TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie Oddělení tváření kovů a plastů



Jiří Bartuněk

Kinetika vzniku plastického lomu u ocelí používaných v automobilovém průmyslu

Diplomová práce

Liberec 2009

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI Fakulta strojní

Studijní program N 2301 – Strojní inženýrství

Strojírenská technologie zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie Oddělení tváření kovů a plastů

Kinetika vzniku plastického lomu u ocelí používaných v automobilovém průmyslu

Kinetics of the plastic fracture create of steels used in automobile industry

Jiří Bartuněk KSP-TP-813

Vedoucí diplomové práce:	Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.
Konzultant diplomové práce:	Ing. Pavel Doubek, Ph.D.

Rozsah práce a příloh:

Počet stran:	80
Počet příloh:	3
Počet obrázků:	48
Počet tabulek:	6
Počet jiných příloh:	1 CD

V Liberci, 5. června 2009



Katedra strojírenské technologie

Studijní rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení	Bc. Jiří BARTUNĚK
Studijní program	N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor	2303T002 Strojírenská technologie
Zaměření	Tváření kovů a plastů

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

Kinetika vzniku plastického lomu u ocelí používaných v automobilovém průmyslu

Zásady pro vypracování:

(uveď te hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody pro vypracování)

- 1. Seznámení se s problematikou tažení výlisků v automobilovém průmyslu
- Materiály používané pro stavbu karoserie automobilu
- 3. Využití optických systémů pro analýzu deformace tvářeného materiálu
- Pomocí systému ARAMIS experimentálně zjistit kinetiku vzniku plastického lomu u zvolených materiálů při jednoosé napjatosti. Rozložení deformace v okolí lomu, rychlost deformace v průběhu tváření, velikost oblasti lokalizace deformace
- 5. Vyhodnocení analýzy deformace daných materiálů
- 6. Závěr

Forma zpracování diplomové práce:

průvodní zpráva: cca 50 stran

grafické práce: grafy, tabulky

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld

vedouei katedry

Seznam literatury (uved'te doporučenou odbornou literaturu):

- [1] PEARCE, P.: Sheet Metal Forming, ISBN 0-7503-0101-5
- [2] BAREŠ,K. a kol.: Lisování SNTL Praha, 1971
- [3] ASM HANDBOOK 14B. Sheet metal forming, ASM INTERNATIONAL 2004, ISBN-13:978-0-87170-710-9
- [4] Uživatelské manuály pro optický systém ARAMIS, firmy GOM GmbH
- [5] PEŠEK,L.:Videoextensometry application in materials research, In: Development of materials science in research and education (DMS-RE 2003 - 13. joint seminar), s.59-60, 15.-19.9.2003, Račkova dolina
- [6] Statická zkouška tahem, norma EN 10002-1

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

Konzultant diplomové práce: Ing. Pavel Doubek, Ph.D.



prof. Ing./Petr/Louda, CSc. děkan

V Liberci dne 15. 2. 2009

Platnost zadání diplomové práce je 15 měsíců od výše uvedeného data (v uvedené lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ). Termíny odevzdání diplomové práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

ΑΝΟΤΑCΕ

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program:	N 2301 Strojní inženýrství
Diplomant:	Jiří Bartuněk

Téma: Kinetika vzniku plastického lomu u ocelí používaných v automobilovém průmyslu

Kinetics of the plastic fracture create of steels used in automobile industry

Číslo DP:	KSP-TP-813
Vedoucí DP:	Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Pavel Doubek, Ph.D.

Abstrakt:

Diplomová práce se zabývá vznikem plastického lomu při jednoosém zatěžování u plechů používaných v automobilovém průmyslu. Při experimentu jsou zkušební vzorky snímány optickým systémem ARAMIS. Ten umožňuje zkoumat velikost a průběh deformací v různých fázích zatěžování zkušebního vzorku.

Abstract:

The thesis deals with create of plastic fracture at uni-axial straining of metal sheets used in automobile industry. At experiment are the test-pieces scanning by optical system ARAMIS. It allows exploring size and process of deformation in various phases of test-piece straining.

Místopřísežné prohlášení

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 5. června 2009

.....

Jiří Bartuněk Mladá Boleslav

Poděkování

Na tomto místě rád poděkuji pánům Ing. Pavlu Solfronkovi, Ph.D.; Ing. Jiřímu Sobotkovi; Ing. Pavlu Doubkovi, Ph.D. a všem ostatním, kteří přispěli byť drobnou radou při zpracování této práce.

Dále chci poděkovat své rodině, svým učitelům, kamarádům a spolužákům, kteří mne podporovali po celou dobu studia ať už na základní, střední či vysoké škole.



Obsah

Přehled použitých zkratek a symbolů:	
1 Úvod	12
2 Teoretická část	13
2.1 Tváření	13
2.1.1 Technologie tváření kovů	13
2.1.2 Základní rozdělení technologií tváření ocelí	15
2.1.3 Hodnocení tvářitelnosti	16
2.1.3.1 Vliv chemického složení na tvářitelnost	16
2.1.3.2 Vliv stárnutí oceli na tvářitelnost	
2.1.3.3 Vliv povrchu plechu na tvářitelnost	
2.1.3.4 Statická zkouška tahem – hodnocení tvářitelnosti	
2.1.3.5 Diagramy mezních přetvoření – hodnocení tvářitelnosti	24
2.1.3.6 Technologické (napodobující) zkoušky tvářitelnosti	
2.2 Materiály používané pro stavbu karoserie	
2.2.1 Deformační zóny	
2.2.2 Rozdělení ocelí pro stavbu karoserie	
2.2.2.1 Hlubokotažné plechy z ocelí uklidněných hliníkem	
2.2.2.2 IF oceli	
2.2.2.3 BH oceli	
2.2.2.4 Vysokopevnostní materiály	
2.2.2.5 Mikrolegované oceli	
2.2.2.6 DP oceli	35
2.2.2.7 TRIP oceli	
2.2.2.8 CP oceli	
2.2.2.9 MS oceli	
2.2.2.10 HLSA oceli	
2.2.2.11 TWIP oceli	
2.3 Optické metody měření deformace	39
2.3.1 Fotogrammetrie	
2.3.2 Systém ARAMIS	
2.3.3 Systém ARGUS	
2.3.4 Systém PONTOS	

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI Katedra strojírenské technologie

3	Experimentální část	. 46
	3.1 Cíle experimentální části	. 46
	3.2 Použité materiály	. 47
	3.3 Získání a příprava vzorků	. 48
	3.4 Zařízení použité k měření	. 50
	3.5 Seřízení a kalibrace optického systému	. 51
	3.5.1 Seřízení objektivů	. 51
	3.5.2 Kalibrace objektivů	. 51
	3.6 Postup a průběh měření	. 52
	3.6.1 Rychlost snímkování	. 53
	3.6.2 Synchronizace měření	. 54
	3.6.3 Faktory ovlivňující měření	. 54
	3.7 Vyhodnocení měření – Mechanické vlastnosti materiálů	. 55
	3.8 Vyhodnocení optického měření	. 56
	3.8.1 Použití interpolace	. 57
	3.8.2 Zavedení potřebných prvků do získaných modelů	. 58
	3.8.4 Rozložení deformace ve vzorku	. 60
	3.8.4.1 Rozložení deformace v podélném směru vzorku před vznikem lomu	. 61
	3.8.4.2 Rozložení deformace ve směru trhliny vzorku před vznikem lomu	. 63
	3.8.5 Velikost oblasti lokalizace deformace (rozměr krčku)	. 65
	3.8.5.1 Rozměr krčku z rozložení def. ve směru kolmém k trhlině vzorku	. 65
	3.8.5.3 Porovnání velikostí lokalizace def. získaných oběma metodami	. 67
	3.8.6 Rychlost deformace	. 68
	3.8.7 Report ARAMIS	. 74
4	Diskuse výsledků	. 75
5	Závěr	. 77
6	Použitá literatura	. 78
7	Seznam příloh	. 80

Přehled použitých zkratek a symbolů:

A_{50mm}	 tažnost (počáteční měřená délka 50mm)	[%]
A_g	 homogenní tažnost	[%]
AHSS	 advanced high-strength steels	
ASCII	 American tandard code for information interchange	
AVI	 audio video interleave	
b	 šířka vzorku	[mm]
b_0	 počáteční šířka vzorku	[mm]
BH	 bake hardening	
CCD	 charge-coupled device	
СР	 complex phase	
DMP	 diagram mezních přetvoření	
DP	 dual phase	
3	 poměrné prodloužení	[-]
ε _r	 rovnoměrné prodloužení	[-]
ϕ_1	 hlavní logaritmická deformace (major strain)	[-]
ϕ_2	 hlavní logaritmická deformace (minor strain)	[-]
φ`1	 rychlost deformace (1. derivace deformace podle času)	$[s^{-1}]$
φ ``1	 2. derivace deformace podle délky	[-]
ϕ_{1L}	 lomová deformace	[-]
FLC	 forming limit curve	
σ_1	 hlavní normálové napětí	[MPa]
σ_2	 vedlejší normálové napětí	[MPa]
HLSA	 high strength low alloy	
IF	 intersticial free	
IT	 index tvářitelnosti	[-]
JPEG	 joint photographic expert group	
k	 stupeň tažení	[-]
KMP	 křivka mezních přetvoření	
KUT	 komplexní ukazatel tvářitelnosti	[-]
1	 délka vzorku; délka řezu	[mm]
l_0	 počáteční délka vzorku	[mm]

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI Katedra strojírenské technologie

Diplomová práce

m_{ϕ}	 ukazatel stavu přetvoření	[MPa]
m_{σ}	 ukazatel stavu napjatosti	[-]
MPG	 motion picture group	
MS	 martensitic steel	
n	 exponent deformačního zpevnění	[-]
ns	 exponent deformačního zpevnění (střední hodnota)	[-]
Р	 podíl meze kluzu a pevnosti	[-]
Δr	 plošné anizotropie (úhlová hodnota)	[-]
R	 smluvní napětí	[MPa]
R_m	 mez pevnosti	[MPa]
$R_{p0.2}$	 nevýrazná mez kluzu	[MPa]
rs	 normálové anizotropie (střední hodnota)	[-]
r_x	 normálová anizotropie (ve směru x)	[-]
S	 tloušťka vzorku	[mm]
S ₀	 počáteční tloušťka vzorku	[mm]
t	 čas	[s]
TIFF	 tagged image file format	
TRIP	 transformation induced plasticity	
TWIP	 twinning induced plasticity	
Z	 kontrakce	[-]
ZA	 zbytkový austenit	
ZP	 zásoba plasticity	[MPa]

Překlad výrazů uvedených na obrázcích získaných ze systému ARAMIS

major strain	 hlavní logaritmická deformace v hlavním směru	[-]
minor strain	 hlavní logaritmická deformace ve vedlejším směru	[-]
section length	 délka řezu	[mm]
stage	 stav; číslo snímku	[-]
strain	 deformace	[-]
time	 čas	[s]
visualization	 zobrazení	

1 Úvod

Jednou z dnes nejvíce rozvíjejících se oblastí průmyslu je, i přes současnou ekonomickou krizi, průmysl automobilový. V České republice působí 3 velké automobilky (Škoda Auto, TPCA, Huyndai), jež dohromady mají výrobní kapacity překračující hranici jednoho milionu vyráběných vozů za rok. Tím je v současnosti, vzhledem k počtu obyvatel, Česká republika hned za Slovenskem druhým největším výrobcem automobilů na světě.

Nosnou částí automobilu je jeho, dnes téměř výhradně, svařovaná samonosná karoserie. Její části se vyrábějí různými metodami plošného tváření na lisovacích či rolovacích strojích. Polotovarem jsou buď svitky anebo přístřihy plechu.

Materiály používané pro stavbu jednotlivých dílů karoserie mají rozličné mechanické vlastnosti. Znalost chování těchto materiálů je důležitá ze dvou hledisek. Prvním z nich je samotná vyrobitelnost požadovaného dílu z daného materiálu, kdy toto musí jeho mechanické vlastnosti a použitá výrobní technologie dovolit. Druhým hlediskem je funkce tohoto dílu v karoserii automobilu. U vyrobeného dílu nesmí být vyčerpána jeho zásoba plasticity tak, aby si při případné havárii vozu zachoval další deformační schopnost, a aby bylo pohlceno co největší množství deformační energie. Po vyčerpání deformační schopnosti u něj dochází ke vzniku trhliny (plastického lomu).

Okamžik předcházející vzniku plastického lomu při deformaci materiálu plechu je charakterizován maximální velikostí deformace, při které vzniká. Kromě této hodnoty je však důležité znát i rozložení deformace v okolí vznikající trhliny a místo od kterého trhlina vzniká. Spolu s hodnotami mechanických vlastností napomáhá znalost tohoto deformačního chování při výběru vhodného materiálu pro použití k dané aplikaci.

Teoretická část práce se zabývá tvářením kovů, materiály používanými v automobilovém průmyslu a optickými metodami měření deformací v oblasti lisování plechů.

Experimentální část práce se zabývá kinetikou vzniku plastického lomu u plechů používaných v automobilovém průmyslu. K měření byl použit bezkontaktní optický systém ARAMIS. Ten je kromě metody vyhodnocování deformačních sítí jednou z možností zkoumání deformace v okolí trhliny.

2 Teoretická část

2.1 <u>Tváření</u> [1]

Tváření je progresivní technologie, která ovlivňuje úroveň a rozvoj strojírenství. Spolu se slévárenstvím patří k nejstarším technologiím, jejichž výrobní postupy jsou známé již od doby bronzové. Spojuje v sobě základy z nauky o materiálech (kovech), fyziky pevné fáze a fyziky kovů, fyzikální chemie a teorie plasticity. Tváření kovů, především tváření kovů za studena, patří k nejproduktivnějším oborům technologie zpracování kovů, která nachází uplatnění ve všech oborech průmyslu. Používá se hlavně v sériové a velkosériové výrobě automobilů, ale i ostatních předmětů denní potřeby. Dají se tak vyrábět výrobky, které by se žádnou jinou technologií nedaly vyrobit.

Výhodou technologií tváření je vysoká úspora základního materiálu, nízká energetická náročnost výrobního procesu, vysoká produktivita práce a možnost dosažení vysoké přesnosti, kvality a jakosti výrobků. Při tváření za studena také dochází ke zpevňování materiálu.

Nevýhodou jsou vysoké vstupní náklady výroby. Vysoká cena moderních tvářecích strojů a výrobních nástrojů umožňuje použití těchto technologií pouze u velkých, mnohatisícových sérií. Jsme také omezeni strojem i nástrojem a při návrhu konečného dílu jsme omezeni jeho tvarem a rozměrem.

Pro tváření kovů je výhodná nízká pevnost (mez kluzu) a vysoká tažnost materiálu.

2.1.1 <u>Technologie tváření kovů</u> [1; 2; 3]

Tvářením kovů se rozumí technologický (výrobní) proces, při kterém dochází k požadované změně tvaru výrobku nebo polotovaru, příp. jejich vlastností, v důsledku působení vnějších sil. Podstatou tváření je vznik plastických deformací požadované velikosti a směru, k jejíž počátku dojde v okamžiku dosažení napětí na mezi kluzu pro daný materiál, aniž by došlo k porušení jeho soudržnosti. Změna tvaru a rozměrů je uskutečňována postupným přemísťováním částic kovu v jeho tuhém stavu, přičemž se předpokládá, že během velkých plastických (trvalých) deformací (přetvoření) se objem výchozího tělesa nemění, a proto není tváření teoreticky spojeno se ztrátami materiálu.

Technologické vlastnosti, což jsou vlastnosti umožňující za definovaných podmínek určitý způsob zpracování materiálu, můžeme u tváření kovů popsat s pomocí následujících pojmů.

Plastičnost - je schopnost materiálu k trvalé změně tvaru při působení vnějších sil. Úzce souvisí s vnitřní stavbou materiálu a jeho chemickým složením. Dále je závislá na mechanických vlastnostech daného materiálu a na podmínkách při kterých probíhá jeho tváření. Těmi jsou stupeň a rychlost deformace, stav napjatosti a teplota tváření. Nezanedbatelný je i vliv stárnutí oceli.

Tvářitelnost - je schopnost materiálu vytvořit požadovaný jakostní výrobek plastickou deformací za tepla nebo za studena, aniž by došlo k porušení materiálu. Je dána plastičností materiálu a jeho odporem proti přetvoření. Ten udává, jak snadno lze daný materiál zpracovávat při použití určité tvářecí technologie. Dobře tvářitelný materiál má nízký deformační odpor proti působení nástroje a současně vykazuje velkou a trvalou změnu tvaru beze vzniku trhlin.

Lisovatelnost - v sobě zahrnuje plastičnost i tvářitelnost. Je vlastnost umožňující požadovanou změnu tvaru, při zachování užitných vlastností zpracovávaného plechu. Výlisek musí splňovat požadavky na snadnou tvářitelnost, na jeho další zpracování (realizovatelnost následných operací, povrchové úpravy) a funkční uplatnění (tvarová a rozměrová přesnost, tuhost, stabilita). Lisovatelnost plechu je dána vzájemným působením několika faktorů (obr. 2.1.1).



