, resp. poměr výšky a šířky, je vhodné volit co nejmenší. Zabrání se tím nadměrné deformaci plechu a v neposlední řadě nutnost tažení součástí na více tahů, které by výrobu prodražilo. Co se týká tvarů součástí, je vhodné volit výtažky válcovitého tvaru, pokud možno s rovným, jednoduchým dnem. Je doporučováno vyhnout se kulovým nebo šikmým dnům s kuželovitým nebo nesymetrickým tvarem. Toto pravidlo však většinou není dodržováno, neboť se v průmyslové praxi, zvláště v automobilovém průmyslu, táhnou součásti často velmi složitých tvarů. Příruby je doporučováno konstruovat jen v nevyhnutelných případech. Když je však nutno je konstruovat, je doporučeno příruby maximálně zmenšit. Příruby prodražují jak nástroj, tak může díky nim být způsobena i nutnost táhnutí součásti na více tahů. Rozměry výtažku je praktické volit s největšími tolerancemi. Jednou z nejdůležitějších a

nejzákladnějších parametrů je volba vhodného materiálu výtažku. Materiál plechu by měl vykazovat jak dobré tažné vlastnosti, tak i dobrou schopnost absorpce maziva a tím zaručení dostatečného koeficientu tření na problematických místech výtažku.

Vliv mazání je velmi významný. Má vliv nejen na velikost tvářecí síly, kterou zmenšuje, ale i na kvalitu povrchu výlisku.

Přístřih (rondel) není doporučeno mazat na celém jeho povrchu. Na stranu tažnice je doporučeno aplikovat mazadlo, které při daných technologických podmínkách zaručuje nejmenší koeficient tření. Naopak na stranu tažníku se mazadlo nedoporučuje aplikovat vůbec. Je tím zajištěno vysokého koeficientu tření mezi tažníkem a výtažkem a efektivní přenášení tažné síly. Mezi přidržovačem a materiálem je zase potřeba dobrého mazání. Vliv mazání na deformaci v náchylné části výtažku je zobrazen na obr. 3.21. [30]

Při táhnutí velmi tenkých plechů, je-li splněna následující podmínka (vzorec 3.7),

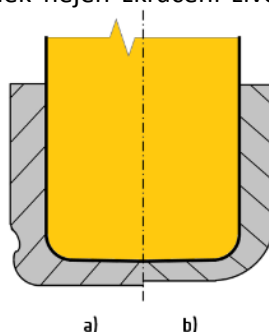
$$\frac{s}{D} \cdot 100 < 0,3 \quad (3.7)$$

kde je:

s – tloušťka plechu [mm]

D – průměr výtažku [mm],

tak je doporučeno provést první tah bez mazání přístřihu, protože mazadlo zmenšuje povrchové tření mezi přírubou a nástrojem a napomáhá vzniku vln a vrásek. Mazat je doporučeno pouze tažné hrany tažnice s cílem zamezit její opotřebení, přilepování nebo zadírání. Při dalších tazích se má mazat pouze vnější povrch tažného kroužku anebo pracovní otvor tažnice. Namazaný materiál se před taháním má pečlivě chránit vůči znečištění. To by mělo za následek nejen zkrácení životnosti či poškození nástroje, ale i výlisku. [30]



Obr. 3.21: Vliv mazání na deformaci přechodu dna do pláště výtažku [30]

a) bez mazání,

b) s mazáním.

4 Závěr

Cílem diplomové práce bylo analyzovat problematiku pevnostních materiálů k výrobě plechů, používaných v automobilovém průmyslu a jejich možnou aplikaci na povrchové díly karoserie automobilů. Bylo tedy požadováno uvést nejfrekventovaněji užívané materiály a jejich lisovatelnost. Následovalo navržení zkoušek materiálu, které byly potřebné pro numerickou simulaci. Experimentální část práce dále pokračovala vybráním vhodného vylisku, který bylo možno i reálně vylisovat. Vhodnost tohoto vylisku spočívala v optimální tvarové složitosti, na které bylo možno zjistit vhodnost materiálu pro tažení a nalezení jeho limitů.