Obr. 2.1.1: Faktory ovlivňující lisovatelnost: [3]

2.1.2 Základní rozdělení technologií tváření ocelí [1]

Podle vztahu teploty tvářeného materiálu a teploty rekrystalizace rozdělujeme technologie tváření na tváření **za studena**, **za tepla** a **za poloohřevu**.

Při *tváření za studena* je teplota tváření nižší než-li je teplota rekrystalizace ($T_{tvářeni} < 0,3 T_{táni}$). Dochází při něm k vyčerpání schopnosti materiálu k další plastické deformaci, zvyšuje se jeho odpor proti dalšímu přetvoření a dochází k jeho zpevňování, přičemž jednotlivá zrna vytvářejí tzv. texturu. Zpevněním se zvyšují mechanické hodnoty (mez kluzu a mez pevnosti v tahu) a klesá tažnost. Dochází i ke změnám fyzikálních (elektrických a magnetických) vlastností. Výhodou je vysoká přesnost rozměrů, kvalitní povrch a zlepšování mechanických vlastností zpevněním. Nevýhodou je nutnost používat velké tvářecí síly, nerovnoměrné zpevňování a omezená tvárnost materiálu.

Tváření za tepla probíhá nad rekrystalizační teplotou ($T_{tvářeni} > 0,7 T_{táni}$). Kov si během tváření zachovává plastické vlastnosti, čímž je možno dosáhnout velkých stupňů deformace. Při tváření za tepla dochází také ke zpevňování materiálu. Protože však zpevnění materiálu (vlivem deformace) je v rovnováze s účinkem rekrystalizace (opevňovací pochody), tak se materiál nezpevňuje, nevzniká textura a nedochází ke změnám jeho mechanických, ani fyzikálních vlastností. Výhodou je, že k tomuto tváření stačí síly až desetkrát menší než u tváření za studena. Nevýhodou je menší tvarová a rozměrová přesnost a nekvalitní povrch materiálu, způsobený jeho oxidací (reakce železa s kyslíkem) - tzv. okujení.

Tváření za poloohřevu ($T_{tváření} > 0,4$ až 0,7 $T_{tání}$) je kompromisem mezi tvářením za studena a za tepla a probíhá těsně pod rekrystalizační teplotou.

Podle výrobního hlediska se dělí technologie tváření na plošné a objemové tváření.

Objemové tváření může být buď za tepla nebo za studena. Deformace při něm nastává ve směru všech tří os souřadného systému a patří k němu především technologie válcování, tažení drátů a profilů, protlačování a kování.

Plošné tváření bývá prováděno za studena. Převládají při něm deformace ve směru dvou os souřadného systému. Mezi technologie plošného tváření patří stříhání, ohýbání, rovnání a tažení plechů.

2.1.3 <u>Hodnocení tvářitelnosti</u>

Tvářitelnost materiálu je ovlivněna jeho chemickým složením, stárnutím, předchozím zpracováním a průběhu plastické deformace. Tvářitelnost, jakožto technologická vlastnost se hodnotí a určuje různými metodami, které charakterizují materiál z hlediska jeho dalšího zpracování. Základem některých těchto metod je zkouška tahem, ze které se odvozují různé ukazatele tvářitelnosti. Další možností hodnocení tvářitelnosti jsou některé tzv. napodobující technologické zkoušky, nebo zpracování a vyhodnocení diagramů mezních přetvoření.

2.1.3.1 Vliv chemického složení na tvářitelnost [1]

Ocel je slitina železa s uhlíkem a dalšími doprovodnými prvky, které pocházejí ze vsázky, případně se do oceli dostávají záměrně nebo neúmyslně během výroby. Základní surovinou pro výrobu oceli je surové železo (vyrábí se ze železných rud ve vysoké peci) a ocelový odpad. Doprovodné prvky mají větší či menší vliv na mechanické a fyzikální vlastnosti ocelového materiálu. Můžeme je rozdělit na škodlivé a prospěšné. Pokud koncentrace doprovodných prvků překročí určitou hranici, tak se označují jako legující prvky. Vliv těchto prvků na vlastnosti slitin železa závisí na jejich koncentracích. Mezní obsahy jednotlivých prvků (v hmotnostních procentech) pro oceli jsou uvedeny v tabulce č. 1.

		mounosumen procent			
AI	hliník	0,10	Ni	nikl	0,30
Cr	chróm	0,30	Pb	olovo	0,40
Co	kobalt	0,10	Si	křemík	0,50
Cu	měď	0,40	Ti	titan	0,05
Mn	mangan	1,65	V	vanad	0,10
Мо	molybden	0,08	W	wolfram	0,10
Nb	niob	0,06	Zr	zirkon	0,05

Tab. 1. Mezní obsahy legujících prvků pro rozdělení ocelí na legované a nelegované (v hmotnostních procentech)

Doprovodné prvky, které u nelegovaných ocelí významně ovlivňují jejich vlastnosti jsou Mn – mangan, Si – křemík, P – fosfor, S – síra, O – kyslík, N – dusík, H – vodík. Mezi **škodlivé doprovodné prvky** se pak zařazují síra, dusík, fosfor, kyslík a vodík.

Síra – společně se železem vytváří sulfid železnatý (FeS), který snižuje houževnatost, tvářitelnost za studena a svařitelnost oceli. U válcovaných výrobků tvářených jedním

směrem (plechy), způsobuje síra značné rozdíly vlastností ve směru tváření a ve směru kolmému ke směru tváření (anizotropie vlastností). Příznivě působí na obrobitelnost a třecí vlastnosti, ale způsobuje menší odolnost proti korozi. U běžných ocelí je jejich obsah menší než 0,02 %.

Dusík – při nesprávném ochlazování se při výrobě nadbytečný dusík vylučuje ve formě nitridů železa (Fe₄N), které jsou vylučovány na hranicích zrn a ve kluzových rovinách. Tím dochází k zablokování vzniku dislokací a k tzv. stárnutí ocelí. Stárnutím vzniká velké navýšení meze kluzu při stejné pevnosti, klesá tažnost a vrubová houževnatost a může způsobit velké zkřehnutí oceli. Dusík společně s uhlíkem nejvíce ovlivňují stárnutí ocelí a omezují tvářitelnost ocelových plechů a proto je jejich obsah v materiálech určených k tváření co nejnižší.

Fosfor – jeho vliv závisí především na obsahu uhlíku v oceli. Při nízké obsahu uhlíku do 0,01 % má vliv na zvýšení tažnosti, ale při obsahu uhlíku nad 0,05 % způsobuje fosfor křehkost. U vysoce pevných ocelí snižuje mez únavy a zvyšuje sklon ke vzniku trhlin, prasklin a křehkých lomů.

Kyslík – podle jeho obsahu v oceli se oceli rozdělují na uklidněné a neuklidněné. V neuklidněných ocelích reaguje přebytek kyslíku s uhlíkem a způsobují vznik bublinek oxidu uhelnatého v ingotech. V uklidněných ocelích je koncentrace kyslíku nízká, a proto nedochází ke vzniku bublinek oxidu uhelnatého. Kyslík společně se sírou je hlavním zdrojem vměstků v oceli, které zhoršují čistotu oceli. Oxidické vměstky mohou být příčinou vzniku trhlin při cyklickém namáhání a nesmějí se objevit při výrobě tenkých plechů.

Vodík – ocelí bývá absorbován při její výrobě, při povrchových úpravách (moření) a při svařování. Snižuje plastické vlastnosti materiálu, aniž by docházelo ke zvyšování pevnosti. Vodík způsobuje tzv. vodíkovou křehkost a vodíkovou korozi.

Prospěšné doprovodné prvky:

Prospěšné prvky váží či odstraňují část nečistot (škodlivých prvků) tak, aby se jejich vliv udržel na přípustné hranici. Mangan, křemík a další prvky (legující) mají vysokou afinitu k dusíku a snižují jeho obsah tím, že s ním vytvářejí nitridy. Tak nedochází ke vzniku nitridů železa (Fe₄N), které způsobují stárnutí oceli. Tyto prvky slouží také jako dezoxidační přísady pro výrobu uklidněných ocelí, které mají výrazně delší dobu stárnutí než neuklidněné oceli.

Křemík – zvyšuje mez kluzu a pevnost, nad obsah 1 % snižuje plastické vlastnosti feritu a tím zhoršuje tvářitelnost oceli. Ovlivňuje složení produktů dezoxidace.

Mangan – má v koncentraci 0,3 - 1 % vyšší afinitu k síře než železo a příznivě ovlivňuje vylučování sulfidů tím, že snižuje jejich nepříznivé působení na houževnatost oceli. Zvyšuje pevnost, tvrdost a houževnatost oceli při zachování plastických vlastností. Zvýšení pevnosti je tím větší, čím méně uhlíku ocel obsahuje.

2.1.3.2 Vliv stárnutí oceli na tvářitelnost [4; 5]

Stárnutí ocelí je změna mechanických a fyzikálních vlastností, ke kterým dochází také u ocelí určených k tváření za studena. Tyto změny vznikají v průběhu času buď při běžné teplotě okolí (přirozené stárnutí), anebo při teplotě vyšší do cca. 350°C (umělé stárnutí). Stárnutí je způsobeno prvky, jež mají tyto vlastnosti.

- » Malý rozměr atomu
- » Malá rozpustnost ve feritu (s klesající teplotou se zmenšuje)
- » Dostatečná rychlost difuze ve feritu
- » Malou afinitu k železu

Těmito vlastnostmi se vyznačují především uhlík a dusík, které vytvářejí intersticiální tuhý roztok v železe α a jsou považovány za hlavní původce stárnutí ocelí. Podle příčiny vzniku se rozlišují dva druhy stárnutí.

Stárnutí po zakalení železa α - je způsobeno precipitačním vytvrzováním karbonitridy železa. Ty se po kalení samovolně vylučují z nestabilního přesyceného tuhého roztoku železa α , čímž dochází ke stárnutí. Při následné deformaci, takto vystárlého materiálu, zabraňují karbonitridy dislokacím v pohybu a dochází ke zpevnění a zkřehnutí oceli.

Průběh precipitace (stárnutí po zakalení) je dán tvorbou precipitačních zárodků a růstem jednotlivých částic.

Stárnutí můžeme zabránit použitím legujících prvků při výrobě oceli (uklidnění oceli). Nejvíce ho omezují prvky, které tvoří substituční tuhé roztoky v železe α , ovlivňují difuzní schopnosti dusíku a uhlíku ve feritu a vykazují vysokou afinitu k dusíku a uhlíku. Jsou to nitridotvorné a karbidotvorné prvky, především hliník, křemík, titan, zirkon, vanad a niob.

Rozdíl mezi stárnutím ocelí a precipitačním vytvrzováním je pouze formální. Spočívá v tom, že stárnutí považujeme za nežádoucí precipitační jev, zatímco precipitační vytvrzování považujeme za žádoucí precipitační jev (např. zvyšování pevnosti slitin lehkých kovů).

Stárnutí po plastické deformaci za studena - je způsobeno tím, že se atomy uhlíku a vodíku koncentrují v okolí dislokací (vznikají tzv. Cottrellovy atmosféry), které byly vytvořeny předchozí plastickou deformací materiálu. Při dalším tváření již nejsou žádné dislokace volné, což způsobuje zvýšený odpor proti plastické deformaci a ocel tak zpevní a zkřehne. Toto zpevnění a zkřehnutí se u deformačně vystárlých materiálů projevuje vznikem výrazné meze kluzu a tzv. Lüdersovy deformace (prodlevy). Vystárlé materiály, vykazující Lüdersovu prodlevu (obr. 2.1.2), nejsou vhodné pro tváření, protože na jejich přetvoření je nutno vyložit vyšší napětí, než u nevystárlého materiálu.

Deformačnímu stárnutí můžeme opět zamezit uklidněním oceli při její výrobě. V případě, že již nastalo, tak ho můžeme částečně odstranit odblokováním dislokací. To se provádí malou deformací materiálu za mezí kluzu (tzv. rovnání), čímž dojde k odstranění výrazné meze kluzu (Lüdersovy prodlevy).



Obr. 2.1.2: Vliv stárnutí oceli na tvářitelnost [5]

2.1.3.3 Vliv povrchu plechu na tvářitelnost [6]

Povrchová vrstva plechu má podstatný vliv na lisovatelnost. Společným působením nástroje a povrchové vrstvy (např. zinkový povlak) dochází k jejímu opotřebení a otěru, čímž se zabývá věda - tribologie. Při tváření může u vysokých deformací docházet ke ztrátě přilnavosti povrchové vrstvy k plechu a tím k porušení této vrstvy. U plechů bez povrchové úpravy se hodnotí 2D a 3D geometrie povrchu. Ta má význam pro mazání při tváření, s ohledem na udržení maziva, a dále pro následné operace lakování plechu.

2.1.3.4 Statická zkouška tahem – hodnocení tvářitelnosti [6]

Pro hodnocení tvářitelnosti je v praxi možno použít také zkoušku tahem. Cílem této zkoušky, která musí být provedena dle příslušné normy ČSN – EN 10002-1 (pro ploché tyče) je získání základních mechanických vlastností materiálu (A, $R_{P0,2}$, R_m , Z). Z nich jsou následně s použitím následujících vzorců vypočteny tzv. odvozené ukazatele tvářitelnosti.

Podíl meze kluzu a meze pevnosti

$$P = \frac{R_{p0,2}}{R_m} \quad [-] \tag{1}$$

Nachází-li se P v rozmezí 0,6 - 0,8 , vyhovuje materiál pro náročnější podmínky tváření.

Stupeň tažení

$$k = \frac{A_g}{R_{p0,2}} \qquad [-] \tag{2}$$

Komplexní ukazatel tvářitelnosti

$$KUT = P \cdot A_{80mm} \qquad [-] \tag{3}$$

Zásoba plasticity

$$ZP = \frac{3}{4} \cdot (R_m - R_{p0,2}) \cdot \varepsilon_r \qquad [-] \qquad \text{pro materiály s nevýraznou mezí kluzu} \qquad (4)$$
$$ZP = \frac{2}{3} \cdot (R_m - R_{p0,2}) \cdot \varepsilon_r \qquad [-] \qquad \text{pro materiály s výraznou mezí kluzu} \qquad (5)$$

Vliv anizotropie na tvářitelnost [2; 6; 7]

Anizotropie nám říká, že materiál nemá ve všech směrech stejné vlastnosti. Ty jsou nestejnoměrné v různých směrech souřadného systému. Při posuzování anizotropie je materiál považován za homogenní a v souřadném systému orientovaný tak, že osa **x** leží ve směru válcování. Rozlišují se normálová anizotropie a plošná anizotropie, u kterých určujeme jejich střední hodnoty \mathbf{r}_s resp. $\Delta \mathbf{r}$.

Normálová anizotropie

Jedná se o anizotropii určovanou ve směru tloušťky plechu. Říká kolikrát méně se daný materiál tváří ve směru tloušťky než ve směru šířky. Určujeme u ní střední hodnotu normálové anizotropie \mathbf{r}_s .

$$r_{\rm s} = \frac{1}{4} \left(r_0 + 2 \cdot r_{45} + r_{90} \right) \tag{6}$$

Ke stanovení této hodnoty je nutné znát hodnoty normálové anizotropie ve směru 0°, 45° a 90° ke směru válcování plechu (obr. 2.1.3) vypočtené dle vzorce (7) který říká, že anizotropie je poměr deformace šířky a tloušťky.



Obr. 2.1.3: Orientace zkušebních vzorků ke směru válcování

$$r_{X} = \frac{\varphi_{b}}{\varphi_{s}} = \frac{ln_{b_{0}}^{b}}{ln_{s_{0}}^{s}} = \frac{ln_{b_{0}}^{b}}{-(ln_{l_{0}}^{l} + ln_{b_{0}}^{b})} = \frac{ln_{b_{0}}^{b}}{-(ln_{l_{0}}^{l+b})} \qquad [-]$$
(7)

Anizotropie je vždy největší ve směru kolmém na směr válcování a nejmenší ve směru 45° ke směru válcování.

$$r_{90} > r_0 > r_{45} \tag{8}$$

Tato anizotropie je způsobena orientovanou krystalografickou strukturou vzniklou v důsledku prodloužení a plastické deformace krystalických zrn při tváření za studena. Deformační textura materiálu odpovídá tepelnému zpracování, způsobu předchozího tváření (krystalografická textura), nehomogenitě materiálu a přítomností vměstků (strukturní textura). Anizotropie se projevuje rozdílnými hodnotami meze kluzu v podélném a příčním směru válcování a ve směru tloušťky materiálu.

Z hlediska tvářitelnosti a hlubokotažnosti je výhodné, pokud je koeficient **r**_s co největší. Super-extra hlubokotažné materiály mají $r_s > 2$, naopak materiály s velmi špatnou hlubokotažností mají hodnotu $r_s < 0,7$. Vyšší hodnoty r_s jsou dány intenzivnějším průběhem plastické deformace v rovině tvářeného plechu než ve směru kolmém k povrchu tvářeného plechu.

Plošná anizotropie

Je to plošná anizotropie normálové anizotropie určovaná v rovině plechu. Pro její stanovení je opět nutné znát hodnoty normálové anizotropie ve směru 0°, 45° a 90°. Charakterizujeme ji úhlovovu hodnotou $\Delta \mathbf{r}$

$$\Delta r = \frac{1}{2} \left(r_0 - 2 \cdot r_{45} + r_{90} \right) \tag{9}$$

Je příčinou vzniku cípů při hlubokém tažení a z hlediska tváření je výhodné, pokud je $\Delta \mathbf{r}$ co nejmenší.

» při Δr = 0 cípy nevznikají
» při Δr > 0 cípy vznikají ve směru 0° a 90° ke směru válcování
» při Δr < 0 cípy vznikají ve směru 45° ke směru válcování

Exponent deformačního zpevnění [2; 6; 7]

Společně s koeficientem normálové anizotropie je exponent deformačního zpevnění **n** považován za nejdůležitější ukazatel tvářitelnosti při plošném tváření. Jako kritérium tvářitelnosti je rozhodující především pro případy hlubokého tažení.

Určuje tvar křivky zpevnění a zejména její strmost v oblasti plastických deformací. Pro tváření je výhodné, když je co největší, čímž nastává velká rychlost deformačního zpevnění plechu. Jeho vysoká hodnota zajišťuje rovnoměrnější rozložení deformace po celém objemu výlisku, čímž brání lokalizaci deformace v nejnamáhanějších místech materiálu a vzniku trhlin. Vysoký **n** vykazují materiály s optimální velikostí zrna a minimálním obsahem volných atomů uhlíku a dusíku. Jako ukazatel tvářitelnosti se používá střední hodnota \mathbf{n}_{s} .

$$n_{\rm s} = \frac{1}{2} \left(n_0 + 2 \cdot n_{45} + n_{90} \right) \tag{10}$$

» při $n_s < 0,215$ nízká tažnost » při $n_s = 0,215 - 0,25$ dobrá tažnost » při $n_s > 0,25$ - vynikající tažnost

Závislost exponentu deformačního zpevnění na mezi kluzu pro některé používané materiály karosářských plechů je znázorněna v následujícím grafu (obr. 2.1.4).



Obr. 2.1.4: Závislost exponentu deformačního zpevnění na mezi kluzu: [2]

Index tvářitelnosti: [6]

Zahrnuje v sobě společné hodnocení normálové anizotropie a exponentu deformačního zpevnění.

$$IT=1000 \cdot r_{\rm s} \cdot n \tag{11}$$

2.1.3.5 Diagramy mezních přetvoření – hodnocení tvářitelnosti [9; 10; 11; 12]

Diagramy mezních přetvoření (DMP) se používají pro určování deformace a jsou důležitou součástí hodnocení tenkých plechů. Do popředí zájmu se dostávají vždy, když jsou vyvinuty nové materiály pro výrobu plechů především pro automobilový průmysl.

Vyjadřují závislost největšího přetvoření φ_1 vynášeném na svislé ose diagramu na nejmenším přetvoření φ_2 vynášeném na vodorovné ose diagramu (obr. 2.1.5). φ_1 a φ_2 jsou hlavní normálová logaritmická přetvoření (deformace), přičemž $\varphi_2 \leq \varphi_1$. Jednotlivé stavy jsou v diagramu znázorněny pomocí následujících dvou ukazatelů:

$$m_{\sigma} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \in \langle 0; 1 \rangle$$
 [-] » ukazatel stavu napjatosti (12)

$$m_{\varphi} = \frac{\varphi_2}{\varphi_1} \in \langle -0,5;1 \rangle$$
 [-] » ukazatel stavu přetvoření (13)



Obr. 2.1.5: Diagram mezních přetvoření [2]

Standardně se DMP určují pro stavy napjatosti, u kterých dochází lisováním plechů ke vzniku trhlin. Charakterizují vliv stavu napjatosti na plastičnost plechu při daných teplotně-rychlostních podmínkách tváření. Mezní přetvoření je v těchto diagramech vyjádřeno buď pásmem diskrétních bodů, nebo pomocí křivky mezních přetvoření (KMP).

Poloha křivky mezních přetvoření je v diagramu určena definicí mezního stavu. Ten si můžeme libovolně určit. Nejvyšší polohu v diagramu zaujímá křivka, u které je mezní stav definován jako lom materiálu. Takto definovaná KMP odděluje v diagramu místa s lokálním ztenčením tloušťky plechu a s porušením výlisku (nad křivkou) od míst s ještě přípustnou deformací (pod křivkou). Křivka tak vytváří hranici kritických deformací pro daný mezní stav. Nejnižší hodnota KMP (mezní stav) zahrnuje ve většině případů zánik homogenní deformace plechu.

» plocha pod dolní hranicí KMP je nazývána oblastí bezpečného lisování

- » oblast mezi horní a dolní KMP je nazývána jako pásmo mezních přetvoření
- » oblast nad horní hranicí KMP je oblast nepřípustných deformací, které se při tváření skutečného výlisku nikdy nesmí dosáhnout

Experimentální získávání DMP je prováděno dle normy ISO/DIS 12004-2 vypínáním daných přístřihů s použitím plochého tažníku (Marciniak test), anebo polokulového tažníku (Nakazima test). Porušené přístřihy po Nakazima testu jsou znázorněny na obr. 2.1.6.

Deformace na povrchu výlisků se vyhodnocují s použitím deformačních sítí nanesených na povrch plechu před tvářením. Existují na ně různé požadavky, především to, aby neovlivňovaly tvářecí proces a aby nedošlo k jejich setření z plechu při lisování. Sítě jsou vytvářeny různými metodami, jež mají své výhody i nevýhody. Jsou to např. metoda sítotisku, razítkování, rytí, vyjiskřování, elektrochemického leptání (dnes nejrozšířenější metoda) atd.



Obr. 2.1.6: Přístřihy Nakazima testu po deformaci [2]

2.1.3.6 Technologické (napodobující) zkoušky tvářitelnosti [7]

Tyto technologické zkoušky tvářitelnosti za studena mají za cíl napodobovat skutečné procesy a jednoduché operace, které probíhají při lisování, ohýbání a lemování plechů při plošném tváření. Zahrnujeme mezi ně následující zkoušky:

- » klínová zkouška
- » zkouška hydraulická (Tomlenov, Jovignot)
- » zkouška kalíškovací (Engelhartova)
- » Engelhartova-Grossova zkouška kombinace hlubokého tažení a hloubení
- » zkouška tažením v kuželové tažnici (Fukui)
- » zkouška rozšiřováním otvoru
- » zkouška zvlnění (Conical cup wrinkling test)
- » zkouška vyboulení (Yoshida buckling test)
- » zkouška pásů střídavým ohybem
- » zkouška lámavosti (zkoušení drátů)

Zkouška hloubením podle Erichsena [7; 13]

U této zkoušky se do zkušebního vzorku z plechu o rozměrech 70 x 70 mm vtlačuje razidlo zakončené kulovým vrchlíkem o průměru 20 mm (obr. 2.1.7). Ukazatelem tvářitelnosti je velikost posuvu kulového vrchlíku v okamžiku kdy, dojde na vnější straně zkušebního vzorku ke vzniku první trhliny. Tato hloubka (posuv) je měřítkem schopnosti plechu k hloubení.



Obr. 2.1.7: Erichsenova zkouška

Kalíškovací zkouška [13]

Používá se pro simulaci hlubokého tažení u kalíšku s plochým dnem. Kalíšek o průměru **d** se vytahuje z přístřihů kruhového tvaru o průměru **D**, přičemž se průměr přístřihů neustále zvyšuje. Kritériem tvářitelnosti je zde tzv. stupeň tažení, což je poměr mezi průměrem tažníku a maximálním průměrem přístřihu, při kterém ještě nedojde k destrukci přístřihu.

$$K = \frac{D_{max.přístřihu}}{d_{tažníku}} \quad [-] \qquad \text{* koeficient tažení} \tag{15}$$

Pro hlubokotažné materiály je stupeň tažení zhruba 0,5. Závisí na technologických parametrech, jako je koeficient tření (na tažné hraně pod přidržovačem) a na poloměru tažné hrany. S rostoucím třením roste tažná síla, čímž klesá stupeň tažení. Při velkém tažném rádiusu klesá tažná síla a opět narůstá stupeň tažení.

Zkouška rozšiřováním otvoru [12]

Slouží pro určení maximálního průměru, který je materiál schopen snést po rozšíření. Jedná se o kruhový nebo čtvercový přístřih s kruhovým otvorem uprostřed, do kterého je vtlačován válcový tažník. Kritériem pro ukončení zkoušky je okamžik, kdy se na povrchu rozšiřovaného otvoru objeví první radiální trhlina. Vyhodnocuje se zde:

» hloubka tahu **h**

» poměrné rozšíření otvoru $d'=0,5\cdot (d_{max}-d_{min})$ (16) » plošná anizotropie vyjádřená poměrem $\frac{d_{max}-d_{min}}{d'}$ (17)

Na velikost rozšíření otvoru má vliv kromě mechanických vlastností materiálu (tažný materiál může mít menší otvor) také způsob výroby otvoru. Každá výrobní technologie totiž vnáší do materiálu nějaké vady a různou koncentraci napětí, což ovlivňuje výsledky zkoušky.

2.2 <u>Materiály používané pro stavbu karoserie</u> [14; 15; 16; 31]

Hlavní silou současného vývoje v automobilovém průmyslu jsou požadavky zákazníků na vyšší komfort, bezpečnost, trvanlivost a spolehlivost vozu při snižování hmotnosti a zatěžování životního prostředí, což má souvislost se spotřebou a tedy i náklady na provoz automobilu. To vše při co nejnižších výrobních nákladech a prodejních cenách, za které jsou lidé ochotni vůz koupit. Tyto požadavky (obr. 2.2.1) jsou kladeny na každý vůz a zároveň tedy i na rozmanité množství dílů a druhů materiálů, ze kterých je složen. Procentuální podíl zastoupení jednotlivých materiálů je uveden na grafu (obr. 2.2.2).



Obr. 2.2.1: Požadavky na automobil



Obr. 2.2.2: Procentuální zastoupení materiálů v automobilu [19]

Karoserie automobilu tvoří značnou část jeho hmotnosti (asi 1/4). U osobních automobilů je v dnešní době až na výjimky řešena téměř výhradně jako samonosná. Téměř celá je tvořena plechovými díly získanými s pomocí technologií plošného tváření. S ohledem na zvýšení bezpečnosti vozu a snížení jeho spotřeby je nutné, aby byl vůz co nejlehčí. Tohoto požadavku se, z hlediska karoserie, může dosáhnout použitím takových materiálů, které mají co nejnižší měrnou hmotnost. Jsou to především slitiny hliníku, slitiny hořčíku, kompozity a plasty. Tyto "alternativní" materiály se však používají pouze u sportovních a luxusních vozů, neboť jsou v porovnání s ocelí drahé a často i nesnadno zpracovatelné.

Nejčastěji se tedy na stavbu karoserie používá ocel (ocelové plechy), přičemž důvody pro její použití jsou:

- » příznivá cena materiálu
- » vysoká pevnost
- » snadná tvárnost (tažnost)
- » zaručená svařitelnost a spojování pájením
- » dostatečná životnost

Plechy musejí také splňovat některé další různorodé nároky, jako je např. vysoká kvalita povrchu vzhledových dílů a snadné nanášení ochranných protikorozních povlaků a barev v podmínkách sériové výroby.

Na karosářské ocelové plechy jsou často kladeny zcela protichůdné požadavky. Především zvyšování pevností plechů a tedy i tuhosti karoserie jako celku, je dosaženo jen za cenu zhoršení plastických schopností materiálu. Běžné konvenční oceli jsou totiž buď pevné, ale nepříliš tvárné (při přetížení praskají), nebo jsou tažné a dobře tvářitelné, avšak mají nízkou pevnost. I díky těmto uvedeným důvodům a stále se zvyšujícím nárokům na užitné vlastnosti automobilu a jeho nízkou hmotnost, rostou požadavky na vývoj nových druhů ocelových plechů a technologií jejich zpracování. Z pohledu aplikace ocelových plechů se jedná o: [14]

» aplikace vysokopevnostních plechů s menší tloušťkou při zachování tuhosti

karoserie.

- » aplikace povlakovaných pozinkovaných plechů
- » aplikace korozně odolných plechů
- » tailored blanks aplikace přístřihů svařených z různých druhů a tlouštěk plechů

2.2.1 Deformační zóny [17]

S ohledem na bezpečnost automobilu při dopravní nehodě jsou pro stavbu karoserie používány plechy z různých materiálů od hlubokotažných až po vysokopevnostní. Různé druhy těchto materiálů jsou v karoserii automobilu rozděleny do několika zón, z nichž každá plní v průběhu procesu deformace při nehodě vozidla odlišnou roli. Vnější zóny jsou zodpovědné za většinu deformací. Vnitřní zóny se naopak deformovat nesmí. Cílem uspořádání těchto zón je využití vlastností použitých materiálů tak, aby bylo při dopravní nehodě pohlceno co největší množství nárazové energie a prostor pro posádku vozidla byl co nejméně poškozen. Zároveň je brán zřetel na konstrukci přední části vozu s ohledem na ochranu ostatních účastníků silničního provozu, především chodců. Tento problém je však již z větší částí záležitostí plastových dílů (nárazník).

2.2.2 <u>Rozdělení ocelí pro stavbu karoserie</u>

Karosářské oceli v automobilovém průmyslu mohou být obecně rozděleny podle různých specifických kritérií, kterými jsou např.:

- » chemické složení a struktura
- » mechanické vlastnosti
- » tloušťka plechu
- » vhodnost ke zpracování válcováním za tepla či za studena
- » vhodnost k povrchovým úpravám

Důležité rozdělení ocelí dle mechanických vlastností však není jednoznačné. Neexistuje totiž přesná hranice meze kluzu, která by materiály rozdělovala na hlubokotažné, pevnostní a vysokopevnostní. Orientační hranice jsou znázorněny na následujícím obr. 2.2.3.



Obr. 2.2.3: Rozdělení ocelí dle $R_{p0,2}$ [18]

Přehled používaných karosářských ocelí válcovaných za tepla i za studena je uveden v příloze č. 1.

2.2.2.1 Hlubokotažné plechy z ocelí uklidněných hliníkem [5; 20; 21]

Jedná se o materiály s minimálním množstvím uhlíku (feritická struktura) a dalších doprovodných prvků, které jsou vhodné pro technologii hlubokého tažení za studena. Protože jsou měkké, mají velmi dobré plastické vlastnosti a výbornou tvářitelnost. Nízký obsah uhlíku (řádově stovky ppm) umožňuje jejich snadnou svařitelnost. Jelikož se často používají na pohledové díly karoserie, jsou kladeny nejvyšší požadavky na jakost jejich povrchu. Ta je zajištěna tím, že výchozí materiál pro výrobu plechu, uklidněný hliníkem, obsahuje pokud možno co nejmenší množství makroskopických nekovových vměstků (vměstky se při válcování oceli dostávají na povrch kde způsobují řádkovitost). Pro zlepšení mechanických vlastností mohou být mikrolegovány titanem, vanadem, borem, zirkonem a niobem. Hlubokotažné plechy se rozdělují do několika skupin dle jejich chemického složení, mechanických vlastností a způsobu výroby.

» CQ	» plechy běžné kvality (comercial quality)
» DQ	» tažné plechy (drawing quality)
» DDQ	» hlubokotažné plechy (deep drawing quality)
» EDDQ	» zvlášť hlubokotažné plechy (extra deep drawing quality)
» EDDQ-S	» super hlubokotažné (extra deep drawing quality – super)

Uklidněním ocelí hliníkem zamezuje stárnutí, což umožňuje jejich pozdější zpracování. Hlubokotažné materiály se však často žárově pozinkovávájí, čímž jsou vystaveny složitým teplotním cyklům. Protože však hliník na sebe není schopen navázat veškerý uhlík, dochází i přes uklidnění ocelí jejich stárnutí vlivem pozinkování. Z tohoto důvodu jsou v současnosti hlubokotažné plechy, u některých aplikací, nahrazovány novými IF ocelovými plechy.

Hlubokotažné "měkké" nízkouhlíkové plechy dříve splňovaly všechny na ně kladené požadavky. S rostoucími požadavky na stále větší tvářitelnost (EDDQ a EDDQ-S plechy) však bylo zjištěno, že obsahují stále velké množství uhlíku a dusíku v tuhém roztoku, jež způsobují stárnutí a omezují hlubokotažnost materiálu. Proto byly vyvinuty IF oceli, v současnosti u některých aplikací, nahrazující hlubokotažné oceli uklidněné hliníkem.