Jako materiál plechu byl vybrán materiál *CR330Y590T-DP-GI-60/60-U-O*, tedy dual fázová ocel, jejíž struktura je tvořena feritickou maticí, v které jsou uloženy zrna martenzitu. Tato ocel není určena na více členité a tvarově složité vylisky, a to kvůli menší deformační schopnosti v porovnání třeba s hlubokotažnými ocelmi. Jako povrchová úprava bylo zvoleno žárové pozinkování, které patří k těm levnějším. Plechy byly dodány v tloušťce 0,6 mm německou firmou *Thyssenkrupp*.

Pro vylisek byl stanoven výtazek ve tvaru vany. Vana byla optimální jak z hlediska složitosti, tak i rozměrů. Na tomto vylisku bylo také možno dosáhnout limitů materiálu, při kterých dochází k jeho porušení.

Jako zkoušky pro určení materiálových charakteristik zvoleného materiálu byly stanoveny následující. Pro stanovení křivky mezních přetvoření (FLC) byl zvolen tzv. *Nakazima test*, který spočíval v přípravě vzorků s různým vybráním a následném jejich porušení na stroji. Pro pravou část FLC bylo nutno provést *Bulge test*, tedy zkoušku hydrostatickým vyboulováním. Dále byla provedena tahová zkouška, kterou bylo nutno provést k zjištění smluvní meze kluzu, meze pevnosti v tahu, exponentu deformačního zpevnění, koeficientů normálové anizotropie, modulu monotónního zpevnění a Youngova modulu pružnosti v tahu. Aproximace tahové zkoušky byla provedena dle teorie *Swift-Krupkowski*. Z tahové zkoušky byly následně vyhodnoceny odvozené ukazatele tvářitelnosti.

Simulace byla provedena ve dvou simulačních programech, a to *AutoForm Plus R6* a *PamStamp 2G*. Výsledky těchto simulací jsou porovnány v tabulkách. Při simulaci také došlo k optimalizaci procesu pro reálné tažení. V programu *PamStamp* byl také vyhodnocen tvar optimálního přístřihu. Výsledky simulací se ve většině případů shodovaly. Jediná neshoda, celkem závažná, panovala v tvářitelnosti zvoleného dílu. Dle programu *PamStamp*

nebylo možné daný díl ani po optimalizacích vylisovat. Podle *AutoFormu* byl daný díl nakonec lisovatelný, ale až po aktivaci funkce závislosti koeficientu tření na tlaku.

Odpružení dílu bylo zjištěno díky simulacím v již zmíněných programech. Odpružení materiálu je zjištěno pomocí experimentální zkoušky, tj. ohýbání při současném tažení ve speciálním nástroji. Vzorek byl následně oskenován a jeho tvar po odpružení byl porovnán s výsledkem ze simulace.

V závěru lze prohlásit tvrzení, že zvolený materiál, DP ocel, lze bez větších problémů tvářet pouze do určité meze. Při hlubších tazích nebo u tvarových složitostí, např. ostrých rohů, dochází k jeho porušení celistvosti, což má za následek tvorbu trhlin. Při aplikaci pro konstrukci jednodušších součástí, např. předních blatníků automobilů, je dle zjištěných výsledků vhodná. Záleží však na konkrétních situacích.