2.2.2.2 IF oceli [5; 12; 22]

IF oceli jsou také známé pod názvem ULC (ultra low carbon). Jsou to materiály, které na rozdíl od hlubokotažných plechů jsou zcela odolné proti stárnutí i po žárovém pozinkování. Jsou legované prvky (Al, Ti, Nb), jež na sebe vážou uhlík a dusík, čímž v nich vznikají karbidy a nitridy. To způsobuje, že mají velmi malou hladinu obsahu volně rozpuštěného intersticiálního uhlíku a dusíku v tuhé fázi. Obsah volného uhlíku a dusíku je udáván v jednotkách ppm (maximálně 25 - 30 atomů uhlíku v 1 000 000 atomů oceli). Protože nemají intersticiální poruchy krystalické mřížky, tak se vyznačují nízkou pevností ($R_{p0,2}$ do 200 MPa; R_m do 280 MPa) a výbornou tvářitelností. Ta je dána vysokým koeficientem normálové anizotropie r_s > 2 a exponentem deformačního zpevnění n > 0,25 a umožňuje IF plechům použití i pro velmi složité karosářské výlisky. Pro zvýšení pevnosti se do některých IF ocelí přidává malé množství fosforu (max. stovky ppm). Nízká mez kluzu výhodná pro tváření je, po vyčerpání deformační schopnosti materiálu, z hlediska výrobku nevýhodou z důvodu nízkého odporu proti porušení kovu.

2.2.2.3 BH oceli [5; 12; 23]

BH oceli jsou jistou obdobou IF ocelí a mají taktéž feritickou strukturu. Jejich výhoda oproti IF ocelí spočívá ve vyšší odolnosti proti deformaci a porušení hotového výlisku, jenž je zajištěna s pomocí tzv. BH efektu. Výsledná pevnost u těchto BH ocelí je dána spojením deformačního zpevnění dílu po jeho tváření za studena s následným umělým stárnutím materiálu. K němu dochází při tepelném cyklu způsobeném vypalováním laku karoserie při teplotách 170 až 200 °C po dobu cca. 20-ti minut.

BH efekt je jev, při kterém dochází k obklopení dislokací, vzniklých při plastické deformaci, především volným uhlíkem a dusíkem v materiálu. Zablokováním dislokací dochází ke značnému nárůstu meze kluzu oceli o 30 - 80 MPa. Protože se jedná o difuzní jev, je velikost BH efektu závislá na teplotě a čase, přičemž s jejich rostoucí hodnotou vzrůstá i velikost tohoto vytvrzení. Ta roste i s vyšším počtem nečistot a dislokací v materiálu. Dále BH efekt závisí na chemickém složení oceli a obsahu uhlíku, historii tváření (válcování) za studena a parametrech rekrystalizačního žíhání při výrobě oceli. BH efekt je znázorněn na obr. 2.2.4.



Obr. 2.2.4: BH efekt [5]

Pro výrobu BH plechů rozlišujeme 2 druhy ocelí. » oceli se zvýšeným obsahem C » oceli se zvýšeným obsahem Ti, resp. Nb

Nevýhodou BH ocelí je, že v důsledku změn mechanických vlastností vlivem ohřevu podléhají větší deformaci a vyskytuje se u nich nižší rozměrová přesnost. Z tohoto důvodu je dnes snaha je nepoužívat. Používají se pouze pro velkorozměrné výlisky, jako jsou kapota, střecha a vnější pohledový díl dveří karoserie automobilu, což jsou výlisky s malou deformací. U nich je z hlediska výroby důležité použít plastický materiál s nízkou mezí kluzu, který se vyznačuje nejmenší velikostí odpružení. Při následném lakování vozu dojde vlivem BH efektu k nárůstu meze kluzu, a tyto povrchové části karoserie se stanou odolnější proti poškození a promáčknutí (tzv. dent resistance).

2.2.2.4 Vysokopevnostní materiály [3; 11; 24]

Dříve se v automobilovém průmyslu tradičné zpracovávaly plechy z nízkouhlíkových uklidněných ocelí. Jejich výhodou je vysoká tvárnost při nízké mezi kluzu a vysoké tažnosti. Dnes jsou u automobilu kladeny požadavky na ekologii provozu (spotřebu paliva), energetickou i ekonomickou náročnost výroby vozu a jeho stále rostoucí bezpečnost. Pro sledování těchto cílů jsou v současnosti, pro některé části karoserie, používány a neustále vyvíjeny vysokopevnostní materiály s mezí pevnosti až 1500 MPa.

Jejich nevýhodou je, že požadavek na zvýšení meze kluzu vede ke snižování tažnosti, čímž klesá tvářitelnost. Zároveň mívají menší zásobu plasticity a mohou být tedy použity pouze na výlisky s menším přetvořením. Požadované fyzikálně-mechanické vlastnosti vysokopevnostních materiálů jsou nejčastěji dosaženy kombinací různých strukturních fází. Jedná tedy o vícefázové oceli, někdy zařazované do skupiny AHSS ocelí.

Plechy z vysokopevnostních ocelí nabízejí stejné pevnosti jako běžné konvenční oceli, avšak při nižších tloušťkách materiálu. Proto jsou chápány jako hlavní prostředek pro snížení hmotnosti automobilu a růst jejich podílu na automobilové karoserii je nezadržitelný (např. VW Tuareg má 28 % plechů karoserie vysokopevnostních). Používají se na místech karoserie, jejichž hlavním cílem a úkolem je chránit bezpečnost posádky (nárazník, prahy, A a B sloupek, ...).

Tyto materiály jsou vyráběny se zaručenou mezí kluzu a přijatelnou tvárností, přičemž existují 2 koncepce výroby výlisků:

» výroba teplou technologií - vylisuje se měkký výlisek a následně se zakalí

(B sloupek)

» výroba studenou technologií - vyrobený plech se tepelně zpracuje a následně se tváří (výztuha prahu)

Výhody používání vysokopevnostních plechů:

» snížení hmotnosti

- » snížení ceny výlisku z důvodu snížení tloušťky plechu
- » vyšší bezpečnost díky vyšší nárazové odolnosti
- » zlepšení odolnosti proti vrubům
- » zlepšení meze únavy

2.2.2.5 Mikrolegované oceli

Jedná se o nízkouhlíkové oceli na bázi manganu a křemíku s pevností 300 - 600 MPa, které se získávají tím, že se leguje IF ocel buď substitučními, anebo intersticiálními prvky. Při pevnostech vyšších než 600 MPa je krystalická mřížka této oceli vlivem legur (Cr, Mo, V, Ni) tak pevná, že se již nedá tvářet, protože se snižuje její tažnost.

2.2.2.6 DP oceli [2; 14; 24; 25]

Jsou tvořeny feritickou strukturou, ve které jsou rozptýleny martenzitické fáze (10 - 35%). Ferit, jakožto měkká a tvárná struktura zajišťuje to, aby šel plech tvářet. Naopak tvrdý a netvářitelný martenzit dává oceli pevnost. Kombinací poměru těchto dvou fází (je dán množstvím legujících prvků) v materiálu, získáváme tvárnou a pevnou část struktury, čímž je možno do určité míry nalézt optimální poměr mezi tažností a pevností.

DP plechy jsou vyráběny buď řízeným ochlazováním austenitu (válcované za tepla), a nebo z dvoufázové feriticko-martenzitické struktury (válcované za studena). Vyznačují se nízkým poměrem R_e/R_m , kdy mez kluzu nedosahuje ani 70% meze pevnosti, což zajišťuje dobrou tvářitelnost a vysokou rychlost deformačního zpevnění při tváření za studena již při malých stupních deformace (5 %). Deformační zpevnění feritu při tváření společně s martenzitem umožňuje dosáhnout velmi pevných součástí. Ty jsou zároveň velmi dobře svařitelné s pomocí všech konvenčních metod svařování. Typické aplikace DP ocelí v automobilovém průmyslu jsou bezpečnostní výztuhy bočních dveří, výztuhy nárazníků a také disky kol. Mikrostruktura DP oceli je znázorněna na obr. 2.2.5.

2.2.2.7 TRIP oceli [5; 26; 27]

TRIP oceli jsou oceli s transformačně indukovanou plasticitou. Mají vícenásobnou strukturu a obsahují martenzit (je netvářitelný), bainit (je houževnatý a tvrdý), ferit (je měkký) i zbytkový austenit (je měkký). Tato vícefázová struktura jim přináší vysokou pevnost a současně i vynikající plastické vlastnosti. Jejich standardní mechanické vlastnosti dosahují meze kluzu 450 MPa, meze pevnosti 950 MPa a tažnosti 15 - 25 % i více. Jejich vlastnosti jsou ovlivněny podílem jednotlivých fází a jsou závislé na tepelném zpracování při výrobě. Bývají legovány manganem, křemíkem a hliníkem.

Zbytkový austenit (asi 5 až 15 procent) se u TRIP ocelí nachází ve feritické matrici. Protože je v nestabilním stavu, začne se při tváření přeměňovat na martenzit (fázová martenzitická transformace). Martenzit začne tedy při přetvoření v materiálu přibývat, a současně se deformovat.

Velikost napětí, při kterém se začíná přeměňovat zbytkový austenit na martenzit je závislá na obsahu uhlíku v austenitu. Při nižším obsahu uhlíku se zbytkový austenit (ZA) začíná na martenzit přeměňovat téměř okamžitě, čímž roste koeficient deformačního zpevnění a tvářitelnost. Při vyšším obsahu uhlíku nastává přeměna ZA na martenzit až při napětí, které je vyšší, nežli napětí potřebné pro tváření plechu a získání výlisku. Z tohoto důvodu se tyto materiály používají na ty části karoserie, jenž mají za úkol pohltit

co největší množství energie při nárazu vozidla. Zbytkový austenit se, v takovém případě, přeměňuje na "tvrdý" martenzit až při této následné deformaci, dochází ke zpevnění materiálu a součást z TRIP oceli pracuje jako tlumič. Nasycení ZA uhlíkem je ovlivněno průběhem izotermické bainitické přeměny při výrobě TRIP oceli. Struktura TRIP oceli je uvedena na obr. 2.2.5.

2.2.2.8 CP oceli [12; 24; 27]

CP oceli jsou nízkouhlíkové vícefázové materiály obsahující všechny strukturní složky. Mají malé martenzitu, zbytkového austenitu množství а perlitu ve feriticko-bainitické (horní + dolní bainit) matrici. Chemické složení a speciální válcovací proces při výrobě plechů dávají CP ocelím extrémně jemnozrnnou strukturu. Ta je způsobená opožděnou rekrystalizací a precipitací mikrolegujících prvků jako je titan nebo kobalt a zaručuje dobrou tvářitelnost. Rovnováha mezi všemi strukturními fázemi poskytuje těmto materiálům zajímavou kombinaci vysoké pevnosti a odolnosti proti opotřebení společně s dobrou tvářitelností za studena a svařitelností.

Při tváření se CP oceli chovají podle pravidla nejmenšího odporu. Nejprve se tváří austenit (nepřeměňuje se, ale zpevňuje do doby než-li se zahltí dislokacemi), po němž následuje ferit a bainit. Čím více těchto měkkých strukturních fází CP oceli obsahují, tím je menší jejich pevnost. Nabízejí velké deformační zpevnění (menší než TRIP oceli) i při lehkých tvářecích operacích, které je dáno jejich jemnozrnnou strukturou. Vyznačují se vysokou schopností absorbovat energii a vysokou zbytkovou deformační kapacitou. Z tohoto důvodu jsou používány při stavbě automobilu na lehké a za studena tvářené "crash" díly, jako jsou výztuhy dveří, karoserie, nárazníků, B sloupků.

CP oceli vyráběné firmou Thyssen Krupp Steel mají minimální tažnost A_{80mm} 10%, minimální mez kluzu mezi 600 až 720 MPa a minimální mez pevnosti mezi 800 až 950 MPa. Navíc se u nich využívá zpevnění s pomocí BH efektu, který při lakování karoserie dovolí nárůst meze kluzu až o 70 MPa. Jsou vyráběny buď válcováním za tepla, anebo válcováním za studena. Struktura CP oceli je znázorněna na obr. 2.2.5.

2.2.2.9 MS oceli [12; 24; 27]

MS oceli jsou to vysokopevnostní materiály pro výrobu plechů, u kterých při válcování za tepla na kontinuálních linkách, anebo žíháním s následným prudkým ochlazením, dochází k přeměně austenitu na martenzit. Takto získané martenzitické oceli, obsahující malé množství feritu (nebo i bainitu), mají mezi vysokopevnostními ocelemi
nejvyšší mez pevnosti v tahu, dosahující hodnot až 1700 MPa. Pro zpevnění martenzitu a zvýšení kalitelnosti se do MS ocelí přidává uhlík a v různých kombinacích i další prvky (Mn, Si, Cr, Mo, Ni). Vyšší tvářitelnosti se naopak dosáhne snížením obsahu uhlíku a dosažením většího podílu feritu ve struktuře oceli např. popouštěním.

S ohledem na vysokou pevnost mají tyto materiály, díky obsahu feritu a martenzitu, takové plastické vlastnosti, které umožňují jejích tvářitelnost. Ta je však značně omezena. Z tohoto důvodu se MS ocelové plechy mohou používat pouze pro výlisky s deformací do 5-ti procent, neboť jejich maximální deformace dosahuje hodnot okolo 7 procent. Z nich vyrobený výlisek má již vyčerpány své plastické vlastnosti a při následné deformaci již není schopen pohltit žádnou deformační energii a praskne. V automobilech se používají na ty díly karoserie, jejichž primárním úkolem je při dopravní nehodě zachovat neporušený prostor pro posádku a nemají za cíl vstřebávat velké množství deformační energie. Jsou to především různé bezpečnostní výztuhy karoserie. Mikrostruktura MS oceli je na obr. 2.2.5.

2.2.2.10 HLSA oceli [5; 28]

HSLA oceli jsou vysokopevnostní mikrolegované oceli obsahující 0,05 - 0,5 procent uhlíku a maximálně 2 % manganu. Mikrolegování se provádí z důvodu zlepšení mechanických vlastností, nebo pro zlepšení odolnosti proti atmosférické korozi. Jejich vlastnosti jsou dosahovány přídavkem velmi malého množství prvků (do 0,1 %) jako jsou Ti, Cr, Mo, N, V, Ni, Nb. Různé kombinace těchto prvků společně s různými mechanismy zpevnění a speciálními technologickými postupy výroby (řízené válcování, urychlené ochlazování), dávají těmto ocelím velký rozsah požadovaných fyzikálně-mechanických vlastností. Pro velmi nízký obsah legur nejsou považovány za slitinové materiály.

HLSA oceli se dělí do šesti skupin, které se mohou vzájemně prolínat.

- » oceli s odolností proti atmosférické korozi
- » mikrolegované feriticko-perlitické oceli
- » válcované perlitické oceli
- » oceli s jehlicovitým feritem
- » DP oceli
- » oceli s kontrolovaným tvarem vměstku

2.2.2.11 TWIP oceli [5; 12; 29]

TWIP oceli jsou materiály, u kterých dochází k plastickému přetvoření prostřednictvím mechanismu zalomení (rozdvojení) krystalické mřížky - tzv. dvojčatěním. Tím jsou odlišné od většiny ostatních kovových materiálů, které se deformují pomocí skluzu dislokací v nejvíce atomy obsazených krystalografických rovinách. Dalším mechanismem přetvoření je mezibloková a mezikrystalická deformace. Při tváření vždy probíhají všechny tyto mechanismy současně a to, který z nich je dominantní záleží na teplotně rychlostních podmínkách tváření.

Dvojčatění většinou nastává při nízké teplotě a vysokých rychlostech tváření (např. tváření výbuchem), avšak TWIP oceli jsou materiály umožňující dvojčatění i při běžných podmínkách tváření (TWIP efekt). Protože se materiál při dvojčatění deformuje pouze ve velmi malém objemu, je možno i při menších tvářecích silách dosáhnout značných deformací. Zároveň je dosaženo velkého zpevnění při tváření za studena, při kterém nedochází ke zužování materiálu (vznik krčku), a zachovávají se jeho deformační schopnosti.

TWIP oceli obsahují velké množství manganu (až 25%), křemík a hliník a jsou austenitické i při běžných teplotách. Díky jejich chemickému složení si austenitickou strukturu zachovávají i při tváření a nedochází u nich k přeměně austenitu na martenzit (TRIP efekt), což umožňuje výše zmíněné dvojčatění. Vyznačují se vysokou pevností srovnatelnou s MS ocelemi a dosahují deformací až 90 %. Chovají se tedy zároveň jako vysokopevnostní a hlubokotažné materiály.

Průmyslové použití TWIP ocelí v současné době však není možné, neboť jejich vynikající tvárné vlastnosti jsou dosahovány pouze v laboratorních podmínkách. Jsou totiž špatně svařitelné a náchylné na vznik mikrotrhlin při dělení materiálu. Zároveň je obtížná jejich výroba. Po vyřešení jmenovaných problémů bude možná aplikace TWIP ocelí pro lehké bezpečnostní díly karoserie automobilů, jež jsou v současnosti vyráběny za tepla.



Obr. 2.2.5: Struktury některých druhů ocelí [2; 27]

2.3 Optické metody měření deformace

2.3.1 <u>Fotogrammetrie</u> [30; 31]

Fotogrammetrie je základním principem optických měřících systémů. Obecně jsou fotogrammetrické metody nepřímé způsoby získávání i informací o tvaru a poloze objektu, při kterém se informace získávají z jednoho nebo více fotografických snímků na základě exaktního měření. Fotogrammetrii lze uplatnit všude, kde lze požadovaný objekt vyfotografovat. S rozvojem digitální techniky a počítačů je umožněno vyhodnocovat pořízené snímky bezprostředně po jejich získání.

Fotogrammetrie nachází své uplatnění kromě strojírenství (např. zde uvedeném měření deformací) především v kartografii, stavebnictví, lesnictví, kriminalistice, medicíně i dalších v oborech.

Při měření musí být nejdříve získány snímky označených bodů, které se nacházejí v daném souřadném systému vymezeném referenčními body. Pro správné vyhodnocení je nutné snímky očíslovat a vypočítat souřadnice nasnímaných bodů. Následně se provádí identifikace a měření označených bodů a jejich porovnávání mezi jednotlivými snímky. Body, které jsou neidentifikovatelné (např. vlivem odrazu světla)se z výpočtů eliminují.

Cílem vyhodnocení je určení třídimenzionálních souřadnic bodů za účelem numerického zpracování a grafického posouzení požadovaných charakteristik.

Pro optické měření ve 3D prostoru je nutno využít nejméně 2 překrývající se snímky. Z jednoho snímku lze totiž určit 2D souřadnice a pro přechod na 3D souřadnice potřebujeme další měření - tím je další snímek. Měřený předmět musí být současně zobrazen na dvou snímcích (stereo-fotogrammetrie) a ze snímkových souřadnic téhož objektu na obou snímcích je možno vypočítat jeho prostorovou 3D polohu.

Metody fotogrammetrie můžeme dle způsobu zpracování snímků rozdělit na metody analogové, analytické a digitální. V současnosti se pro snadný a moderní přenos dat, dokonalé kopírování snímků, snazší odstranění šumu a možností automatického zpracování prosazují nejvíce digitální metody. Využívají digitální obraz, což je obrazová informace převedená do číslicové formy. Změny souřadnic mezi jednotlivými snímky a jejich zpracování se provádí s pomocí počítače. Jednodušší metody si vystačí s běžným počítačem a programem, pro stereometody je nutné doplnit o hardwarové doplňky umožňující stereovidění.

Fotogrammetrické principy jsou využívány i u přístrojů určených pro měření deformací plechů. Zde optické metody měření mohou nahradit používanou metodu měření deformací s pomocí deformačních sítí. Firma GOM mbH. nabízí optické systémy měření deformací ARAMIS, ARGUS a PONTOS, které jsou níže popsány.

Hlavní požadavky na optickou digitalizaci

» přesnost » rychlost měření » vysoké rozlišení » mobilita » jednoduchost používání

2.3.2 Systém ARAMIS [25; 32]

ARAMIS je bezkontaktní optický měřící systém určený pro měření reálných 3D deformací. Princip měření je založen na fotogrammetrické korelaci zobrazení. Přístroj umožňuje stanovit deformaci materiálu na základě posunutí sledovaných bodů na povrchu materiálu mezi referenčním (nezatíženým) stavem a stavem při zatěžování. K tomuto účelu je systém vybaven dvěma kamerami, jež snímají povrch tělesa ze dvou směrů. Díky tomu probíhá prováděné měření ve 3D prostoru. Kamery jsou osazeny CCD senzory, které dovolují maximální rychlost snímkování až 8000 snímků za sekundu (ARAMIS HS - Hight Speed). To tento systém předurčuje pro měření jak zkoušek s pomalým statickým zatěžováním, tak i rychlých dynamických zkoušek (rázová zkouška, rychlé deformační zatěžování). Výsledkem měření je barevná mapa rozložení deformací na objektu zatěžovaném buď staticky nebo dynamicky. Proces měření může být spouštěn v pravidelných intervalech, nebo může být řízen externím signálem (např. ze zatěžovacího stroje). Při měření rotačních objektů může být propojeno více systémů ARAMIS do jednoho měřícího celku.

Pro vyhodnocení měření se nejprve definují fasety na zobrazení původního stavu. Potom se pro každý krok přesně vypočítají 3D souřadnice faset na povrchu měřeného objektu s použitím fotogrammetrických principů. Na základě těchto souřadnic se přesně vypočteno posunutí, prodloužení a tvar s vysokým rozlišením. Výsledky měření mohou být znázorněny v jako obrázek ve grafických formátech TIFF a JPEG, a nebo jako video ve formátu AVI. Dále mohou být exportovány v uživatelsky definovaném ASCII formátu pro další zpracování. Konfigurace systému ARAMIS je znázorněna na obr. 2.3.1.



Obr. 2.3.1: Systém ARAMIS od firmy GOM

Přednosti systému

- » velký rozsah měření (objekty od velikosti 1mm do 1000 mm)
- » rozsah měření deformace (od 0,05% až do stovek %)
- » jednoduchá příprava povrchu objektu (nástřik může být pravidelný i náhodný)
- » vysoká hustota naměřených dat (bodů na povrchu objektu)

- » mobilita (systém lze převážet v osobním automobilu)
- » flexibilita (snadná změna velikosti záběru a rozlišitelnosti systému)
- » přehledná analýza výsledků měření (grafické vizualizace)

Postup měření

- » na objekt je pomocí spreje nanesen kontrastní vzor (tzv. pattern)
- » pattern se deformuje zároveň se zatěžovaným objektem
- » objekt je pro každou úroveň zatížení (tzv. stage) sejmut 2 CCD kamerami
- » ze snímků jsou pomocí image processingu vypočteny 3D souřadnice bodů ležících na povrchu objektu
- » porovnáním odpovídajících si bodů v jednotlivých úrovních zatížení systém vypočítá
 3D posuvy a následně tvar deformovaného objektu a 3D deformace

Výstupy z měření

- » hodnoty 3D posunutí bodů na povrchu objektu
- » hodnoty 3D posunutí bodů v radiálním směru
- » hodnoty 3D deformace měřené na povrchu objektu (Mises, Tresca strain)
- » hodnoty hlavních a vedlejších deformací (Major, Minor strain)
- » tvar objektu v jednotlivých fázích deformace (mrak bodů)
- » hodnoty změny tloušťky materiálu (např. u plechů)
- » velikost deformace vůči limitní tvářecí křivce (FLC)
- » grafické nebo tabulkové výstupy naměřených hodnot

Oblasti využití systému ARAMIS

- » dimenzování součástek
- » zkoušky materiálu
- » ověřování FE analýz
- » testování nových materiálů
- » výpočty stability
- » zkoumání materiálu v nelineárních oblastech deformace
- » optimalizace procesu tváření (limitní křivka tváření FLC)
- » zjišťování materiálových vlastností
- » charakteristika procesu tečení
- » charakteristika procesu stárnutí

Základní rozdělení systémů ARAMIS:

ARAMIS 4M je určen pro měření deformací, kde je důležitým aspektem jak vysoké rozlišení tak rychlost kamer. Díky novému typu kamer je možno snímat vzorkovací frekvencí 55 Hz za plného rozlišení, případně frekvencí až 440 Hz při zmenšení rozlišení čipu v jednom směru, což umožňuje snímání středně rychlých dějů při vysokém rozlišení.

ARAMIS 5M je vzhledem k vyššímu rozlišení CCD čipu vhodný pro měření velkých objektů nebo pro měření s vyšším rozlišení detailů. Na rozdíl od systému ARAMIS 4M je zde rozlišení CCD čipu 5 000 000 bodů a snímkovací frekvence 15 Hz (resp. 30 Hz při snížení rozlišení CCD čipu).

ARAMIS HS je systém speciálně přizpůsobený pro měření velmi rychlých dynamických dějů. Rozlišení CCD čipu je 1 300 000 pixelů a snímkovací frekvence může být v plném rozlišení až 500 Hz. Při snížení rozlišení CCD čipu může být dosaženo frekvence snímků až 8000 Hz. Snímkování lze řídit externím signálem nebo dle předem připravených instrukcí.

2.3.3 Systém ARGUS [32]

Jedná se o bezkontaktní optický systém pro měření 3D deformací plechu při lisovacím procesu. Původně byl vyvinut pro automobilku Renault, nyní je používán ve všech lisovnách této automobilky stejně tak jako u většiny jejich dodavatelů a výzkumných institucí po celém světě.

Přednosti systému

- » mobilita (systém lze převážet v osobním automobilu)
- » flexibilita (snadná změna velikosti záběru a rozlišení)
- » velký rozsah měření (objekty od 100mm do několika m)
- » rozsah měření deformace (od 0.5% až do několika stovek %)
- » vysoká přesnost a hustota naměřených dat (bodů na povrchu objektu)
- » přehledná analýza výsledků měření (grafické vizualizace)

Postup měření

- » na měřený objekt je elektrochemicky vyleptána mřížka bodů o mikroskopické tloušťce
- » velikost bodů mřížky je standardně mezi 1 a 6 mm
- » mřížka se deformuje zároveň s vylisováním plechového dílu
- » po vylisování je plech změřen kamerou se CCD čipem

- » ze snímků jsou pomocí image processingu vypočteny 3D souřadnice bodů mřížky
- » vzdálenost mezi body mřížky definuje laterální distorzi
- » na základě metody zachování konstantního objemu jsou vypočteny rozložení hlavní a vedlejší deformace a redukce tloušťky materiálu
- » výsledky jsou zobrazeny na 3D modelu jako barevná mapa nebo v řezech

Výstupy z měření

- » hodnoty 3D posunutí
- » hodnoty 3D deformace (Mises, Tresca strain)
- » hodnoty hlavních a vedlejších deformací (Major, Minor strain)
- » řezy
- » změny tloušťky materiálu
- » velikost deformace vůči limitní tvářecí křivce (FLC diagram)
- » grafické a tabulkové výstupní protokoly

Oblasti využití systému ARGUS

- » ověřování a optimalizace simulace tažení plechů
- » optimalizace procesu tváření (FLC diagram)
- » detekce oblastí s kritickou deformací
- » optimalizace lisovacích nástrojů
- » zkoušky materiálu

Systémy ARGUS lze obdobně jako systémy ARAMIS dělit podle rozlišení CCD čipu (senzoru).

2.3.4 Systém PONTOS [32]

PONTOS je mobilní optický systém pro dynamické měření pohybu diskrétních bodů, vibrací a deformací. Systém je často používán při testovacích měřeních v automobilovém a leteckém průmyslu. Pontos je vybaven dvěma kamerami, které jsou synchronizovány a zaznamenávají snímky ve stereo nastavení. V těchto snímcích jsou zachyceny a graficky zobrazeny 3D souřadnice referenčních značek a jejich posunutí v různých deformačních stavech během zatížení objektu.

Přednosti systému

- » bezkontaktní měření 3D souřadnic neomezeného počtu bodů
- » mobilita, flexibilita, malá hmotnost, kompaktní design
- » měření, vizualizace a export 3D polohy a pohybů měřených bodů v různých stavech
- » snímkovací frekvence nezávislá na počtu měřených bodů
- » nezávislost na okolních podmínkách, jako vibrace a změna světla
- » spolupráce se systémem TRITOP při měření velkých dílů

Postup měření

- » systém Pontos je připevněn na stativu před měřeným objektem
- » počet měřených bodů je neomezený a je nezávislý na snímkovací frekvenci
- » měřený objekt je označen optickými retro body, které jsou snímány pomocí dvou kamer s CCD čipem
- » systém z těchto záběrů vypočítá prostorové souřadnice, posunutí a deformace jednotlivých bodů
- » výsledky jako 3D souřadnice, absolutní a relativní pohyb jsou zobrazeny ve výstupním protokolu nebo jsou exportovány do standardních formátů

Výstupy z měření

- » 3D souřadnice diskrétních bodů
- » posunutí, vektory deformace
- » grafický a textový protokol měření (png, mpg, html, ascii)

Oblasti využití systému Pontos

- » 3D měření pohybů, deformací a vibrací
- » ověření koncepčních designových návrhů a počítačových simulací
- » analýza sekvenčních pohybů
- » dynamika spár a přesazení
- » měření relativních pohybů
- » útlum, kmitání a tuhost (NHV)
- » měření v aerodynamickém tunelu
- » zatěžování, tečení a zkoušky stárnutí zahrnující vizko-elastické elementy

Systémy PONTOS lze opět dělit podle rozlišení CCD čipu (senzoru).

3 Experimentální část

3.1 <u>Cíle experimentální části</u>

Téma diplomové práce bylo zvoleno s ohledem na to, že byl Katedrou strojírenské technologie Fakulty strojní - TU v Liberci na začátku akademického roku zakoupen optický systém ARAMIS 2M vyráběný firmou GOM - Optici Measuring Techniques. Jedná se o první práci, na katedře strojírenské technologie, zaměřenou na kinetiku vzniku plastického lomu s pomocí optického měření. Při práci by měly být ověřeny udávané schopnosti systému ARAMIS.

Úkolem experimentální části práce je analyzovat oblast lokalizace vzniku plastické deformace při tváření plechů, která předchází vzniku mezního stavu - vzniku trhliny, a to při jednoosé napjatosti. Jako předmět zkoumání byly použity ploché zkušební vzorky, jejichž deformace byla provedena s pomocí statické zkoušky v tahu na 6-ti typech materiálů různých mechanických vlastností používaných v automobilovém průmyslu.

Průběhy jednotlivých zkoušek byly nasnímány s pomocí optického systému ARAMIS. Ten společně se svým softwarovým vybavením umožňuje, kromě jiných funkcí (viz. teoretická část), zkoumání velikostí a průběhů deformací v jednotlivých fázích zatěžování zkušebního vzorku. Zpracování nasnímaných dat je možné provádět buď ihned po ukončení samotného měření, anebo kdykoliv později s použitím běžného, dostatečně výkonného osobního počítače vybaveného příslušným softwarem.

Cílem práce je:

- » Určení rozložení deformace v okolí trhliny
- » Stanovení rychlosti deformace v průběhu tváření
- » Zjištění velikosti oblasti lokalizace deformace (tzv. krčku)

Měření bylo provedeno v laboratořích katedry strojírenské technologie Fakulty strojní - TU v Liberci.

3.2 <u>Použité materiály</u>

K experimentu bylo použito následujících 5 ocelových plechů a 1 materiál ze slitiny hliníku. Mezi ocelovými plechy jsou zástupci hlubokotažných i vysokopevnostních materiálů

AA 6060 – slitina hliníku značená dle EN 573-3. V následujícím textu je tento materiál označován pod zkratkou **AL**.

CPW 800 – materiál od firmy ThyssenKrupp patřící do skupiny CP ocelí. Jeho minimální $R_e = 800$ MPa. Vykazuje nárůst pevnosti s pomocí BH efektu. V práci je označován pod zkratkou **CPW**.

DP 980 – dvoufázový materiál vyráběný firmou ThyssenKrupp s mezí kluzu $R_e = 980$ MPa. Dále je značen zkratkou **DP**.

HX 180 BD + *Z 100 MBO* – materiál označovaný dle normy EN 10292. Jedná se o žárově pozinkovaný materiál (100 g Zn/m^2)vykazující BH efekt. Jeho mez kluzu je 180 MPa. V textu je uváděn pod zkratkou **HX**.

DC 06 ZE 50/50 BPO – Hlubokotažná ocel značená dle normy EN 10152. Její mez kluzu R_e leží v rozmezí 120 – 190 MPa. V následujícím je uváděn pod zkratkou **PH**.

RAK 40/70 – materiál patřící do skupiny TRIP ocelí vykazující BH efekt. Je vyráběn firmou ThyssenKrupp s mezí kluzu 400 MPa a minimální pevností v tahu 700 MPa a s tažností $A_{50mm} > 26$ %. Dále je označován pod zkratkou **RAK**

3.3 <u>Získání a příprava vzorků</u>

Pro každý z 6-ti zkoumaných materiálů byly pro experimentální část práce získány 3 ploché zkušební vzorky pro jednoosou napjatost (zkoušku tahem), tedy celkem 18 vzorků. Jejich orientace byla ve směru 0°, tudíž shodná se směrem válcování. Všechny vzorky byly vyrobeny tak, aby splňovaly normu ČSN-EN 10002-1.

Vzorky z materiálů CPW, DP a RAK byly vyrobeny frézováním. Vzorky z materiálů AL, HX a PH byly, pro jejich mechanické vlastnosti, vystřiženy střižným nástrojem na výstředníkovém tvářecím lisu LENP 40 (obr. 3.3.1 a 3.3.2).