Seznam použité literatury

- [1] Technická univerzita v Košicích. *TWIP oceli* [online]. 2015 [cit. 2016-02-01]. Dostupné z: <http://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/21-2011/pdf/157-159.pdf>.
- [2] SOLFRONK, P. Výukové podklady k předmětu Zkoušky tváření – Materiály používané pro stavbu karoserie. Liberec: TU v Liberci, 2015.
- [3] HALL, J. *Evolution of Advanced High Strength Steels in Automotive Applications* [online]. Detroit: General Motors Corporation, USA, 2011 [cit. 2016-01-15]. Dostupné z: <http://www.autosteel.org/~media/Files/Autosteel/Great%20Designs%20in%20Steel/GDIS%202011/20%20-%20Jody%20Hall%20-%20Evolution%20of%20Advanced%20High-Strength%20Steels%20in%20Automotive%20Applications.pdf>.
- [4] HORVATH, C. *The Future Revolution in Automotive High Strength Steel Usage* [online]. Detroit: General Motors Corporation, USA, 2004 [cit. 2016-01-15]. Dostupné z: <http://www.autosteel.org/~media/Files/Autosteel/Great%20Designs%20in%20Steel/GDIS%202004/16%20-%20The%20Future%20Revolution%20in%20Automotive%20AHSS%20Usage.pdf>.
- [5] KOLNEROVÁ, M. Výukové podklady k předmětu Metody tváření kovů a plastů. Liberec: TU v Liberci, 2013.
- [6] ŠTEFAN, B., ŠLESÁR, M. Fyzikálno – metalurgické koncepcie moderných hlbokoťažných ocelí válcovaných za studena. In: *Plechý v automobilovom priemysle – zborník prednášok z medzinárodnej konferencie*. Konferencie VSŽ a.s. Košice Tatranské Matliare. 1. vyd. OCEĽ VSŽ, spol. s.r.o., Výskumný a skúšobný ústav, Košice: 1991, s. 16 – 23.
- [7] *Trendy ve vývoji plechů pro automobilový průmysl* [online]. Liberec: TU v Liberci, 2008 [cit. 2015-12-02]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/spt/pevnostni%20plechy.pdf.

- [8] BHATTACHARYA, D. *Developments in Advanced High Strength Steels* [online]. East Chicago: Mittal Steel, USA, 2008 [cit. 2016-01-15]. Dostupné z: <http://www.metal.citic.com/iwcm/UserFiles/img/cd/2005-HSLA-NB/HSLA-016.pdf>.
- [9] Technická univerzita v Košicích. *TRIP oceli* [online]. 2015 [cit. 2016-02-01]. Dostupné z: https://www.sjf.tuke.sk/inmf/.../PM/.../Trip_ocene.doc.
- [10] Západočeská univerzita v Plzni. *CP oceli* [online]. 2015 [cit. 2016-02-01]. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/8620/DP%20final.pdf?sequence=1>.
- [11] Outokumpu Group. *Martensitic steels* [online]. 2016 [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://www.outokumpu.com/en/products-properties/more-stainless/stainless-steel-types/martensitic-and-precipitation-hardening/Pages/default.aspx>.
- [12] Univerzita Pardubice. *Borové oceli* [online]. 2015 [cit. 2016-02-01]. Dostupné z: http://dspace.upce.cz/bitstream/handle/10195/61490/VymyslickyT_Testovani%20dynamicke_PH_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [13] PLEŠTINOVÁ, G, SOMANI, M., KARJALAINEN, P, KLIEBER, J. *Vliv parametrů termomechanického zpracování na výslednou mikrostrukturu TRIP oceli s vysokým obsahem hliníku* [online]. Hradec nad Moravicí: VŠB TU Ostrava, Česká republika, University of Oulu, Finsko, 2006 [cit. 2016-02-02]. Dostupné z: http://www.konsyst.tanger.cz/files/proceedings/metal_06/papers/181.pdf.
- [14] POLLÁK, L. Hodnotenie hlbokotažnosti plechov pre automobilový priemysel. In: *Plechý v automobilovom priemysle – zborník prednášok z medzinárodnej konferencie*. Konferencie VSŽ a.s. Košice Tatranské Matliare. 1. vyd. OCEĽ VSŽ, spol. s.r.o., Výskumný a skúšobný ústav, Košice: 1991, s. 33 – 40.
- [15] RŮŽIČKA, Z. *Návrh upínacího přípravku pro cyklické zatěžování vzorků plechů na trhacím zařízení TIRA Test 2300*. [Bakalářská práce]. Liberec: TU v Liberci, 2014. 47 s.
- [16] PLUHAŘ, J. a kol. *Nauka o materiálech*. Bratislava: SNTL, 1989. ISBN 04-205-89.
- [17] PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu 1*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-7204-283-1.