Obr. 3.3.1: Výstředníkový lis



Obr. 3.3.2: Střižný nástroj

K tomu, aby během samotného experimentu byl optický systém ARAMIS schopen zachytit zkoumaný vzorek a především ho správně vyhodnotit, je odmaštěný povrch vzorku opatřen kontrastním vzorem, tzv. patternem. Jeho vzor uváděný výrobcem je uveden na obr. 3.3.3. Tento pattern musí mít tu vlastnost, že se pohybuje a deformuje současně se zkušebním vzorkem při jeho zatěžování. Musí vykazovat dostatečnou adhezi k povrchu základního materiálu a jeho plasticita musí být minimálně taková, jaká je plasticita zkušebního vzorku. Z tohoto důvodu je pattern i pro jednoduchost nanášení vytvářen dvojicí barev ve spreji. Ty však nesmí být při deformaci vzorku zcela zaschlé, aby pattern nepopraskal. Jako základová je použita bílá barva (obr. 3.3.4), na kterou je po jejím částečném zaschnutí nanesen rastr černé barvy vytvářející na vzorku nepravidelný reliéf (obr. 3.3.5). K Vytvoření vhodného reliéfu černou barvou o přiměřené hustotě a velikosti jednotlivých bodů (teček) je třeba určitý cvik a zkušenost. Nevhodný reliéf není systém ARAMIS schopen zachytit.



Obr. 3.3.3: Vzor patternu uváděný výrobcem systému [34]



Obr. 3.3.4: Zkušební tyčka s nanesenou bílou barvou



Obr. 3.3.5: Zkušební tyčka s naneseným patternem

3.4 Zařízení použité k měření

Diplomová práce

K samotnému experimentu byl pro vyvinutí jednoosého zatížení zkušebních vzorků použit statický trhací zkušební stroj TIRATEST 2300 (obr. 3.4.1) s připojením na počítač, jenž získaná data vyhodnocuje v programu LabNet. Rychlost pohybu čelistí zkušebního stroje byla 10 mm/min.

K optickému měření a zpracování naměřených dat byl použit již výše zmíněný systém ARAMIS (obr. 3.4.1). Ten je složen z:

- » 2 ks. CCD kamer zajišťujících snímání obrazu
- » triggeru slouží pro ovládání kamer a frekvence jejich snímání
- » notebooku DELL se softwarem pro zpracování a vyhodnocení získaných dat
- » propojovacích kabelů

K osvětlení byla použita halogenová lampa.





b) Notebook



c) Trigger

a) Trhací stroj TIRATEST s kamerami systému ARAMIS a osvětlením

Obr. 3.4.1: Sestava použitá k měření

3.5 <u>Seřízení a kalibrace optického systému</u>

3.5.1 Seřízení objektivů

Oba objektivy se musely před měřením a kalibrací seřídit tak, aby byly zaostřeny do stejného místa (obr. 3.5.1). Ostření se provádí natáčením ostřícího mechanismu objektivu. Pro získání větší hloubky ostrosti se natáčením clony objektivu omezuje množství světla dopadajícího na CCD snímač. Ostření a seřízení clon bylo provedeno na vzdálenost 45 cm. Předmět, na který byly objektivy zaostřeny, byl bílý papír textu.



Obr. 3.5.1: Seřízení objektivů

3.5.2 Kalibrace objektivů

Pro optické měření je nezbytná kalibrace kamer (stereovidění), a to zvlášť pro aplikace potřebující přesné rozměrové měření. Požadavkem je to, aby si body (pixely) snímané oběma kamerami odpovídaly svojí polohou a orientací ve 3-D souřadnicovém systému. Ke kalibraci systému ARAMIS se používá speciální kalibrační destička (obr. 3.5.2) umístěná na stativu. Ta obsahuje 17 rozdílných kalibračních bodů, které musí obě kamery při kalibraci "vidět".



Obr. 3.5.2: Kalibrační destička

Prakticky se kalibrace provádí postupným otáčením kalibrační destičky o 90°; 180° a 270°, jejím přibližováním a oddalováním od kamer (v tomto případě ze vzdálenosti 45 cm) a jejím natáčením na levou či pravou kameru dle požadavků softwaru systému. Ke snazší manipulaci s destičkou a zaměření středu destičky slouží přídavný laser. Výsledek kalibrace systém vyhodnotí buď jako vyhovující či nevyhovující dle parametru kalibrační odchylky vzdálenosti pixelů (calibration deviation). Kalibrační protokol je na obr. 3.5.3.

Actual Calibration Info	
General Calibration date	Mon Mar 23 15:12:05 2009
Calibration object Object type Name Calibration scale	Panel (coded) Calibration panel Distance 1: 83.157 mm Distance 2: 83.160 mm
Certification temperature Expansion coefficient Measurement Temperature	20.0 °C 4.00 x 10^-6 1/K 20.0 °C
Calibration settings Camera lenses	20.00 mm
Results Calibration deviation Scale deviation Camera angle Angle variance Height variance Measuring volume	0.028 pixels 0.001 mm 25.5° -36.5 / 33.5° 55 mm 135 / 105 / 85 mm

Obr. 3.5.3: Kalibrační protokol

3.6 Postup a průběh měření

Po založení připraveného zkušebního vzorku do trhacího stroje a jeho nasvícením halogenovou lampou, se musí provést několik kroků, jež předcházejí samotnému optickému měření.

Nejprve je nutno ze záběru kamer zvolit oblast měření. Z toho důvodu, aby software zbytečně nepočítal s oblastmi nepodstatnými pro měření, je měření oblast zpravidla omezená na zkušební vzorek.

Dalším krokem je sejmutí prvního snímku. Ten slouží pro kontrolu kvality naneseného patternu. Pokud by byl reliéf pro měření nevhodný, není systém schopen sledovanou oblast zachytit a měření nebude umožněno.

Následuje nastavení rychlosti snímkování a zajištění synchronizace spuštění měření. Zkušební vzorek upnutý v čelistech trhacího zařízení před a po deformaci je znázorněn na obr. 3.6.1.



a) před deformací
 b) po deformaci
 Obr. 3.6.1: Zkušební vzorek v čelistech trhacího zařízení

3.6.1 Rychlost snímkování

Při optickém měření systémem ARAMIS je zkušební vzorek "natáčen" kamerami. Rychlostí snímkování se rozumí počet vyfocených snímků za 1 sekundu.

Rychlost snímkování byla pro každý z měřených materiálů zvolena jiná z důvodu jejich různých mechanických vlastností. Protože nás při měření zajímá stav těsně před vznikem trhliny a okamžik po vzniku trhliny, je vhodné, aby ke konci měření byla rychlost snímkování co nejvyšší. Naopak na začátku měření není velké množství snímků potřebné z důvodu toho, že se s materiálem "nic neděje". Eliminací počtu snímků díky tzv. progresivnímu snímkování, kdy v průběhu měření měníme jeho rychlost, je umožněno rychlejší zpracovaných dat a úspora místa na pevném disku.

Pro pevnostní materiály byla zvolená rychlost snímkování (6/s) po celou dobu měření konstantní. Pro materiály s velkou tažností bylo zvoleno progresivní snímkování, kdy se v předem stanoveném čase počet snímků zvýšil. V tomto případě z jednoho snímku za sekundu na 6 snímků za sekundu. Okamžik zvýšení rychlosti snímkování byl pro každý materiál určen s pomocí zkušebního vzorku, u kterého byla změřena doba trvání zkoušky, a byl odhadnut okamžik začínajícího vzniku krčku.

Počet snímků změřených rychlostí 1/s a rychlostí 6/s, celkový počet snímků a celková doba trvání zkoušky jsou uvedeny v tabulce č. 2.

motoriál	počet snímků získaných		celkový počet	čas trvání
material	rychlostí 1/s	rychlostí 6/s	snímků	zkoušky [s]
AL	60	105	165	103
CPW	-	228	228	38
DP	-	248	248	41
HX	100	143	243	124
PH	90	149	239	123
RAK	60	115	175	79

Tab. 2. Počet získaných snímků

3.6.2 Synchronizace měření

Po provedení výše uvedených kroků je možno provést samotné měření. Při něm je potřeba zajistit synchronizaci počátku měření tak, aby došlo k současnému spuštění trhacího zařízení a systému ARAMIS.

Ukončení snímkování je nutno provést manuálně. Snímky získané již po přetržení vzorku jsou s výjimkou prvního z nich nepotřebné a s ohledem na urychlení výpočtů je vhodné je vymazat.

3.6.3 Faktory ovlivňující měření

Největší vliv na zdárné získání požadovaných výsledků má u optických metod měření především kalibrace, zaostření a nastavení clon kamer. Dále jsou důležité vhodné osvětlení vzorku a správný pattern nanesený na vzorku.

3.7 Vyhodnocení měření – Mechanické vlastnosti materiálů

Pro porovnání jsou v tab. 3 uvedeny základní mechanické hodnoty zkoušených materiálů, jež byly získány dle normy ČSN-EN 10002-1 současně s optickým měřením na zkušebním stroji TIRATEST 2300. Získaná data byla vyhodnocena v programu LabNet. Velikost deformace byla měřena průtahoměrem, jenž je součástí zkušebního stroje. Počáteční měřená délka byla u všech vzorků $L_0 = 50$ mm. Hodnoty uváděné v tabulce jsou průměrné hodnoty ze všech měřených vzorků pro každý materiál.

Materiál	<i>R</i> _{<i>p0,2</i>} [MPa]	<i>R_m</i> [MPa]	A _{50mm} [%]	A _g [%]
AL	123,0	232,0	32,9	24,5
PH	174,9	294,7	46,2	23,2
HX	203,2	307,8	46,8	22,1
RAK	465,9	761,7	29,8	22,4
DP	1020,3	1200,9	5,5	3,2
CPW	1157,3	1278,0	3,8	2,1

Tab.	3:	Mechanické	hodnoty	materiálů
	۰.		nounory	matomara

Charakteristické závislosti průběhů smluvních napětí na poměrném prodloužení získané ze statických zkoušek v tahu jsou pro všechny zkoušené materiály uvedeny na obr. 3.7.1. Diagramy zkoušky tahem pro jednotlivé materiály jsou uvedeny v příloze č. 2.



Obr. 3.7.1:. Diagram statické zkoušky tahem pro všechny materiály

Získané hodnoty mechanických vlastností a pracovní průběhy ukazují, že materiály AL, PH a HX jsou vhodné ke hlubokému tažení. Materiál RAK je vysokopevnostní materiál vhodný ke hlubokému tažení. Materiály CPW a DP mají malou oblast homogenní deformace a je možno je zařadit mezi ultra-vysokopevnostní materiály s horší tvářitelností.

3.8 Vyhodnocení optického měření

Po optickém měření je nutné získaná data nechat propočítat systémem ARAMIS. Ten pozoruje a porovnává deformace vzorku pomocí vytvořených překrývajících se fazet o velikosti 15 x 15 pixelů.

Pro vyhodnocení je nutné nejprve na zobrazení prvního stavu (snímku) definovat masku. Přibližný odhad masky dovolí softwaru propočítávání fazet pouze ve znázorněné oblasti obrazu.

Poté se na zobrazení prvního stavu (snímku) definují startovací body. To jsou v podstatě fazety, od kterých ve všech stavech začíná výpočet. Startovací body jsou dva a musejí být na modelu vzorku umístěny tak, aby na posledním stavu (po přetržení) byl každý z nich na jedné straně vzorku. V opačném případě by systém zobrazoval ve stavu po

přetržení pouze jednu část vzorku. Výběr masky a startovací body jsou znázorněny na obr. 3.8.1.

Nakonec se pro každý snímek s pomocí image processingu vypočítají 3D souřadnice bodů (fazet) na povrchu měřeného vzorku. Porovnáním vzájemně si odpovídajících bodů na jednotlivých snímcích se vypočítá tvar, posunutí a deformace vzorku.

Takto získané výsledky je možno dále zpracovávat a vyhodnocovat u nich požadované veličiny.



Obr. 3.8.1: Výběr masky a startovacích bodů

3.8.1 Použití interpolace

U materiálů CPW; DP; HX a PH na se na některých snímcích (před vznikem lomu) vyskytly chyby ve zobrazení naměřených výsledků. Ty spočívaly v tom, že na některých snímcích získaných ke konci měření, nebyly zobrazeny všechny požadované fazety. Protože by tyto chybějící nespočítané oblasti při vyhodnocování daných materiálů zabraňovaly vytvoření analýzy rozložení deformace v okolí trhliny (a především ve směru trhliny), byla u nich použita funkce automatické interpolace nezobrazených pixelů. Tato funkce nahradila chybějící nezobrazené oblasti vzorku matematicky dopočtenými hodnotami. Funkce byla využita pouze pro předposlední snímky, ačkoliv může být provedena pro všechny.

Pro názornost je na obr. 3.8.2 uveden snímek těsně před vznikem lomu pro materiál HX před a po interpolaci.



Obr. 3.8.2: Automatická interpolace u materiálu HX

3.8.2 Zavedení potřebných prvků do získaných modelů

V následujícím textu jsou ukázány veškeré hodnocené vlastnosti na obrázcích a grafech jednoho z hodnocených materiálů. Konkrétně jde o materiál **RAK 40/70**. **Obrázky a grafy náležící k ostatním materiálům jsou uvedeny v příloze číslo 3**.

Pro zhodnocení vzniku plastického lomu a určení rozložení deformace v okolí trhliny bylo nutné na povrch zobrazených hodnocených vzorků zavést entity (prvky), jenž slouží k získání požadovaných veličin a diagramů. Jedná se o softwarově vytvořené řezy, body a rozměry sledované oblasti. Ty byly vytvořeny na modelech zkušebních vzorků zorientovaných v souřadném systému [x; y; z].

Pro každý hodnocený materiál jsou na obrázcích uvedeny modely zkušebních vzorků zobrazující hlavní deformací v hlavním směru (major strain) a hlavní deformaci ve vedlejším směru (minor strain) u jednotlivých vzorků těsně před vznikem trhliny. Na zobrazených vzorcích jsou vytvořeny:

» Podélný řez (černý)

» Řez kolmý k trhlině (žlutý)

» Řez ve směru trhliny (červený)

- » Bod v oblasti nejvyšší deformace sledující rychlost deformace (modrý)
- » Velikost oblasti lokalizace deformace (3x znázorněný rozměr krčku)

3.8.3 <u>Mezní stav</u>

Hodnocení vzniku plastického lomu je u zkušebních vzorků prováděno v okamžiku těsně před vznikem mezního stavu, jež je definován jako vznik trhliny. V tomto okamžiku totiž dochází v materiálu k největším deformacím, které jsou zachyceny a vypočteny optickým systémem, a které nás z hlediska hodnocení materiálu nejvíce zajímají. Stavy zachycené systémem ARAMIS po vzniku trhliny (mezního stavu) je možno vymazat.

Na obr. 3.8.3. je pro materiál RAK znázorněn mezní stav - deformace vzorku a řez podélný ke směru vzorku po vzniku trhliny. Rozložení deformace v tomto řezu je znázorněno na obr. 3.8.4.



Obr. 3.8.3: Vizualizace podélného řezu a deformace pro materiál RAK (po vzniku lomu)



Obr. 3.8.4: Rozložení hlavní deformace v podélném směru pro materiál RAK (po vzniku lomu)

3.8.4 Rozložení deformace ve vzorku

Rozložení deformace ve zkušebním vzorku je vyjádřeno závislostí hlavní skutečné deformace (v hlavním i vedlejším směru) po délce vytvořeného řezu, ve kterém je deformace zkoumána. Tvar získané křivky závisí kromě mechanických vlastností materiálu na délce řezu, ze kterého byla získána a na směru tohoto řezu vzhledem k trhlině vznikající při jednoosém zatěžování.

Rozložení deformace bylo zjišťováno ve směru podélném ke vzorku, kolmém k trhlině a ve směru trhliny. Největší deformace materiálu zjištěná v těchto třech řezech by měla být stejná. Mírné odchylky v jejich velikostech jsou způsobeny směrem vedení řezů, jež se neprotínají ve stejném místě vzorku.

Při hodnocení rozložení deformace v oblasti vzniku plastické deformace nás u každého z materiálů zajímá maximální velikost této deformace a šířka nejvíce deformované oblasti.

Velikost deformace nám říká maximální deformační schopnost materiálu.

Šířka deformované oblasti dává představu o tom, jak je deformace koncentrována do místa trhliny. Jedná se o oblast, ve které dochází při jednoosém zatěžování k největšímu zatížení zkoušeného materiálu a k jeho největším deformacím. Tato oblast vzniká po překročení meze pevnosti materiálu, kdy jeho homogenní deformace přechází v deformaci nehomogenní. Dochází ke zužování zkušebního vzorku jak ve směru jeho šířky, tak i ve směru tloušťky (thickness reduction) a vzniku tzv. krčku. U hlubokotažných materiálů je oblast krčku širší než u vysokopevnostních a při jejich zatěžování je potřeba ke vzniku trhliny mnohem delší čas.

3.8.4.1 Rozložení deformace v podélném směru vzorku před vznikem lomu

Na obr. 3.8.5 je znázorněn podélný řez ke vzorku. Rozložení deformace v tomto řezu v okamžiku těsně před vznikem trhliny je znázorněno na obr. 3.8.6.



Obr. 3.8.5: Vizualizace podélného řezu a deformace pro materiál RAK (před vznikem lomu)



Obr. 3.8.6: Rozložení hlavní deformace v podélném směru pro materiál RAK

Grafické porovnání rozložení deformace v podélném řezu pro všechny materiály je provedeno v programu OriginPro a je znázorněno na obr. 3.8.7.



Obr. 3.8.7: Rozložení deformace v podélném směru vzorku pro všechny materiály:

Z rozložení deformací je zřejmé, že u vysokopevnostních materiálů CPW a DP dochází k výraznějším deformacím až v oblasti vznikajícího krčku. U ostatních materiálu vznikají výraznější deformace po celé tyčce a jejich křivky rozložení deformace jsou v diagramu umístěny výš než křivky vysokopevnostních materiálů.

Maximální skutečná (logaritmická) hlavní deformace ve směru 1 i 2, která byla zjištěna u jednotlivých vzorků je uvedena v tabulce č. 4.

materiál	maximální skutečná deformace		
	φ ₁ [-]	φ ₂ [-]	
AL	0,456	-0,223	
RAK	0.494	-0,213	
CPW	0,526	-0,208	
DP	0,549	-0,218	
PH	0,858	-0,589	
HX	0,887	-0,761	

Tab. 4: Maximální změřené deformace:

3.8.4.2 Rozložení deformace ve směru trhliny vzorku před vznikem lomu

Rozložení deformace ve směru trhliny je při hodnocení kinetiky vzniku plastického lomu důležité z hlediska určování místa, ze kterého se začíná trhlina šířit. Počátek jejího vzniku může být buď ve středu oblasti lokalizace deformace, nebo se může šířit od okrajů zkušební tyčky. Místo vzniku trhliny je značně závislé na způsobu přípravy zkušebního vzorku a na druhu testovaného materiálu.

Na obr. 3.8.8 je znázorněn řez ve směru vznikající trhliny vzorku. Rozložení deformace v tomto řezu v okamžiku těsně před vznikem trhliny je znázorněno na obr. 3.8.9.



Obr. 3.8.8: Vizualizace deformace a řezu ve směru trhliny pro materiál RAK



Obr. 3.8.9: Rozložení deformace ve směru trhliny pro materiál RAK (před vznikem lomu)

Materiál RAK vykazuje zaoblené rozložení deformace ve směru trhliny s největší deformací nacházející se uprostřed vzorku. Z toho je možné usuzovat, že se u tohoto materiálu začíná vznikající trhlina šířit právě od středu. Vzorky materiálu RAK byly vyrobeny frézováním a zbroušením hran.

Grafické porovnání rozložení deformace v podélném řezu pro všechny materiály je provedeno v programu OriginPro a je znázorněno na obr. 3.8.10.



Obr. 3.8.10: Rozložení deformace ve směru trhliny pro všechny materiály

Typickými představiteli vzorků, u kterých se začíná trhlina šířit od středu, jsou materiály RAK, HX a PH. Ostatní materiály se vyznačují vznikem trhliny na okrají. U materiálu CPW se začíná trhlina šířit od obou krajů vzorku současně. U materiálu AL se trhlina šíří postupně od jednoho kraje ke druhému. Průběhy rozložení deformací každého z materiálů jsou lépe patrné na samostatných obrázcích uvedených v příloze č. 3.

3.8.5 Velikost oblasti lokalizace deformace (rozměr krčku)

3.8.5.1 Rozměr krčku z rozložení def. ve směru kolmém k trhlině vzorku

Rozložení deformace ve směru kolmém ke vznikající trhlině vzorku je důležité z hlediska přesného určení velikosti oblasti lokalizace deformace. Ta je stanovena dle metodiky normy ISO/DIS 12004-2.

Kolmý řez ke vznikající trhlině vzorku je pro materiál RAK znázorněn na obr. 3.8.11. Rozložení deformace v tomto řezu v okamžiku těsně před vznikem trhliny je znázorněno na obr. 3.8.12.



Obr. 3.8.12: Rozložení deformace ve směru kolmém k trhlině pro materiál RAK

Norma ISO/DIS 12004-2 se zabývá tvorbu FLD diagramu. Při jeho stavbě se z průběhu rozložení deformace v okolí trhliny eliminuje oblast největších deformací tak, aby deformační špičky neovlivňovaly FLD diagram. Velikost této oblasti můžeme považovat za rozměr krčku a vypočteme ji druhou derivací křivky rozložení deformace ve směru kolmém k trhlině dle vzorce (18).

$$\boldsymbol{\varphi}^{"} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\varphi}}{\mathrm{dl}} \quad [-] \tag{18}$$

Křivka rozložení deformace ve směru kolmém k trhlině po druhé derivaci je pro materiál RAK uvedena na obr. 3.8.13. Derivace byla provedena v programu OriginPro.



Obr. 3.8.13. Rozměr krčku pro materiál RAK (výpočtem)

Šířka krčku je určena jako vzdálenost dvou inflexních bodů (největších deformací) na získané křivce. Výhodou tohoto způsobu určování velikosti oblasti lokalizace deformace je přesnost získaného rozměru. Ten je však ovlivněn volbou umístění řezu na zkušební tyčce, ze kterého vychází výpočet. Další nevýhodou je nutnost exportu dat potřebných pro výpočet z programu systému ARAMIS do programu OriginPro.

3.8.5.2 Rozměr krčku získaný měřením v programu systému ARAMIS

Druhou možností stanovení velikosti oblasti nehomogenní deformace je metoda mechanického měření rozměru krčku, kterou umožňuje systém ARAMIS. Na modelech zobrazených zkušebních vzorků byly změřeny tři rozměry krčku a byla vypočtena jejich průměrná hodnota. Výhodou této metody je snadné a okamžité změření žádaných rozměrů. Nevýhodou je jejich subjektivní určování uživatelem podle barevného znázornění velikosti deformace, jež je navíc omezeno sítí na zobrazeném povrchu modelu vzorku, ke které se "měřící" úsečky přichytávají. Na obr. 3.8.14 jsou znázorněný rozměry krčku v okamžiku těsně před vznikem trhliny.



Obr. 3.8.14: Rozměry krčku pro materiál RAK (měřením)

3.8.5.3 Porovnání velikostí lokalizace def. získaných oběma metodami

Z tabulky č. 5 je patrné, že výsledky získané oběma metodami a ani obě metody nelze vzájemně příliš porovnávat. To je dáno již zmíněným subjektivním určováním rozměrů krčku u druhé metody. Výsledky porovnávání lze proto považovat pouze za informativní.

	velikost oblasti lokalizace deformace		
materiál	zjištěná z modelů zkušebních	zjištěná derivací křivky	
	vzorků - ARAMIS [mm]	defromace - OriginPro [mm]	
CPW	3,65	6,64	
DP	3,82	5,11	
AL	4,13	7,04	
HX	7,60	10,80	
PH	7,76	13,02	
RAK	8,86	7,71	

Tab. 5	5: Velikost	oblasti	lokalizace	deformace

3.8.6 <u>Rychlost deformace</u>

Rychlost deformace je vyjádřena jako vzájemná rychlost pohybu mezi dvěma částicemi uvnitř tělesa. Stanovení její maximální hodnoty, pro konkrétní materiál, je důležité z hlediska maximálních tvářecích rychlostí, kterých je možno při reálném tváření dosáhnout.

V každém místě tvářeného výlisku i zkušebního vzorku je rychlost deformace odlišná a je největší v těch místech, kde dochází k největším deformacím.

Deformační rychlost se experimentálně určuje pro zvolený bod na zkušebním vzorku. Výhodou systému ARAMIS je to, že tento bod je možné si vybrat v libovolném okamžiku průběhu zkoušky, tj. na jakémkoliv snímku. Systém je pak schopen dopočítat deformaci tohoto bodu v celém průběhu tváření. Díky možnosti výběru sledovaného bodu na předposledním snímku, těsně před vznikem trhliny, bylo možno umístit jej do oblasti největších deformací – do krčku (obr. 3.8.15). Tam je rychlost deformace největší a nejvíce nás zde zajímá.



Obr. 3.8.15: Vizualizace deformace a sledovaného bodu pro materiál RAK

Pro určení rychlosti deformace je nutné nejprve stanovit časovou závislost sledovaného bodu na deformaci. Ta je znázorněna pro materiál RAK na obr. 3.8.16. Na obr. 3.8.17 je zobrazeno grafické porovnání této závislosti pro všechny materiály.



Obr. 3.8.16: Závislost deformace sledovaného bodu na čase u materiálu RAK



Obr. 3.8.17: Závislost deformace sledovaného bodu na čase pro všechny materiály

Derivací uvedených křivek podle času (19) získáme průběh deformační rychlosti sledovaného bodu.

$$\mathbf{\phi}' = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\varphi}}{\mathrm{d}t} \quad [s^{-1}] \tag{19}$$

Křivka rychlosti deformace (tj. po derivaci) je pro materiál RAK uvedena na obr. 3.8.18. Derivace byla provedena v programu OriginPro.



Obr. 3.8.18: Průběh rychlosti sledovaného bodu u materiálu RAK

U tohoto materiálu je vidět, že maximální hodnota rychlosti deformace má v okamžiku před vznikem trhliny velikost $\varphi'_1 = 0,06 \text{ s}^{-1}$. Z hlediska tváření je důležitý gradient rychlosti, kterým se dostaneme na maximální rychlost deformace. V tomto případě dochází k největším změnám a nárůstu rychlosti zhruba posledních 20 sekund měření.

Pro ostatní materiály je tato křivka po derivaci, kvůli větší přehlednosti, uvedena na samostatných následujících obr. 3.8.19 až 3.8.23. Porovnání získaných hodnot je uvedeno v tabulce č. 6.



Obr. 3.8.20: Průběh rychlosti sledovaného bodu u materiálu CPW



Obr. 3.8.22: Průběh rychlosti sledovaného bodu u materiálu HX


Obr. 3.8.23: Průběh rychlosti sledovaného bodu u materiálu PH

	rychlost deformace					
materiál	maximální $\phi'_1 [s^{-1}]$	doba nárůstu rychlosti [s]				
AL	0,13	12,00				
CPW	0,12	5,00				
DP	0,20	8,00				
HX	0,12	24,00				
PH	0,25	20,00				
RAK	0,06	20,00				

Tab. 6. Rychlost deformace zvoleného bodu

Z tabulky plyne, že nejvíce rychlost deformace narůstá u vysokopevnostních materiálů DP a CPW. Opakem jsou materiály HX a RAK, u kterých rychlost deformace roste nejpomaleji.

3.8.7 Report ARAMIS

S pomocí funkce report ARAMIS lze zobrazit požadované závislosti v jednou obrázku. Zde např. rozložení deformace v podélném řezu a deformaci sledovaného bodu (obr. 3.8.24).



Obr. 3.8.24: Report ARAMIS pro materiál RAK

4 Diskuse výsledků

První sledovanou veličinou v rámci řešení DP bylo rozložení deformace u testovaných materiálů ve směru zkušební tyčky. Pro tento účel byly vytvořeny řezy a v těchto řezech sledovány průběhy deformace φ_1 , φ_2 . Grafické vyjádření průběhů deformace φ_1 pro všechny testované materiály je zachyceno na obr. 3.8.7 (str. 62). Z naměřených výsledků je vidět, že nejvyšší hodnoty deformace φ_1 jsou dosaženy u hlubokotažných materiálů HX a PH. Lomová deformace φ_{1L} u těchto materiálů dosahuje hodnoty 0,88 resp. 0,85. Vzhledem k tomu, že se jedná o materiály určené pro nejnáročnější výlisky, dal se tento výsledek očekávat. Poměrně vysoká lomová deformace byla naměřena i u vysokopevnostních plechů CPW, DP a RAK. Zvláště u materiálů CPW a DP jejichž tažnost A_{50mm} je velmi malá je toto zjištění překvapující. Vysvětlení lze nalézt při sledování průběhu rozložení deformace po celé délce zkušební tyče. U materiálů hlubokotažných HX a PH je vidět vysoká hodnota deformace i mimo oblast lokalizace deformace (homogenní deformace cca 0,25), zatímco u materiálů pevnostních CPW a DP je markantní rozdíl mezi oblastí lokalizace deformace a zbytkem zkušebního vzorku. Tyto oblasti se u vysokopevnostních plechů svojí velikostí deformace liší o řád.

Další sledovanou veličinou bylo rozložení deformace ve směru trhliny. Grafické vyjádření průběhů deformace φ_1 pro všechny testované materiály je zachyceno na obr. 3.8.10 (str. 64). Snahou tohoto měření bylo zjistit z jakého místa se šíří lom. Z průběhů deformace odpovídajících materiálu HX, PH a RAK je patrné, že nejvyšší deformace ve směru trhliny je na středu vzorku. Lze z toho usuzovat, že trhlina (plastický lom) se šířila ze středu zkušebního vzorku. U materiálů CPW, DP a AL se lze domnívat, že se trhlina šíří od okraje vzorku. Tento jev může být zapříčiněn i způsobem opracování zkušebních tyčí, kdy se lom může šířit z okrajových mikrotrhlin vzniklých při zhotovení zkušebních vzorků.

Pro kinetiku vzniku plastického lomu je důležitá i velikost oblasti, kde se lokalizuje deformace těsně před vznikem lomu. Z tohoto důvodu byla měřena šířka oblasti lokalizace deformace. Pro toto měření byly použity dvě metody, tak jak je uvedeno v kap. 3.8.5. Způsob jakým měří a vyhodnocuje systém ARAMIS deformaci neumožňuje nalézt přesné rozhraní oblastí deformace, které nás v tomto případě zajímá. Zjištění šířky pomocí odečtu bodů je čistě subjektivní záležitost obsluhy systému. Zjištění velikosti oblasti lokalizace deformace pomocí derivace průběhu deformace se jeví jako výhodnější metoda.

Při porovnání výsledků získaných oběma metodami (tab. 5 str. 67) je vidět, že se výsledky liší až o 100 %. Pro zjištění šířky oblasti lokalizace deformace doporučuji proto používat metodu derivace průběhu deformace. Z takto získaných hodnot (tab. 5) je patrný trend, kdy s rostoucí plastickou schopností materiálu roste i šířka oblasti lokalizace deformace.

Poslední sledovanou veličinou byla rychlost deformace v oblasti krčku. Způsob získání jednotlivých průběhů rychlostí deformace pro sledované materiály je uveden v kap. 3.8.6. Z naměřených výsledků, které jsou uvedeny v tab. 6 (str. 73) je vidět, že nejvyšší rychlosti deformace bylo dosaženo u materiálu PH a DP. Jedná se o materiály se zcela odlišnými vlastnostmi a lze se domnívat, že tyto výsledky nebudou odpovídat realitě. Z průběhů deformace jednotlivých materiálů je patrné, že nejvyšší nárůst deformace je v oblasti krčku právě u pevnostních materiálů. Dochází u nich k lokalizaci deformace na velmi malé oblasti a není tak možné, aby u těchto materiálů v oblasti krčku vycházela nejnižší deformační rychlost. Tuto chybu měření si vysvětluji nedostatečnou frekvencí snímání dat v okamžiku lomu u pevnostních materiálů. Jedná se o děj v řádu 0,001 s a frekvence 6 Hz je pro zachycení tohoto děje nedostatečná.

5 Závěr

Cílem DP bylo sledovat kinetiku vzniku plastického lomu při jednoosém zatěžování zkušebního vzorku. Tento děj byl sledován pomocí bezkontaktního optického systému ARAMIS na šesti materiálech používaných v automobilovém průmyslu. Pro posouzení možností optického systému ARAMIS byly při testování záměrně voleny materiály se zcela odlišnými vlastnostmi. Jednalo se o první práci na katedře strojírenské technologie FS TU v Liberci, která se tomuto tématu věnuje.

Z výsledků měření a rozboru provedeného v kapitole č. 4 lze konstatovat, že systém ARAMIS umožňuje analyzovat velmi přesně deformaci i v okolí bezprostředně sousedícím s trhlinou. V rámci řešení DP bylo u testovaných materiálů experimentálně zjištěno rozložení deformace po celém vzorku a byla analyzována oblast vzniku lomu. Pro detailní analýzu oblasti lokalizace deformace těsně před vznikem lomu doporučuji při dalších prováděných experimentech systémem ARAMIS používat menší kalibrační objem. Dojde ke zvýšení rozlišovací schopnosti systému, což umožní detailnější analýzu deformace. Nevýhodou tohoto řešení je nemožnost zachytit celý sledovaný objekt (zkušební tyčka pro zkoušku tahem) na pořizovaný snímek. Řešením je provést testy vždy při dvou nastaveních systému ARAMIS. Tímto způsobem získáme jak rozložení deformace po celém vzorku, tak i deformaci pouze v místě lokalizace deformace. Pro analýzu mezního stavu pevnostních plechů, kdy je deformační rychlost těsně před vznikem lomu velmi vysoká doporučuji využívat k záznamu rychlostí kamery. Standardní systém ARAMIS s frekvencí snímkování 6Hz není tyto rychlé děje schopen dostatečně přesně změřit.