- [18] MIKEŠ, V., BUCHAR, M. Komplexní pohled na hodnocení lisovatelnosti plechů. In: *Plechý v automobilovom priemysle – zborník prednášok z medzinárodnej konferencie*. Konferencie VSŽ a.s. Košice Tatranské Matliare. 1. vyd. OCEĽ VSŽ, spol. s.r.o., Výskumný a skúšobný ústav, Košice: 1991, s. 46– 55.
- [19] HLUCHÝ, M., KOLOUCH, J. *Strojírenská technologie 1 (Nauka o materiálu)*. 3 vydání. Praha: Pedagogické nakladatelství Scientia, 2002. ISBN 80-7183-262-6.
- [20] Bickel and Wolf, s.r.o. *Katalog ERICHSEN metal* [online]. 2016 [cit. 2016-01-30]. Dostupné z: http://www.bickelwolf.cz/testovaci-pristroje/pdf/Katalog_ERICHSEN_metal.pdf.
- [21] SOLFRONK, P. *Výukové podklady k předmětu Zkoušky tváření – Zkoušky tváření*. Liberec: TU v Liberci, 2015.
- [22] YOSHIDA, F. *A Model of Large-Strain Cyclic Plasticity for Accurate Simulation of Springback* [online]. Hiroshima: Hiroshima University, Japonsko, 2005 [cit. 2015-02-03]. Dostupné z: <http://www.lem3.fr/summerschool/00-Files/FY.pdf>.
- [23] JURČIŠIN, M. *Experimentální měření křivky mezních deformací*. MM Průmyslové spektrum [online]. Praha: MM Publishing, 2015, č. 10 [cit. 2016-01-29]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/experimentalni-mereni-krivky-meznich-deformaci.html>.
- [24] SOLFRONK, P. *Výukové podklady k předmětu Zkoušky tváření – Diagramy mezních přetvoření*. Liberec: TU v Liberci, 2015.
- [25] SOBOTKA, J. *Výukové podklady k předmětu Zkoušky tváření – Experimentální metody v tváření*. Liberec: TU v Liberci, 2015.
- [26] PICKERD, V. *Optimisation and Validation of the ARAMIS Digital Image Correlation System for use in Large-scale High Strain-rate Events*. [Diplomová práce]. Victoria: Australian Government, Department of Defence, Austrálie, 2013. [cit. 2016-02-01]. Dostupné z: <http://dspace.dsto.defence.gov.au/dspace/handle/dsto/10366>. 40 s.
- [27] DVOŘÁK, M., GAJDOŠ, F., NOVOTNÝ, K. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. Brno: PC – DIR Real, s r. o., 1999. ISBN 80-214-1481-2.

- [28] VW 50065: 2014 - 05. *Výrobky z ploché oceli určené pro tváření za studena*. Ute Hager-Süß: Volkswagen Aktiengesellschaft, 2014. 37 s. Třídící znak 51251.
- [29] *Simulační program AutoForm*. AutoForm Engineering GmbH, Switzerland, 2016.
- [30] BLAŠČÍK, F. a kol. *Technológia tvárnenia, zlievárenstva a zvarania*. 1. vydání. Bratislava: ALFA – vydavateľství technické a ekonomické literatury, 1988. ISBN 063-563-87-05.

Seznam obrázků

- Obr. 2.1:* Druhy materiálů a jejich podíl ve stavbě karoserie automobilu [4]
Obr. 2.2: Funkce karoserie automobilu při nárazu [3]
Obr. 2.3: Užití ocelí v konstrukci karoserie automobilu [5]
Obr. 2.4: Schématické znázornění BH efektu při statické zkoušce v tahu [6]
Obr. 2.5: Vztah mezi rozpuštěným uhlíkem, BH efektem a prodloužením na mezi kluzu [6]
Obr. 2.6: Vliv uhlíku na BH efekt [6]
Obr. 2.7: Vliv manganu a síry na BH efekt [6]
Obr. 2.8: Struktura DP oceli [7]
Obr. 2.9: Vliv teploty na parametry oceli GA 590 DP [8]
Obr. 2.10: Struktura TRIP oceli [7]
Obr. 2.11: Schéma TRIP procesu [9]
Obr. 2.12: Struktura CP oceli [7]
Obr. 2.13: Struktura MS oceli [7]
Obr. 2.14: Aplikace TWIP oceli [d]
Obr. 2.15: Porovnání tažností a mezí kluzů vybraných materiálů [13]
Obr. 2.16: Smluvní diagram napětí – deformace [17, upraveno]
Obr. 2.17: Meze kluzu [15]
Obr. 2.18: Porovnání smluvního a skutečného diagramu [15]
Obr. 2.19: Zkouška lámavosti [19]
Obr. 2.20: Princip zkoušky hloubením plechu [19]
Obr. 2.21: Trhliny po Erichsenově zkoušce v materiálech s různou strukturou [21]
Obr. 2.22: Zkouška plechů a pásů střídavým ohýbáním [19]
Obr. 2.23: Zkouška plechů střídavým ohýbáním [19]
Obr. 2.24: Schéma Yoshida testu ve vzpěru [15, 22]
Obr. 2.25: Stavby napjatosti v souřadnicích hlavní a vedlejší deformace [24]
Obr. 2.26: Využití systému ARAMIS při tahové zkoušce [23]
Obr. 2.27: Tvary vzorků pro tahovou zkoušku [24]
Obr. 2.28: Tvary tažnic pro zkoušku hydrostatickým vyboulováním [24]
Obr. 2.29: Tvary přístřihů pro Nakazima test [24]
Obr. 2.30: Příklady nesprávného nanesení patternu [26]

Obr. 2.31: Zkouška rozšiřováním otvoru [24]

Obr. 3.1 Smluvní diagram oceli CR330Y590T-DP-GI-60/60-U-O – porovnání směrů válcování

Obr. 3.2 Aproximace tahové zkoušky – směr válcování 0°

Obr. 3.3: Tvary vzorků

Obr. 3.4: Vzorek pro zkoušku tahem

Obr. 3.5: Prostředí softwaru ARAMIS

Obr. 3.6: FLC křivka materiálu CR330Y590T-DP-GI-60/60-U-O

Obr. 3.7: Tvářený díl

Obr. 3.8: FLC křivka ze simulace

Obr. 3.9: Výsledky různých variant simulace

Obr. 3.10: Průběhy přidržovací síly

Obr. 3.11: Sestava tažného nástroje

Obr. 3.12: Nástroj na stroji

Obr. 3.13: Reálný výtažek

Obr. 3.14: Optimalizovaný přístřih

Obr. 3.15: Výtažky při různých parametrech tažení

Obr. 3.16: Simulace odpružení ohybu U

Obr. 3.17: Porovnání odpružení

Obr. 3.18a: Měření odpružení

Obr. 3.18b: Křivka získaná měřením obrysu

Obr. 3.19: Plocha získaná měřením obrysu vzorku

Obr. 3.20: Odpružení získané měřením

Obr. 3.21: Vliv mazání na deformaci přechodu dna do pláště výtažku [31]

Seznam tabulek

Tab. 2.1: Porovnání struktury a vlastností materiálů [2, 12]

Tab. 3.1: Základní mechanické charakteristiky materiálu CR330Y590T-DP-GI-60/60-U-O [28, 29]

Tab. 3.2: Změřené mechanické charakteristiky materiálu CR330Y590T-DP-GI-60/60-U-O

Tab. 3.3: Odvozené ukazatele tvářitelnosti materiálu CR330Y590T-DP-GI-60/60-U-O

Tab. 3.4: Parametry simulací

Tab. 3.5: Zhodnocení tvářitelnosti

Tab. 3.6: Zhodnocení hlavní deformace

Tab. 3.7: Zhodnocení vedlejší deformace

Tab. 3.8: Zhodnocení ztenčení

Tab. 3.9: Zhodnocení zvlnění

Tab. 3.10: Zhodnocení kontaktního tlaku

Tab. 3.11: Zhodnocení odpružení – AutoForm Plus R6

Tab. 3.12: Zhodnocení odpružení – PamStamp 2G

Tab. 3.13: Porovnání hodnot odpružení

Seznam příloh

Příloha č.1: FLC křivka materiálu CR330Y590T-DP-GI-60/60-U-O

Příloha č.2: Smluvní diagram oceli CR330Y590T-DP-GI-60/60-U-O – porovnání směrů válcování

Příloha č.3: Aproximace tahové zkoušky – směr válcování 0°