6 Použitá literatura

- [1] BARTUNĚK, J.: Stanovení rozvinuté délky polotovaru a určení technologického rozměru nástroje při operaci ohýbání. Bakalářská práce, TU v Liberci, 2006.
- [2] www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/informace.htm: materiály dostupné na internetových stránkách Katedry strojírenské technologie - fakulty strojní, TU v Liberci, únor 2009
- [3] JÍRA, M.: Úspora hmotnosti automobilové karoserie použitím pevnostních plechů. Diplomová práce, TU v Liberci, 1999.
- [4] BAREŠ, K. a kolektiv: Lisování, 1. vydání, Praha : SNTL v Praze, 1971. 542 s.
- [5] Materiály poskytnuté Katedrou strojírenské technologie Fakulty strojní, TU v Liberci, 2008.
- [6] FAJKUSOVÁ, T.; FAJA, V.: Užitné vlastnosti konstrukčních plechů pro tváření za studena. Hutnické listy, 1998, č. 4, s. 7-13
- [7] PETRUŽELA, J.: Nekonvenční metody tváření přednášky, Ostrava : VŠB TU v Ostravě, 25.5. 2007
- [8] www.steeluniversity.org (03/2009)
- [9] BUCHAR, Z.: Diagramy mezních přetvoření díl I. Strojírenská výroba, 1998, roč. 46, č. 1-2, s. 4-9.
- [10] BUCHAR, Z.: Diagramy mezních přetvoření díl II. Strojírenská výroba, 1998, roč. 46, č. 3-4, s. 4-9.
- [11] BUCHAR, Z.: Současné trendy výzkumu zpracování plechů. Strojírenská výroba, roč. 46, č. 5-6, s. 16-21
- [12] Přednášky z předmětu Experimentální metody ve tváření: SOLFRONK, P.: Katedra strojírenské technologie - Fakulta strojní, TU v Liberci, 2008.
- [13] PTÁČEK, L.: Nauka o materiálu I, Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2001, 505 s.
- [14] EVIN, E.; PINKO, P.: Numerická simulácia v plošnom tvárení a určovanie súčinitelia trenia. Transfer inovácií, 2005, č. 5, s.16-23
- [15] VLK, F.; Karosérie motorových vozidel, 1. vydání, Brno : 2000. s. 226 228, ISBN 80-238-5277-9.
- [16] www.techtydenik.cz (02/2009)

- [17] www.volvocar.com/cz (02/2009)
- [18] VYTLAČIL, J.: Vypracování metodiky zjišťování zbytkové deformace výlisku z pevnostních plechů. Diplomová práce, TU v Liberci, 2006
- [19] www.czrso.cz (02/2009)
- [20] cs.wikipedia.org (03/2009)
- [21] www.spisy.uvp.cz
- [22] RENAVIKAR, M. P.: Small strain deformation behavior of Interstitial-Free (IF) steels. Dissertation, University of Pittsburgh, 2003
- [23] www.uss.com (02/2009)
- [24] www.thyssenkrupp-steel.com (02/2009)
- [25] TRANSFER časopis 01/2006
- [26] FREMUNT, P.; PODRÁBSKÝ T.: Konstrukční oceli, 1. vydání, Brno : Akademické nakl. CERM, s.r.o. v Brně, 1996. s. 235, ISBN 80-85867-95-8
- [27] www.worldautosteel.com (02/2009)
- [28] www.ateam.ic.cz/hsla (02/2009)
- [29] steel.keytometal.com (03/2009)
- [30] PAVELKA, K.: Fotogrammetrie, 1. vydání, Plzeň : ZU v Plzni, 2003. 247 s. ISBN 80-7082-972-9
- [31] VOLEK, A.: Metodika ustavení souřadného systému pro optické měřící zařízení Pontos. Diplomová práce, VUT v Brně, 2008
- [32] www.mcae.cz (03/2009)
- [33] www.gom.com (03/2009)
- [34] Manuál systému ARAMIS
- [35] DOUBEK, P.: Výzkum deformačního chování vysokopevnostních plechů při vyšších rychlostech deformace. Disertační práce, TU v Liberci, 2006.
- [36] LUŇÁČEK, M: Vliv velikosti elementu na velikost rozložení deformace v okolí trhliny při tváření vysokopevnostních plechů. Dipl. práce, TU v Liberci, 2006
- [37] Norma ČSN EN 10002-1
- [38] Norma ISO/DIS 12004-2



7 Seznam příloh

- 1 Přehled používaných karosářských ocelí
 - 1.1 válcovaných za studena
 - 2.1 válcovaných za tepla
- 2 Protokol statické zkoušky tahem
 - 2.1 pro materiál AA 6060
 - 2.2 pro materiál CPW 800
 - 2.3 pro materiál DP 980
 - 2.4 pro materiál HX 180 BD + Z 100 MBO
 - 2.5 pro materiál DC 06 ZE 50/50 BPO
 - 2.6 pro materiál RAK 40/70
- 3 Soubor získaných grafů
 - 3.1 pro materiál AA 6060
 - 3.2 pro materiál CPW 800
 - 3.3 pro materiál DP 980
 - 3.4 pro materiál HX 180 BD + Z 100 MBO
 - 3.5 pro materiál DC 06 ZE 50/50 BPO

Typ oceli	Strukturní stavba Zvláštní vlastnosti (příklad použití)	<i>R_{p0,2}∕R_m</i> [MPa]
Oceli vyšší pevnosti IF oceli HX [*]	 Feritická matrice bezu intersticiálně rozpuštěného uhlíku (mikrolegování Mn a P pro zvýšení pevnosti) dobrá tvářitelnost u těžkých výtažků s vyšším stupněm vypínání i hlubokým tažením s požadavkem menší tažné síly a vysokými hodnotami r a n (např. dveře, podběh kola …) 	180/360 ÷ 260/380
Bake Hardening oceli BHZ [*]	 Feritická matrice uhlíkem v tuhém roztoku pro BH efekt, mikrolegování Mn a P pro zpevnění Dobrá tvářitelnost při vypínání a hlubokém tažení (např. ploché části, dveře - vnější strana, víka motorového a zavazadlového prostoru …) 	180/300 ÷ 300/400
Oceli vyšší pevnosti Izotropní oceli i-oceli HSZ [*]	 Feritická matrice s precipitáty, zpevnění na principu tuhého roztoku dobrá tvářitelnost při vypínání s vysokým stupněm protažení a vysokými hodnotami n, dobré izotropní vlastnosti (např. ploché části, dveře - vnější strana, víka motorového a zavazadlového prostoru …) 	220/320 ÷ 300/380
Fosforem legované oceli P – oceli PHZ [*]	 Feritická matrice mikrolegovaná P a Mn (zpevnění na principu tuhého roztoku) Dobrá tvářitelnost při hlubokém tažení s příznivými hodnotami r (např. podběh kola …) 	220/340 ÷ 300/400
Mikrolegovaná ocel MHZ [*]	 Jemná globulární struktura s Ti a/nebo Nb precipitáty (karbonitridy) Představují vyšší pevnostní úroveň (např. nosné strukturní díly) 	260/350 ÷ 420/480
Dvoufázové oceli DP-oceli DP-K [*]	 Převážně s feritickou matricí s ostrůvkově rozloženým martenzitem Dobré izotropní vlastnosti s vyšší mezí pevnosti, s příznivým odpružením, s vysokým zpevněním a s dobrou schopností absorbovat energii, možno požití BH efektu (např. ploché vypínané součásti, nosné díly a def. členy …) 	270/500 ÷ 380/600
Oceli se zbytkovým austenitem TRIP-oceli s transformačně indukovanou plasticitou RA-K [*]	 Převážně feriticko – bainitická struktura se zbytkovým austenitem Dobré izotropní vlastnosti s vyšší pevností se schopností absorbovat energii + BH efekt (např. vypínané hluboké výtažky, pevnostní díly, deformační členy …) 	380/600 ÷ 420/800

1.1 Přehled používaných karosářských ocelí – válcovaných za studena [5]

* Označení viz. katalog firmy Thyssen Krupp Stahl AG

Typ oceli	Strukturní stavba Zvláštní vlastnosti	R _{p0,2} /R _m [MPa]
	(příklad použití) Jemnozrnná feriticko – perlitická struktura	[]
Mikrolegované oceli	Dobrá tvářitelnost za studena a dobrá svařitelnost	315/390 ÷
PAS [*]	(např. ramena náprav, podélníky a příčníky u tuhých rámů …)	700/750
Mikrolegovaná ocel s ferit- bainit- fázemi FB-W [*]	Feriticko – bainitická struktura Dobrá tvářitelnost za studena s dobrou stříhatelností a s vysokou pevností (např. ráfky …)	460/580
Dvoufázové oceli DP-oceli DP-W [*]	Feriticko – martenzitická struktura Dobrá tvářitelnost za studena se vysokým stupněm zpevnění s výraznou mezí kluzu, BH efekt (např. nosné prvky karoserie, prvky pasivní bezpečnosti karoserie …)	350/580
Oceli se zbytkovým austenitem TRIP-oceli s transformačně indukovanou plasticitou RA-W [*]	 Feriticko – bainitická struktura se zbytkovým austenitem Velmi vysoké zpevnění, dobré izotropní vlastnosti ve spojení s výraznou mezí kluzu se schopností absorbovat energii + BH efekt (např., pevnostní díly, deformační členy …) 	480/700
Mikrolegované vícefázové oceli CP-Oceli CP-W [*]	Jemnozrnná struktura s feriticko-bainiticko- martenzitickou strukturou Dobrá tvářitelnost za studena s dobrou svařitelností. Vysoká pevnost s vysokou odolností proti opotřebení, veliké zpevnění, výrazná mez kluzu a BH efekt (např. deformační členy – výztuhy, nárazník …)	680/800 ÷ 720/950
Martenzit fáze MS-W [*]	Martenzitická struktura Dobrá tvářitelnost za studena s dobrou svařitelností, vysoká mez pevnosti a odolnost proti opotřebení (např. deformační členy – výztuhy, nárazník …)	750/1000 ÷ 900/1200

1.2 Přehled používaných karosářských ocelí – válcovaných za tepla [5]

* Označení viz. katalog firmy Thyssen Krupp Stahl AG

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : AA6060 Norma: : ČSN - EN 10002-1 Rozměr vzorku: : (1,1 x 20) mm Rychlost zatěžování: : 10 mm/min. Vypracoval: : Bc. Jiří Bartuněk Datum zkoušky: : 23.3. 2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo	Ag	Rp0.2	Rm	A50mm	Statistická	Ag	Rp0.2	Rm	A50mm
zkoušky	%	MPa	MPa	%	hodnota	%	MPa	MPa	%
1	24.75	124.21	233.17	32.35	Počet zkoušek	4	4	4	4
2	24.25	122.36	231.30	33.41	Průměrná hodnota	24.53	122.97	231.98	32.85
3	25.13	121.96	231.21	34.52	Směrodatná odchýlka	0.50	1.01	0.92	1.46
4	24.01	123.35	232.25	31.11					



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie Oddělení tváření kovů a plastů Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : CPW 800 Norma: : ČSN - EN 10002-1 Rozměr vzorku: : (2 x 12,5) mm Rychlost zatěžování: : 10 mm/min. Vypracoval: : Bc. Jiří Bartuněk Datum zkoušky: : 23.3. 2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Ag %	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A50mm %	Statistická hodnota	Ag %	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A50mm %
1	1.69	1210.37	1270.94	2.11	Počet zkoušek	3	3	3	3
2	1.75	1117.08	1274.95	2.33	Průměrná hodnota	2.10	1157.63	1278.03	3.80
3	2.87	1145.43	1288.21	6.97	Směrodatná odchýlka	0.66	47.82	9.04	2.75



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie Oddělení tváření kovů a plastů Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : DP 980 Norma: : ČSN - EN 10002-1 Rozměr vzorku: : (2 x 12,5) mm Rychlost zatěžování: : 10 mm/min. Vypracoval: : Bc. Jiří Bartuněk Datum zkoušky: : 23.3. 2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Ag %	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A50mm %	Statistická hodnota	Ag %	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A50mm %
1	3.27	1003.19	1188.35	7.61	Počet zkoušek	3	3	3	3
2	3.61	1016.72	1206.57	5.39	Průměrná hodnota	3.20	1020.28	1200.93	5.48
3	2.72	1040.94	1207.88	3.43	Směrodatná odchýlka	0.45	19.13	10.92	2.10



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie Oddělení tváření kovů a plastů Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : HX 180 BD+Z 100 MBO Norma: : ČSN - EN 10002-1 Rozměr vzorku: : (0,8 x 20) mm Rychlost zatěžování: : 10 mm/min. Vypracoval: : Bc. Jiří Bartuněk Datum zkoušky: : 23.3. 2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo	Ag	Rp0.2	Rm	A50mm	Statistická	Ag	Rp0.2	Rm	A50mm
zkoušky	%	MPa	MPa	%	hodnota	%	MPa	MPa	%
1	21.92	204.00	309.52	45.67	Počet zkoušek	3	3	3	3
2	21.89	201.67	306.10	47.31	Průměrná hodnota	22.10	203.15	307.76	46.78
3	22.50	203.76	307.66	47.36	Směrodatná odchýlka	0.34	1.28	1.71	0.96



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie Oddělení tváření kovů a plastů Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : DC 06 ZE 50/50 BPO Norma: : ČSN - EN 10002-1 Rozměr vzorku: : (0,8 x 20) mm Rychlost zatěžování: : 10 mm/min. Vypracoval: : Bc. Jiří Bartuněk Datum zkoušky: : 23.3. 2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo	Ag	Rp0.2	Rm	A50mm	Statistická	Ag	Rp0.2	Rm	A50mm
zkoušky	%	MPa	MPa	%	hodnota	%	MPa	MPa	%
1	23.74	175.96	296.26	47.35	Počet zkoušek	3	3	3	3
2	22.81	173.46	292.43	47.29	Průměrná hodnota	23.19	174.94	294.67	46.20
3	23.02	175.41	295.32	43.97	Směrodatná odchýlka	0.49	1.31	2.00	1.93



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie Oddělení tváření kovů a plastů Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : RAK 40/70 Norma: : ČSN - EN 10002-1 Rozměr vzorku: : (1,5 x 12,5) mm Rychlost zatěžování: : 10 mm/min. Vypracoval: : Bc. Jiří Bartuněk Datum zkoušky: : 23.3. 2009

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Ag %	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A50mm %	Statistická hodnota	Ag %	Rp0.2 MPa	Rm MPa	A50mm %
1	22.18	465.63	767.93	29.71	Počet zkoušek	4	4	4	4
2	22.59	468.00	755.28	29.58	Průměrná hodnota	22.35	465.92	761.67	29.80
3	22.61	464.61	762.44	30.24	Směrodatná odchýlka	0.29	1.46	5.20	0.29
4	22.02	465.42	761.04	29.69			•		•



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie Oddělení tváření kovů a plastů Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

3.1 Soubor získaných grafů pro materiál AA 6060



Vizualizace deformace a všech vytvořených entit pro materiál AL (před vznikem lomu)



Rozložení hlavní deformace v podélném směru pro materiál AL







Rozložení deformace ve směru trhliny pro materiál AL



Závislost deformace sledovaného bodu na čase u materiálu AL



--- Al - rez kolmy k trhline - 2. derivace

Rozměr krčku pro materiál AL (výpočtem)



Report ARAMIS pro materiál AL

3.2 Soubor získaných grafů pro materiál CPW 800



Vizualizace deformace a všech vytvořených entit pro materiál CPW (před vznikem lomu)



Rozložení hlavní deformace v podélném směru pro materiál CPW



Rozložení deformace ve směru kolmém k trhlině pro materiál CPW



Rozložení deformace ve směru trhliny pro materiál CPW



Závislost deformace sledovaného bodu na čase u materiálu CPW



--- CPW - rez kolmy k trhline - 2. derivace

Rozměr krčku pro materiál CPW (výpočtem)



Report ARAMIS pro materiál CPW

3.3 Soubor získaných grafů pro materiál DP 980







Rozložení hlavní deformace v podélném směru pro materiál DP







Rozložení deformace ve směru trhliny pro materiál DP



Závislost deformace sledovaného bodu na čase u materiálu DP



Rozměr krčku pro materiál DP (výpočtem)



Report ARAMIS pro materiál DP









Rozložení hlavní deformace v podélném směru pro materiál HX







Rozložení deformace ve směru trhliny pro materiál HX



Závislost deformace sledovaného bodu na čase u materiálu HX



---HX - rez kolmy k trhline - 2. derivace

Rozměr krčku pro materiál HX (výpočtem)



Report ARAMIS pro materiál HX

3.5 Soubor získaných grafů pro materiál DC 06 ZE 50/50 MBO







Rozložení hlavní deformace v podélném směru pro materiál PH







Rozložení deformace ve směru trhliny pro materiál HX



Závislost deformace sledovaného bodu na čase u materiálu PH



--- PH - rez kolmy k trhline - 2. derivace

Rozměr krčku pro materiál PH (výpočtem)



Report ARAMIS pro material PH
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 povinností 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.

Datum: 5. června 2009

Podpis:

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121-2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must TUL of this fact, in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I complied the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basic of consultation with the head of the bachelor's thesis and a consultant.

Date: 5th June 2009

Signature: