



Vliv materiálů na velikost kritických deformací

Disertační práce

Studijní program: P2303 – Strojírenská technologie
Studijní obor: 2303V002 – Strojírenská technologie
Autor práce: **Ing. Tomáš Jíra**
Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechanical Engineering ■

The Influence of Materials for the Size of Critical Deformations

Dissertation

Study programme: P2303 – Engineering Technology
Study branch: 2303V002 – Engineering Technology
Author: **Ing. Tomáš Jíra**
Supervisor: doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.



Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační 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 disertační práce pro vnitřní potřebu TUL.

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

Disertační práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé disertační práce a konzultantem.

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

Datum:

Podpis:

Poděkování

Rád bych poděkoval mému školiteli doc. Ing. Pavlovi Solfronkovi, Ph.D. za všestrannou podporu a odborné připomínky během mého doktorandského studia.

Dále bych chtěl poděkovat týmu zaměstnanců Škoda Auto, oddělení technického servisu lisoven v čele s Ing. Rolečkem za vytvoření odborného zázemí, které poskytlo plno podporu při vzniku této práce.

Nemohu ani opomenout podporu své ženy Petry, která svojí trpělivostí a velkorysostí přispěla k finalizaci této práce. A v neposlední řadě děkuji svým rodičům za dlouholetou podporu při mých studiích.

Disertační práce vznikla na základě finanční podpory projektu studentské grantové soutěže /SGS 21122/ ze strany Technické univerzity v Liberci v rámci podpory specifického vysokoškolského výzkumu.

Anotace

Disertační práce se zabývá problematikou tváření karosářských výlisků z hlubokotažných ocelí. Vzhledem k náročnosti technologie tváření u těchto dílců nepravidelných tvarů byla pozornost zaměřena na oblasti, které vykazovaly vysoký stupeň přetvoření. Disertační práce je úzce svázána s aktuálními tématy technologie tváření a její problematiky z prostředí sériové výroby karosářských dílců.

Cílem bylo provést výzkum, který by odhalil příčiny vzniku defektů a nestability při tváření a rozšířil tak dosavadní poznatky a znalosti z této oblasti. Použité výzkumné vzorky byly podrobeny sérii technologických a materiálových rozborů s cílem prohloubení vazeb mezi těmito vědními obory.

Výsledky práce poodhalují příčiny a hlediska vzniku nestability rozvoje plastické deformace v oblastech mezních přetvoření. Výchozí poznatky je možno dále rozvíjet a aplikovat při prohlubování znalostí v oboru technologie tváření.

Klíčová slova:technologie tváření, karosářské výlisky, plastická deformace, mezní deformace, materiálový rozbor

Annotation

This thesis deals with the issue of forming of the pressed parts made of high tensile steel. With reference to the demands of forming technologies used on the parts of uneven shapes we focused on the areas which showed the high level of deformation. The thesis refers to the current issues of forming technology and related questions coming from the serial production of these parts.

The aim was to do the research, which would reveal the root causes of the defects and of the instability by forming so it would broaden the existing findings and knowledge of this field. Used research samples were subjected to a series of technological and material analyzes in order to deepen links between these connected disciplines.

The results of the thesis reveal the causes and different perspectives of development of plastic deformation instability in areas of limit strain. Initial findings can be further developed and applied at deepening of the knowledge in the field of forming technology.

Keywords: forming technology, body moldings, plastic deformation, deformation limit, material analysis

Obsah

1. Úvod.....	11
2. Cíle disertační práce.....	12
3. Metodika technologie tváření karosářského dílce	13
3.1 Faktory ovlivňující proces tažení.....	14
3.1.1 Konstrukce nástroje	14
3.1.2 Konstrukce výtažku	15
3.1.3 Tvářený materiál	16
3.1.4 Technologické parametry	19
4. Stavba karoserie.....	19
4.1. Ocelové plechy.....	20
4.1.1 Svařované přístřihy - TWB.....	21
4.1.2 Proměnná tloušťka plechu - TRB	23
4.1.3 Sendvičové materiály.....	24
4.2 Nízkouhlíkové hlubokotažné plechy	25
4.2.1 Oceli uklidněné hliníkem.....	26
4.2.2 IF oceli	26
4.2.3 BH oceli	27
4.3 Alternativní materiály	30
4.3.1 Kompozitní materiály	30
4.3.2 Slitiny hliníku	31
5. Mechanizmy zpevnění hlubokotažných ocelí.....	32
5.1 Deformační zpevnění	33
5.2 Zpevnění tuhého roztoku.....	35
5.3 Zpevnění zjemněním zrna	36
5.4 Precipitační zpevnění	36
6. Diagramy mezních přetvoření	38

6.1	Definice diagramů mezních přetvoření	38
6.2	Experimentální určení diagramů mezních přetvoření	40
6.3	Využití optického systému k měření mezních přetvoření	43
6.3.1	Měření deformací pomocí optického systému ARAMIS	44
6.4	Stanovení stupně mezního přetvoření	46
7.	Úvod do teorie lomů	50
7.1	Klasifikace druhů lomů v kovech	50
7.1.1	Mikroskopické hledisko při klasifikaci lomů	53
7.1.2	Makroskopická hlediska při klasifikaci lomů	54
7.1.3	Křehký lom ocelových částí	55
8.	Cíle experimentální části	57
9.	Nalezení vhodného materiálu pro experiment	58
10.	Ověření mechanických hodnot vybraných materiálů	59
10.1	Statická zkouška tahem	59
10.2	Diskuze výsledných hodnot	61
10.3	Měření drsnosti povrchu	66
10.4	Diskuze výsledných hodnot	67
11.	Sestavení diagramů mezních přetvoření	69
11.1	Analýza mezních přetvoření pomocí systému ARAMIS	69
11.1.1	Výsledné hodnoty	71
11.2	Diskuze výsledných hodnot	75
12.	Sledování rozvoje plastické deformace	77
12.1	Stanovení oblasti mezních přetvoření	77
12.2	Analýza velikosti mezních deformací	80
12.3	Diskuze výsledných hodnot	90
13.	Materiálový rozbor	91
13.1	Rozbor chemického složení	92

13.2	Hodnocení stavby zrn	93
13.3	Rozbor strukturních fází	95
13.3.1	Deskovité precipitáty v povrchové vrstvě materiálu „V“	99
13.4	Diskuze výsledných hodnot.....	101
14.	Návaznost na disertační práci	102
15.	Přínos disertační práce	103
16.	Závěr	104
17.	Seznam Příloh	108
18.	Literatura.....	120
19.	Publikace autora.....	126
20.	Profesní kariéra	128

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Označení	Rozměr	Význam
materiál D	-	materiál vhodný k tváření
materiál V	-	materiál s výskytem trhlin
MT	-	označení jakosti plechu: mírné tažení
ST	-	označení jakosti plechu: střední tažení
HT	-	označení jakosti plechu: hluboké tažení
VT	-	označení jakosti plechu: velmi hluboké tažení
GM	-	automobilový závod General Motors
ULSAB	-	ultra lehká kovová karosérie
NSB	-	nový koncept lehké karoserie
TWB	-	svařované přístřihy
TRB	-	plechy s proměnou tloušťkou
CS	-	skupina běžných ocelí
DS	-	tažné ocelové plechy
DDS	-	hlubokotažné ocelové plechy
EDDS	-	extra hlubokotažné plechy
EDDSPlus	-	super hlubokotažné plechy
ppm	-	jedna miliontina celku
Mn	-	mangan
Si	-	křemík
Al	-	hliník
V	-	vanad
Ti	-	titan
DDQ	-	skupina hlubokotažných ocelí
IF	-	intersticiální ocele
TiCN	-	karbonitrid titanu
NbCN	-	karbonitrid niobu
P	-	fosfor
N	-	dusík
C	-	uhlík
BH	-	bake hardening (vystárnutí)
A_{c3}	°C	teplota austenitizace
R_e	MPa	smluvní mez kluzu
R_m	MPa	smluvní mez pevnosti
A_x	%	tažnost
τ	MPa	Pierlsovo-Nabarrovo napětí
G	MPa	modul pružnosti
l	-	délka dislokační čáry
b	-	Burgesuv vektor

Označení	Rozměr	Význam
π	-	Ludolfovo číslo
Cr	-	chrom
Ni	-	nikl
B	-	bór
σ_x	MPa	hlavní normálové napětí
φ_x	-	logaritmická deformace
m_σ	-	ukazatel stavu napjatosti
φ_{sk}	-	hlavní normálná přetvoření
DMP	-	diagram mezních přetvoření
d	mm	průměr daného přístřihu
m_ϕ	-	ukazatel stavu přetvoření
KMP	-	křivky mezních přetvoření
Obr.	-	obrázek
Zn	-	zinek
ϵ	-	poměrné prodloužení
F	N	zatěžující síla
$R_{p0,2}$	MPa	smluvní mez kluzu
n	-	exponent deformační zpevnění
r	-	plošná anizotropie
KUT	-	komplexní ukazatel tvařitelnosti
x_s	-	střední hodnoty
Ra	μm	střední aritmetická hodnota drsnosti
RPC	cm^{-1}	počet výstupků
Rz	μm	maximální hodnota drsnosti
Lo	mm	původní rozměr
Lx	mm	konečný rozměr
Lk	mm	kritická hloubka tahu
Lkm	mm	mezní hloubka tahu
b	mm	šířka rondelu
φ_{xm}	-	mezní deformace
O ₂	-	kyslík
Mo	-	molybden
EDX	-	energetická disperzní metoda
TiN	-	nitrid titanu
TiS	-	sulfid titanu
Ti ₄ C ₂ S ₂	-	sulfidy (karbidy) titanu
Al ₂ O ₃	-	oxid hlinitý
Au	-	zlato

Označení	Rozměr	Význam
Fe	-	železo
Zn	-	zinek

1. Úvod

Motivem pro vypracování předkládané disertační práce v oblasti tváření nepravidelných výlisků karosářského typu byl výskyt problémů při lisování povrchového dílu „Rám Combi Pravý“ ve firmě ŠKODA AUTO Mladá Boleslav a.s. Z pohledu výroby dílu se jedná o jeden z tvarově i rozměrově nejsložitějších výlisků, kde jsou lokálně dosahovány značné deformace. Praktické zkušenosti při lisování tohoto výlisku ukazují značnou nestabilitu procesu výroby z pohledu vzniku nepřipustných lokálních ztenčení popř. vzniku trhliny.

Bylo vyzorováno, že při nasazení dvou stejných svitků o identické jakosti a od stejného dodavatele, byl v jednom případě průběh lisování bez vážných problémů. Při nasazení druhého svitku, za podmínek zachování stejných technologických parametrů lisování, vykazoval zmíněný díl nežádoucí vady (ztenčení, praskliny). Na základě těchto poznatků byl tedy formulován požadavek na vypracování disertační práce v oblasti výzkumu mezních deformací hlubokotažných materiálů a predikce možných strukturních příčin nestabilního chování jednotlivých testovaných materiálů.

Pro dosažení cílů disertační práce byly voleny již klasické metody materiálových analýz, jako jsou výsledky získané pomocí statické zkoušky tahem, měření drsnosti, zjištění mezních stavů deformace, tak i nové přístupy kombinující výzkum deformačního chování materiálu s materiálovým inženýrstvím (strukturní analýzou) a fraktografií. Vzhledem k dlouholeté spolupráci firmy ŠKODA AUTO a.s. a Technické Univerzity v Liberci v oblasti tváření kovů byla daná problematika řešena ve vzájemné spolupráci s cílem odhalení příčiny vzniku tohoto problému.

2. Cíle disertační práce

Předkládaná disertační práce zasahuje svým obsahem do oblasti tváření karosářských dílců. Jádro výzkumné části disertační práce je zaměřeno na řešení problematiky tváření hlubokotažných výlisků nepravidelného tvaru, jako je např. (blatník, kapota, rám ...). Tyto povrchové dílce jsou typické tím, že při jejich výrobě dochází velmi často k dosažení oblastí mezní nestability. Projevem takto dosažených mezních stavů může být dále vznik lokálního ztenčení příp. trhlin.

Motivem vzniku dále popsaného výzkumu byl vznik trhlin na rámu vozu Fabia Combi a doposud neobjasněná příčina jejich výskytu. K analýze tvařitelnosti a vzniku plastické nestability byly použity standartní série testů, které se k těmto účelům v prostřední sériových lisoven běžně užívají. Bohužel tyto konvenční metody nedokázaly dlouhodobě odhalit příčinu vzniku nestability na výlisku, proto byla dále výzkumná část práce rozšířená o poznatky z oboru materiálového inženýrství.

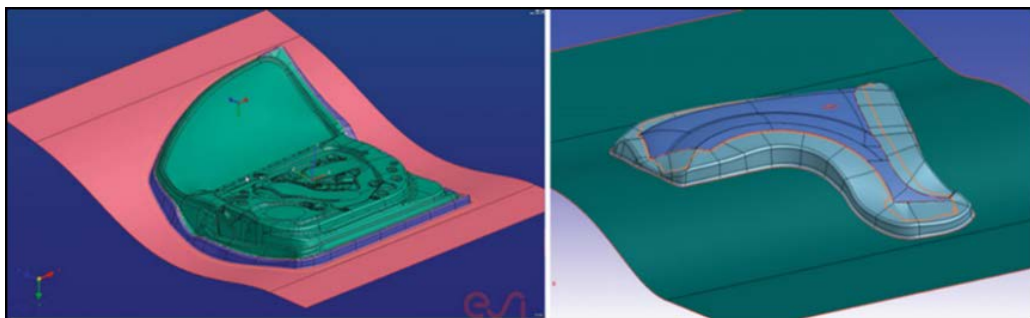
Cíle disertační práce je možné shrnout do následujících bodů:

- ověřit mechanické vlastnosti materiálu s cílem potvrzení deklarovaných mechanických hodnot pro tváření za studena
- analyzovat tvařitelnost testovaných materiálu s cílem stanovení mezních hodnot tvařitelnosti
- určit oblast mezních deformací s cílem určení velikosti maximálních mezních deformací testovaného materiálu
- provést a popsat materiálový rozbor u zkoušených ocelí s cílem objasnění vlivu struktury materiálu na rozvoj plastické deformace
- stanovit a charakterizovat jasné ukazatele příčiny vzniku trhlin na zkoušeném materiálu z důvodu stanovení opatření, vedoucí k zamezení opakovanému výskytu trhlin

Tyto dílčí cíle jsou dále popsány v experimentální části této práce a směřují tak k objasnění a identifikování příčiny vzniku lokální nestability u karosářských výlisků.

3. Metodika technologie tváření karosářského dílce

Tvářením karosářského výlisku je myšlena technologie tažení, která spadá do kategorie plošného tváření. Jedná se obecně o technologickou operaci plechu, která probíhá za studena, kdy z rovinných přístřihů vzniknou prostorové součástky nerozvinutelných tvarů (výlisky). Nejjednodušší způsob tažení plechu je u rotačních dílů, kde použité výpočtové vztahy mohou být základem pro výrobu nepravidelných tvarů výtažků, které jsou názorně zobrazeny na obrázku Obr. 1. Podle tvaru konečného výlisku se tažení liší na mělké a hluboké, dále na tažení bez a se ztenčením stěny, tažení rotačních (kruhových) a nerotačních tvarů, nebo nepravidelných tvarů, které jsou typické pro automobilový průmysl. Tažení se rovněž člení na prosté tažení, tažení se ztenčením stěny, zpětné tažení, žlábkování, rozšiřování a lemování, zužování, přetahování, napínání a speciální způsoby[1].

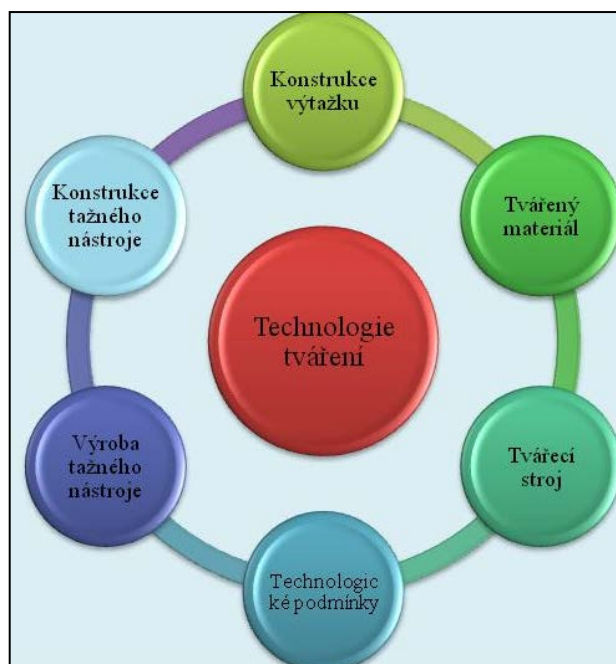


Obr. 1 Příklad tažení výlisku (výtažku) nepravidelného tvaru [3]

Tažení je velmi rozšířeným způsobem zpracování plechu, který umožňuje získat součástky přesných tvarů s mnohými přednostmi před jinými technologiemi výroby. Základní faktory mající vliv na konečnou kvalitu finálního výlisku jsou znázorněny na obrázku Obr. 2. Technologie lisování plechů patří mezi jedny z nejproduktivnějších technologií plošného tváření kovů. Jejich stoupající význam v moderní průmyslové výrobě souvisí s tím, že umožňují zhotovení součástí nejrůznějších tvarů, rovinných nebo prostorových, jakož i součástí nejrůznějších velikostí. Výhodou těchto součástí je kvalitní povrch zhotovovaného dílu, vysoká přesnost předepsaných rozměrů a poměrně vysoká tuhost při minimální hmotnosti součásti. Vzhledem k tomu, že tváření plechu probíhá většinou bez předchozího ohřevu, je kvalita povrchu finálního výrobku prakticky stejná jako kvalita povrchu výchozího materiálu. Důsledkem tváření za studena je také zvýšení meze kluzu a meze pevnosti v závislosti nastupní přetvoření[2].

3.1 Faktory ovlivňující proces tažení

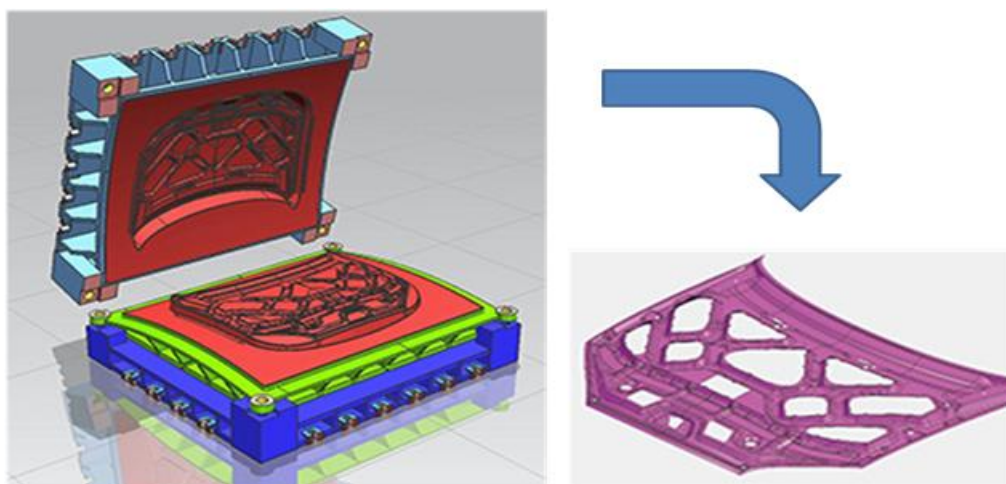
Technologie tváření kovů je ovlivněna různými druhy výrobních parametrů, které se řídí všeobecnými podmínkami splňující všechny faktory výroby konečných výtažků. Na obrázku Obr. 2 jsou vidět vybrané aspekty vstupující do systému technologie tváření.



Obr. 2 Faktory při procesu tažení

3.1.1 Konstrukce nástroje

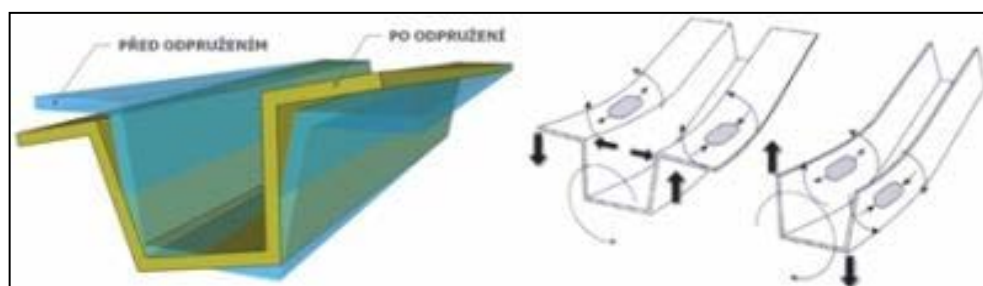
Hlavní funkční části nástroje tvoří tažník a tažnice, resp. přídržovač, který zabraňuje zvlnění plechu při tažení. Příklad sestavy lisovacího nářadí pro vnitřní kapotu je znázorněn na obrázku Obr. 3. Podle charakteru vykonávané operace lze tažné nástroje rozdělit na nástroje pro první tah a na nástroje pro další tahy. Přitom v obou skupinách mohou být tažné nástroje jednoduché, sloučené, nebo speciální. Podle druhu lisu mohou být tažné nástroje určené pro lisy jednočinné, dvojčinné, trojčinné a pro postupové. Podle druhu a typu přídržovače se tažné nástroje dělí na nástroje bez přídržovače a nástroje s přídržovačem, a to pružinovým, pryžovým, pneumatickým a hydraulickým[4].



Obr. 3 Příklad lisovacího nářadí pro díl: kapota vnitřní [5]

3.1.2 Konstrukce výtažku

Rozměrová přesnost výtažku je ovlivňována určitými nedokonalostmi procesu. Mezi nejčastější se řadí tloušťka stěny, která je v přechodové části ze dna do pláště nejmenší, naopak na horním okraji výtažku je největší. Při vysokých stupních tažení se mohou rozdíly vůči výchozí tloušťce pohybovat až v rozmezí 20 a 30% v obou směrech. Rovněž plášť výtažku bývá mírně kuželovitý (1 - 3°) v důsledku tažné mezery a odpružení, zejména u nízkých dílů ze silnějšího plechoviz obrázek Obr. 4. Dále poloměry zaoblění přechodu mezi dnem a pláštěm, příp. mezi pláštěm a přírubou na horním okraji výtažku, je nutné přizpůsobit procesu tažení. Okraj výtažku bývá často nerovný vlivem nestejně tloušťky plechu, nestejného přidržení okraje při tažení a anizotropie plechu a je potřeba tuto část odštípnout. Potřeba je také pamatovat na zpevněný materiál, zpravidla na okraji výtažku [6].



Obr. 4 Vliv odpružení na konečný tvar výlisku [7]

Uvedené nedokonalosti je možné podstatně omezit např. jemnějším odstupňováním tahu, kalibrováním, kombinací tažení a protlačování, což však znamená dražší nástroj a přídatné operace. Při dostatečně malé výšce výtažku je možné použít

velmi jednoduchého nástroje bez přidržovače. Zaoblení přechodu mezi dnem a pláštěm, pláštěm a přírubou se nesmí zmenšovat pod mez potřebnou k úspěšnému tažení. Přesnost výtažku rovněž závisí na kvalitě tvářecího nástroje, dodržení technologických podmínek, hodnot mechanických vlastností a tloušťce použitého materiálu. Přitom platí, že s narůstající tloušťkou a tvařitelností lze docílit přesnějších rozměrů výtažku. Tvar výtažku má největší vliv na potřebný počet tahů, a tím i na výrobní cenu. Nejvýhodnější je proto výtažek tvaru válce se dnem kolmým k jeho ose, bez příruby. Jakékoliv odchylky znamenají vždy zdražení nástroje a často zvýšení počtu tahů [6].

3.1.3 Tvářený materiál

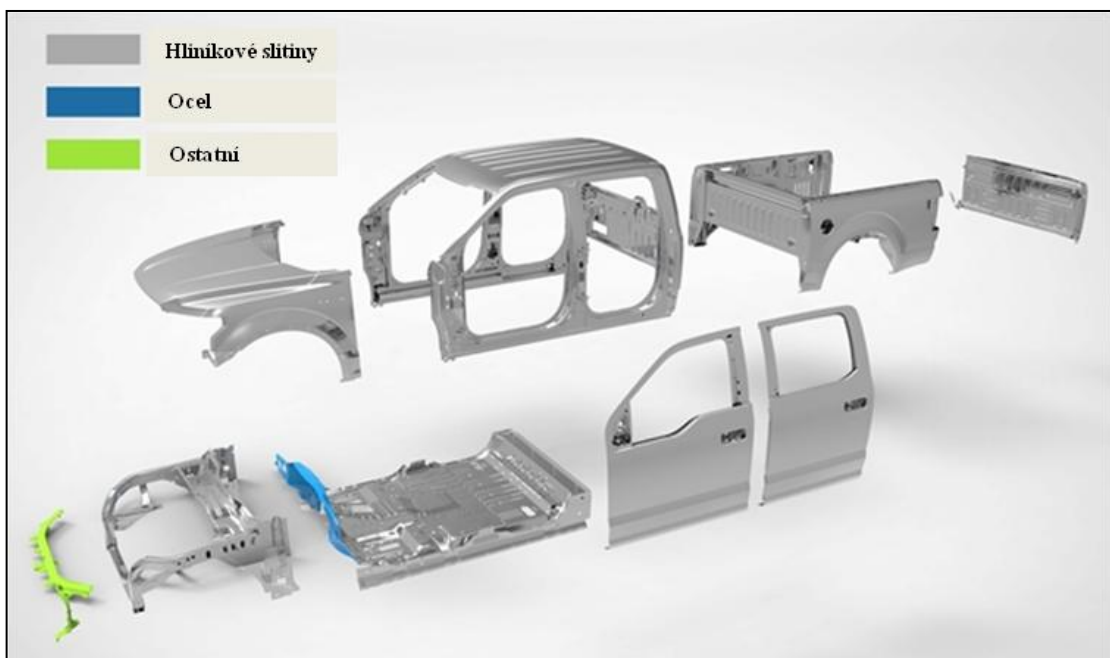
Materiál je schopen se plasticky deformovat bez porušení a bez ztráty lokální stability na základě chemického složení, vnitřní struktury, velikosti a tvaru zrna. Nedílnou součástí jsou hodnoty získané při tahové zkoušce a zjištěné ukazatele jako mez kluzu, mez pevnosti a jejich vzájemný poměr, tažnost, kontrakce a hlavně hodnoty exponentu zpevnění a součinitele normálové anizotropie. Hodnoty plošné anizotropie ukazují na chování plechů [8].

Obecně se rozlišují z hlediska tvařitelnosti čtyři skupiny plechů, a to jakost vhodná k mírnému tažení (MT), jakost vhodná ke střednímu tažení (ST), jakost vhodná k hlubokému tažení (HT) a jakost vhodná k velmi hlubokému tažení (VT). Zařazení jednotlivých druhů plechů do těchto skupin se uskutečňuje pomocí mechanických vlastností a chemického složení. Přesněji zatřídit lze pomocí dalších kritérií tvařitelnosti, jakými jsou metalografická analýza, koeficient plošné a normálové anizotropie, exponent zpevnění, mezní křivky deformace apod. [1].

Tažení hliníku a jeho slitin

Využití hliníku a jeho slitin je velmi rozšířené ve všech průmyslových odvětvích. Jako příklad využití hliníkových slitin v automobilovém průmyslu je karoserie vozu Ford na obrázku Obr. 5. Pro jednoduché tvary výlisku a menší redukce se vystačí s běžnými způsoby tažení. Při větších redukcích nebo několika tažných operacích je již potřeba seznámit se specifickými odlišnostmi tažení. Přitom se hliníkové slitiny dělí na tepelně nezpracovatelné a tepelně zpracovatelné. Tepelně nezpracovatelné zahrnuje slitiny, jejichž tvrdost a pevnost je dána jejich složením. Naopak mezi tepelně zpracovatelné se řadí slitiny, jejichž vlastnosti se dají měnit

tepelným zpracováním, tzv. vytvrzováním. Nevyžíhaný plech lze k tažení použít, pouze pokud není tváření při tažení příliš velké. V opačném případě se vyžaduje vyžíhaný stav[10]. Z velké části se využívá vyžíhaný výchozí polotovar. Slitiny hliníku lze tepelně vytvrdit kde je nutné zahřát materiál, následně rychle ochladit. Tímto dojde k urychlenému vytvrzení (stárnutí), kdy dochází ke zvýšení pevnosti a tvrdosti slitiny. Pokud vyžadujeme zpomalení stárnečného procesu, lze ho zpomalit, příp. na omezenou dobu zastavit, ponecháním ochlazené slitiny při nízké teplotě, během níž k vytvrzení nedojde. Tepelně zpracovaný materiál ve vyžíhaném stavu se zpevňuje tvářením za studena, obdobným způsobem jako slitiny tepelně nezpracovatelné. Přitom vytvrzování není u všech slitin stejné. Někdy trvá dokonce několik hodin, kdy je možné provádět tažení. Navíc se tím celý proces urychlí. Není totiž potřeba výrobky vkládat do chlazených zásobníků. Slitiny hliníku mají po ochlazení vysokou tvářecí schopnost, kterou stárnutím a vytvrzením ztrácí[11].



Obr. 5 Příklad karoserie z hliníkových slitin: Ford [9]

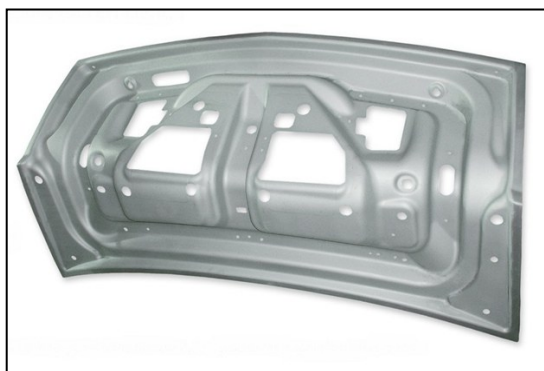
Tažidla pro tažení hliníku je možné zhotovit z běžné šedé litiny, z legované litiny, z legovaných a nelegovaných ocelí nebo pomocí vložek ze slinutého karbidu. Šedou litinu lze použít u velkých výtažků při výrobě nástrojů díky nízké ceně. Je však potřeba pamatovat na skutečnost, že povrch výtažku bude mít horší kvalitu. V případě potřeby vyšší jakosti povrchu výtažku a zároveň udržitelné ceně tažidla na nízké úrovni, lze použít legovanou litinu. Z hlediska vysokých nároků a z hlediska schopnosti

zpracování tvrdších slitin hliníku splňuje tyto podmínky kalená a broušená nástrojová ocel. Pokud je potřeba zajistit materiál nástrojů, který co nejvíce odolává opotřebení, je vhodné použít vložky ze slinutého karbidu[17].

Tažení hořčíku

Hořčík je charakteristický svoji nejnižší hustotou z lehkých kovů. Navíc má široké použití z hlediska praktičnosti a hospodárnosti. Využívá se zejména v letectví, vyrábí se z něj výrobky, které se často přenáší a přemísťují a kde je výhodné snížení setrvačnosti. Hořčík lze dobře tvářit pouze při zvýšené teplotě[15]. V praxi lze lisovat výrobky na jednu operaci ve větším množství, než tomu je u hliníkových nebo ocelových výtazků. V těchto případech je zapotřebí dvou a více tažných operací. Rovněž přídržný tlak vyžaduje hořčík ze všech kovů nejnižší[14]. Obvykle lze táhnout hořčíkové slitiny do 1,5 násobku až 2 násobku průměru výtazku, což odpovídá redukci $62 \div 66\%$. Přitom tlustší plechy se táhnou lépe. Jako příklad vývoje využití hořčíkových slitin v automobilovém průmyslu, je zde uveden díl kapoty vnitřní na obrázku Obr. 6.

Optimální je zpracování hořčíku o tloušťce $0,5 \div 15$ mm. U tažidel je potřeba upravit zahřívání a přihlížet při jejich výrobě k roztažnosti teplem na rozdíl od zhotovení běžných tažidel. Tažník, tažnice a přídržovač se vyrábí obvykle z nekalitelné žáruvzdorné oceli. Při menším počtu výtazků stačí běžná nekalitelná ocel. Optimální teplota tažení hořčíku je asi 300 °C. Při této teplotě dosáhne nejnižší pevnost a nejmenší odpor vůči tažení.



Obr. 6 Využití hořčíkové slitiny: vnitřní plech zadních dveří vozu GM [13]

V přechodové části výtazku se udržuje nejvyšší pevnost a zabraňuje se jeho nadměrnému zeslabování nebo i trhání. Tažná rychlost musí být velice nízká. Jejím zvyšováním klesá téměř úměrně schopnost kovu ke tváření. Proto jsou pro hluboké tažení nejvhodnější hydraulické lisy s rychlostí beranu kolem 250 mm/min. Přitom je

nutné při konstrukci tažidel pamatovat, že součinitel roztažnosti hořčkových slitin je větší než u oceli nebo hliníku. Proto všechny rozměry tažidla, které ovlivňují velikost výtažku, musí být násobeny součinitelem podle teploty, při které má tažidlo pracovat[17].

3.1.4 Technologické parametry

K předcházení vad a problémů při výrobě je potřeba dodržovat určité technologické zásady. Přestože současná doba vyžaduje nejen funkční, ale i estetické a designové výrobky, jež vychází ze složitějšího navrhovaného a výrobního procesu, je žádoucí řídit se následujícími zásadami: výška výtažku má být co nejmenší, upřednostňovat výtažky válcového tvaru s rovným, jednoduchým dnem, kolmým na osu výtažku. U hranatých výtažků zaoblit co nejvíce přechodovou část mezi dnem a pláštěm, příp. přírubou. Přírubu u výtažku použít pouze v nezbytných případech, je-li to nevyhnutelné a snažit se je minimalizovat. Rozměry a zejména tloušťku stěny výtažku volit s co největšími tolerancemi, aby se nemusely kalibrovat. Volit vhodný materiál s ohledem na funkci výtažku a podle požadavku na co nejlepší tažné vlastnosti[4].

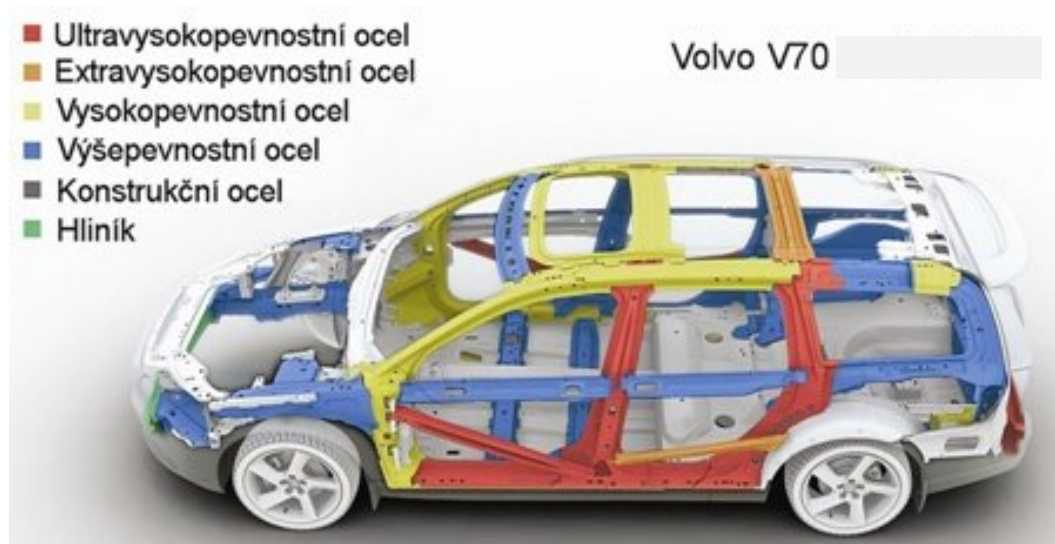
4. Stavba karoserie

Vývoj karoserie by se neobešel bez vývoje a získávání nových či modifikovaných materiálů, které by se uplatnily při stavbě karoserie. Nejběžnějším materiálem použitým pro stavbu karoserie je ocel(Obr. 7.), ale objevují se i jiné materiály, zejména slitiny hliníku. Objevují se i také slitiny hořčíku, plasty nebo různé typy kompozitu viz kapitola 4.3.1

V současné době se stále v největší míře uplatňuje při stavbě karoserie běžných vozů ocelové materiály. Mezi důvody tak malého uplatnění alternativních materiálů patří především jejich vyšší cena v porovnání s ocelí, problémy s technologickou zpracovatelností některých materiálů či nutností užití speciální konstrukce karoserie atd. Výše vyjmenované důvody pak často vedou ke zvýšení celkových nákladů na výrobu automobilu, které v konečném součtu nedokážou vyvážit snížení hmotnosti s ní spojené nižší náklady na provoz vozidla. Užití alternativních materiálů je tak prozatím odkázáno

na speciální aplikace jako jsou sportovní nebo luxusní vozidla, kde cena není tím určujícím faktorem pro úspěšnost na trhu[20].

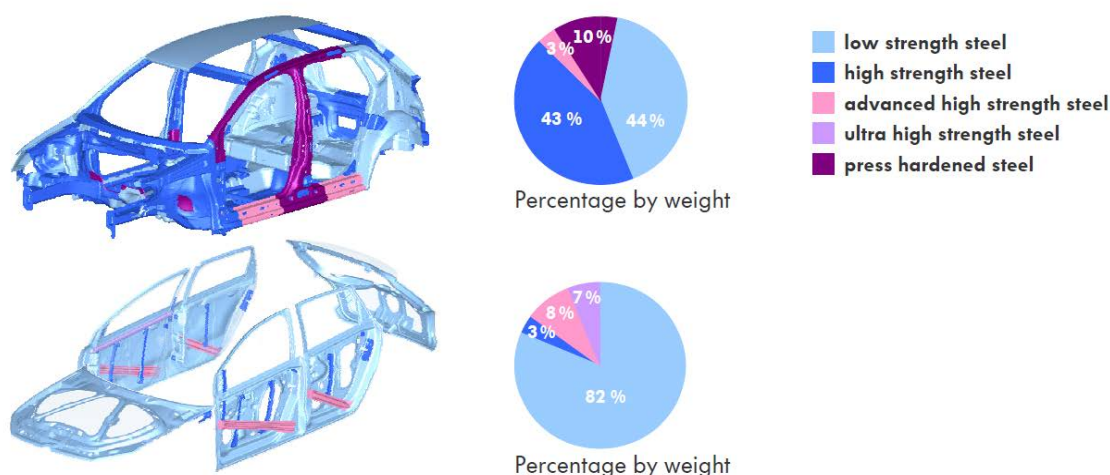
Ocelové materiály těží především ze své rozšířenosti, poměrně nízké ceně a v neposlední řadě i k poměrně dobře zvládnuté technologii zpracování tenkého ocelového plechu. Neustálý vývoj jednotlivých producentů tenkých ocelových plechů vedl k dobrému zvládnutí korozní odolnosti a vyvinutí početného sortimentu ocelí[22].



Obr. 7 Koncept karosérie vozu Volvo V70 [26]

4.1. Ocelové plechy

Pro stavbu nejpoužívanějšího typu konstrukce karoserie se využívá nejčastěji tenký ocelový plech různého chemického složení. Na efektivní využití materiálových vlastností daného materiálu umožňují různé typy tenkých ocelových plechů, které jsou zde znázorněny na konceptu karoserie vozu Volkswagen Polo na obrázku Obr. 8.



Obr. 8 Ocelové plechy použité při stavbě karosérie[18]

K nejpoužívanějším tenkým plechům patří plechy o konstantní tloušťce, u kterých máme možnost specifickým způsobem výroby se specifickým chemickým složením změnit fyzikálně-mechanické vlastnosti, které vyhovují konkrétnímu nasazení, resp. tzv. „ušít tenký plech na míru“. Při vývoji na projektech ultralehkých karoserií (ULSAB, NSB atd.) se objevují i některé specifické „konstrukce“ tenkých plechů využívající kombinaci materiálových, či geometrických vlastností, které jsou na míru sestavené pro konkrétní díl. Kombinace geometrických a fyzikálně-mechanických vlastností materiálů vede k téměř ideálnímu využití jejich vlastností[19].

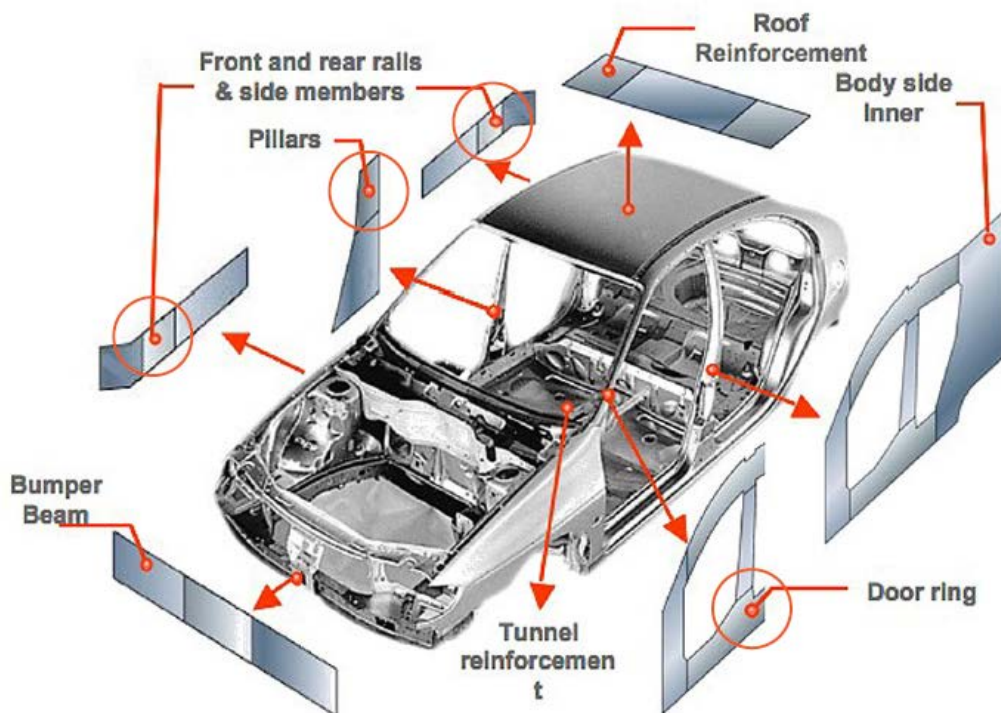
Mezi nejznámější aplikace patří:

1. Svařované přístřihy - TWB
2. Proměnná tloušťka plechu - TRB
3. Sendvičové materiály

4.1.1 Svařované přístřihy - TWB

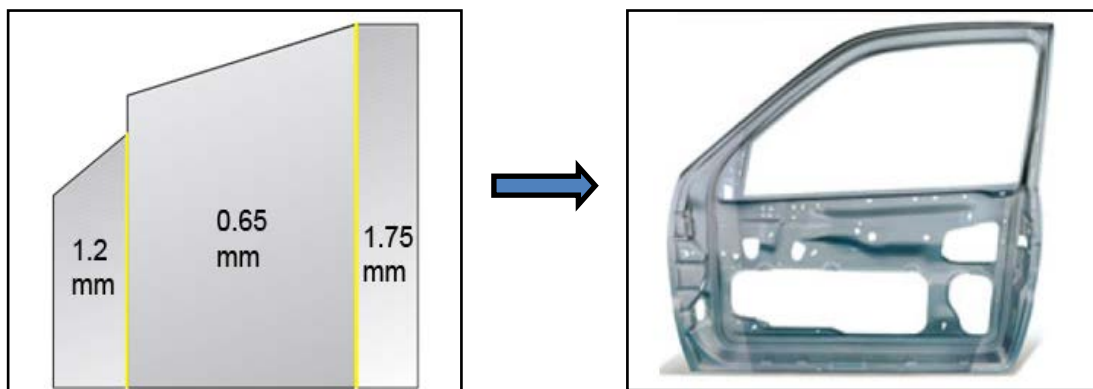
Použití svařovaných přístřihů v sériové výrobě bylo použito již někdy v polovině osmdesátých let minulého století. Na současné rozšíření mělo hlavní vliv odstranění počátečních problémů s kvalitou svarů. Svařované přístřihy známé pod označením *tailored blanks* (přístřihy šité na míru) se skládají ze dvou či několika částí, které se

mohou od sebe lišit svou tloušťkou, mechanickými vlastnostmi, jakostí, povrchovými vlastnostmi atd. (Obr. 9).



Obr. 9 Použití svařovaných přístřihů[24]

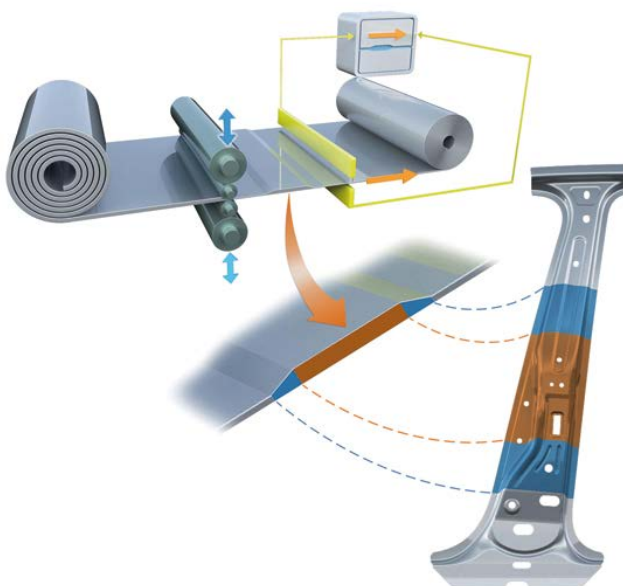
Používání podobných přístřihů, které jsou v současnosti nejčastěji svařované laserovým, vysokofrekvenčním či elektronovým paprskem, umožňuje optimálně využít vlastnosti spojovaných materiálů v rámci jednoho dílu, který dává možnost výroby dílu s nižší hmotností při dosažení vyšší tuhosti. Na příklad u vnitřních dveří na obrázku Obr. 10 je zobrazena možnost využití svařovaného přístřihu. Výlisek není opatřen jedinou výztuhou, ale vlivem příznivé konstrukce se tuhost zvýšila o 40%. Vývoj svařovaných přístřihů stále pokračuje směrem ke zlepšení svarového spoje, zajištění jeho dobrých plastických vlastností a v neposlední řadě snížení vysokých výrobních nákladů[25].



Obr. 10 Příklad svařovaného přístřihu[25]

4.1.2 Proměnná tloušťka plechu - TRB

Technologie proměnné tloušťky plechů se velmi podobá technologii svařovaných přístřihů. Jedná se řízený způsob válcování s cílem získat proměnnou tloušťku plechu ve směru válcování. Existuje i možnost kombinace směrů válcování a získání tak plně 3D profilovaného plechu pro optimální využití vlastností materiálu. Plynulé přechody tloušťky plechu usnadňují vlastní proces lisování oproti svařovaným přístřihům a zároveň odpadá i teplem ovlivněná oblast, která vykazuje rozdílné fyzikálně-mechanické vlastnosti, jako například tvrdost[23]. Příklad vývoje použití této technologie je výztuha B-Sloupku na obrázku Obr. 11.

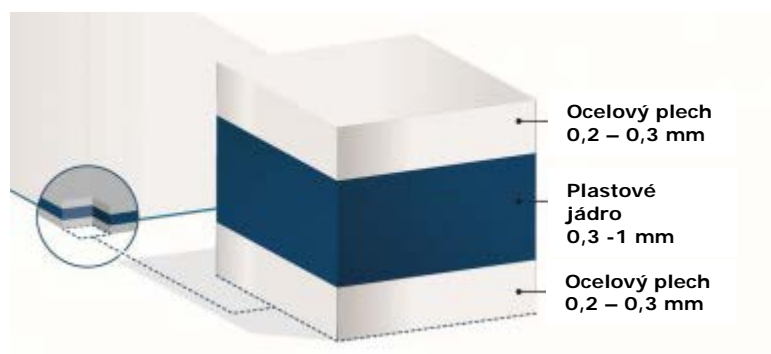


Obr. 11 Ukázka flexibilního válcování plechů[26]

4.1.3 Sendvičové materiály

Sendvičové materiály spojují vlastnosti různých materiálů v různé formě pro získání výsledného složeného materiálu o specifických vlastnostech, které mnohdy převyšují vlastnosti jedno druhového materiálu resp. tenkého plechu. Sendvič se skládá z výplňového jádra a z nosných vnějších tenkých plechů. Obecnou konstrukci sendvičového materiálu můžeme zřetelně vidět na obrázku Obr. 12. V těchto materiálových strukturách se využívají rozličné druhy materiálů, mezi ty nejznámější patří ocelové či z hliníkových slitin vyrobené tenké vnější vrstvy a pro jádra se využívají např. různé tloušťky plastových fólií, papír, dřevěná balza, polymerní či kovové pěny atd.[27].

V rámci ULSAB projektu se nejčastěji mluví o použití povrchových vrstev z tenkých ocelových plechů (tl. = 0,2 – 0,3 mm) s polypropylenovým jádrem (tl. = 0,3 - 1 mm), (Obr. 12).



Obr. 12 Skladba sendvičového materiálu[27]

Tento typ struktury má velmi podobné vlastnosti jako ocelový plech tloušťky 0,7 mm, ovšem při nižší měrné hmotnosti. Sendvičové panely lze většinou bez větších problémů stříhat, tvářet lepit a mechanicky spojovat.

Většímu nasazení sendvičových struktur se všemi jejich výhodami brání jejich velmi špatná svařitelnost, která komplikuje jejich praktické použití při výrobě karoserie a navíc pokud mají např. plastové jádro, nemohou být montovány do karoserie před vypalováním povrchového laku. Další značnou nevýhodou je jejich poměrně vysoká cena ve srovnání s ocelovým plechem, ale použití sendvičových panelů namísto tenkých ocelových plechů vede k úspoře hmotnosti na díle až o téměř 50%. Z těchto důvodů

jsou v současnosti sendvičové panely nejvíce rozšířeny v leteckém průmyslu či při stavbě ultralehkých konstrukcích [16].

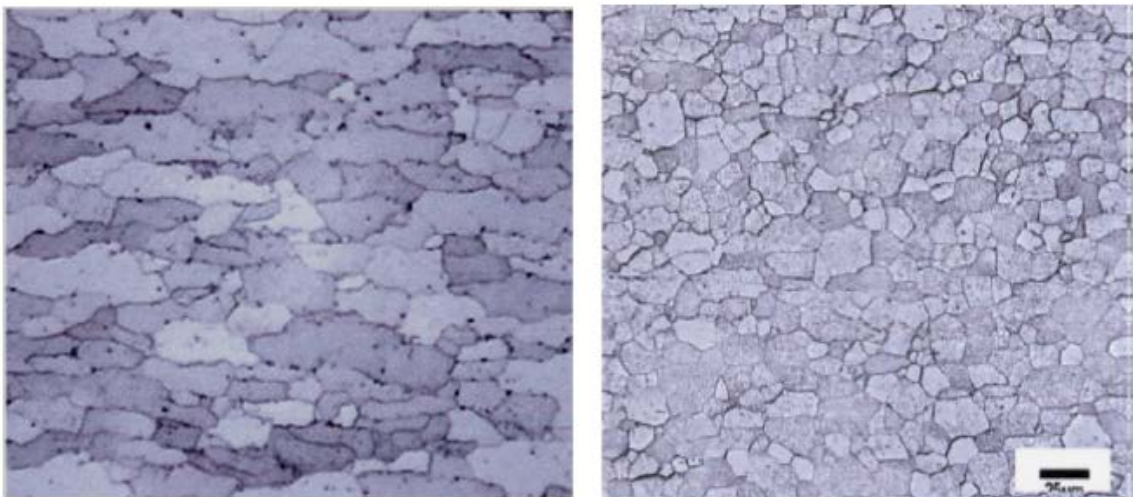
4.2 Nízkouhlíkové hlubokotažné plechy

Nízkouhlíkové hlubokotažné plechy se vyrábějí válcováním za studena nebo za tepla a nabízejí vysokou míru tváritelnosti. Oceli válcované za tepla se používají pro nosné a podvozkové části karoserie, zatímco oceli válcované za studena mají vynikající povrchové struktury a hodí se pro vnitřní a vnější pohledové panelové části, na které jsou kladeny vysoké nároky týkající se čistoty a mikrogeometrie povrchu.

Příklad rozdělení nízkouhlíkových hlubokotažných plechů:

- CS (Commercial Steel) – běžné ocelové plechy
- DS (Drawing Steel) – tažné ocelové plechy
- DDS (DeepDrawing Steel) – hlubokotažné ocelové plechy
- EDDS (ExtraDeepDrawing Steel) – extra hlubokotažné plechy
- EDDSPPlus (ExtraDeepDrawing Steel Plus) – super hlubokotažné plechy

Plech z nízkouhlíkových hlubokotažných ocelí jsou dostupné bez ochranného povlaku, nebo pozinkované a mají čistě feritickou strukturu, která je vidět na následujících metalografických výbrusech (Obr. 13)[19].



Obr. 13 Struktura tažné oceli Struktura extra hlubokotažné oceli [38]

4.2.1 Oceli uklidněné hliníkem

Pro stavbu karoserie vozidel se až donedávna používaly v největší míře hlubokotažné za studena válcované plechy z ocelí uklidněných hliníkem. Ve struktuře mají velmi nízký obsah uhlíku, řádově stovky ppm. Tyto plechy mají zaručeny mechanické vlastnosti a jejich výborná tvařitelnost je předurčila pro tvarově složitě výlisky a to především pohledových dílů, na které jsou kladeny vysoké nároky i z hlediska povrchových vlastností. V závislosti na chemickém složení, mechanických vlastnostech a způsobu výroby byly hlubokotažné plechy rozděleny do několika kvalitativních skupin.

Pro zvýšení pevnosti se tyto ocele legují fosforem (tzv. refoforizované ocele), nebo mikrolegují Mn, Si, Al, V, Ti apod. (mikrolegované ocele). Především žárově pozinkované hlubokotažné plechy z ocelí uklidněných hliníkem, které v důsledku složitých teplotních procesů v pozinkovací lince podléhají stárnutí a tím změnám mechanických vlastností, nejsou schopny dosáhnout vyššího stupně tvařitelnosti než zaručuje skupina DDS. Jako důsledek byly následně vyvinuty oceli bez intersticií, tzv. IF oceli [22].

Charakteristické vlastnosti hlubokotažných ocelí jsou uvedeny v Tab. 1.

Tab. 1 Rozčlenění elektrolytických pozinkovaných ocelí dle DIN EN 10 152[21]

Materiál	R_e[MPa] max.	R_m[MPa] min.	A_{80}[%] min.	r_{90}[-] min.	n_{90}[-] min.
DC01+ZE	140-280	270-410	28	-	-
DC03+ZE	140-240	270-370	34	1,3	-
DC04+ZE	140-210	270-350	37	1,6	0,170
DC05+ZE	140-190	270-350	39	1,9	0,190
DC06+ZE	120-190	270-350	41	2,1	0,210
DC07+ZE	110-160	270-310	43	2,5	0,210

4.2.2 IF oceli

Oceli bez intersticií (interstitials free steels) jsou dnes velmi běžně používány pro stavbu karoserie. Mají intersticiálně rozpustné atomy uhlíku a dusíku vázané ve stabilních karbonitridech (TiCN, NbCN) prováděné mikrolegováním Nb či Ti anebo

kombinacíobou prvků. Snížením obsahu uhlíku a dusíku ve formě tuhého roztoku docílíme výrazného zlepšení plastických vlastností oceli. Množství prvků Nb a Ti v materiálu je stále vyvíjeno pro dosažení příznivého stavu mezi pevností a tvářitelností plechu. Praktické výsledky ukazují, že mnohem výhodnější je legování Nb či kombinací Nb a Ti. Ovšem množství Nb má vliv na velikost zrna, na stárnutí oceli a také zvyšuje rekrytalizační teplotu. Důsledkem je vyšší energetická náročnost při výrobě (vyšší žhací teploty)[28].

Výsledné mechanické vlastnosti jsou závislé na obsahu dalších legujících prvků způsobujících roztokové zpevnění (např. Mn, P), množství a disperzitě (rozptýlení) precipitátů, velikosti feritického zrna a také na úběru při hladícím válcováním. Tento úběr má velmi významný vliv na tvářitelnost, jelikož je prováděn za studena. Má za následek zpevnění a vznik deformační struktury, které snižují tvářitelnost[29]. Příklad složení je uveden v tabulce 2.

Tab. 2Příklad chemického složení IF ocelí [22]

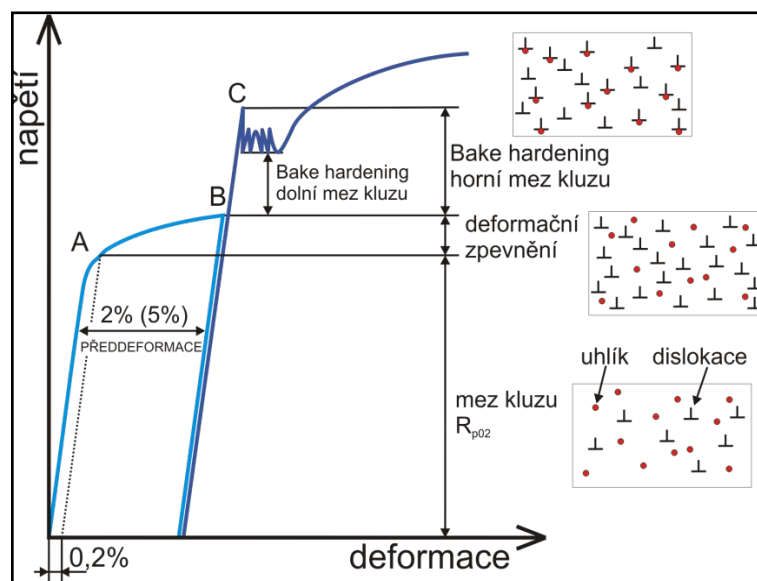
C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Al [%]	Ti [%]	N ₂ [%]	B [%]
0,002	0,12	0,007	0,008	0,004	0,029	0,095	0,0048	0,001

Pro další zvyšování mechanických vlastností jsou IF oceli například mikrolegovány skupinou dalších prvků, nebo se přidává malé množství fosforu pro dosažení zpevnění tuhým roztokem.

4.2.3 BH oceli

Nevýhodou klasických IF ocelí z hlediska odporu proti porušení je nízká mez kluzu. Pro eliminaci tohoto nežádoucího jevu byly vyvinuty IF ocele vykazující BH efekt (BakeHardening). Jedná se o jev, který spočívá ve zvýšení meze kluzu při teplotě vypalování laku karoserie, tj. při 170°C (cca 20 minut). Materiál byl vyvinut tak, aby mez kluzu byla pro lisování co nejnižší a při teplotách vypalování laku karoserie došlo k navýšení meze kluzu pro zajištění dostatečné tuhosti především povrchových panelů, u kterých se tak zvyšuje odolnost proti vtačení tzv. dentresistant (Obr. 14)[30].

Během zpracování laku karoserie dojde k blokování pohybu dislokací uvolněných z inerciálních atmosfér během plastické deformace zpětnou difuzí především atomů uhlíku nebo dusíku. Velikost BH efektu je z hlediska chemického složení závislá na obsahu uhlíku, manganu a síry[31].



Obr. 14 Princip vzniku BH efektu[30]

Dále závisí na historii tváření (válcování) za studena a na parametrech rekrytalizačního žhání. Podle výše uvedených vlivů může dojít ke zvýšení meze kluzu o 30 až 80 MPa.

Z hlediska BH efektu rozlišujeme dva základní typy ocelí pro výrobu plechů:

- a) se zvýšeným obsahem C
- b) se zvýšeným obsahem Ti resp. Nb

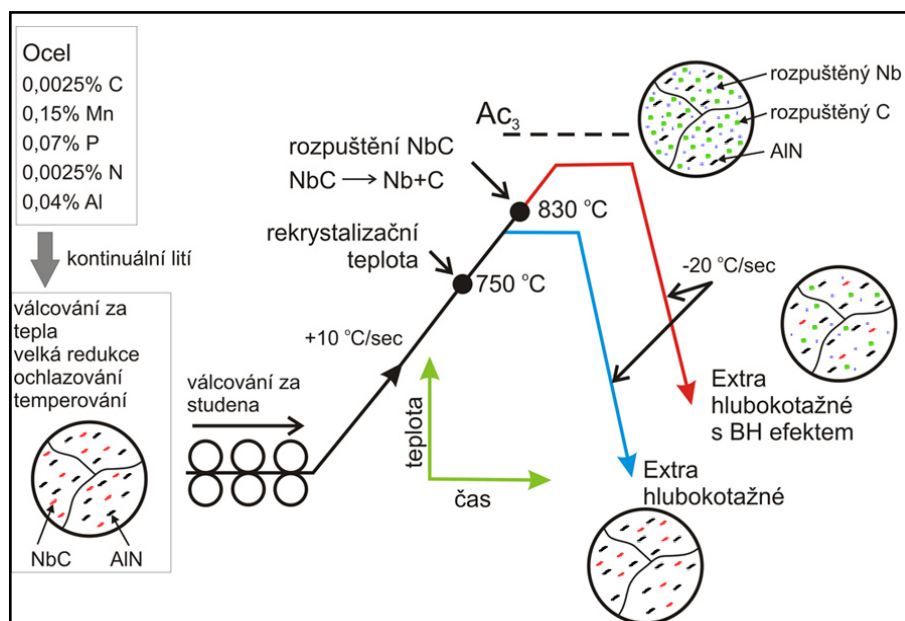
a) se zvýšeným obsahem C

Jedna z možností dosažení BH efektu v materiálu je vyrobení ultra nízko-uhlíkové oceli s mírným přebytkem uhlíku. Tento postup výroby klade velmi vysoké nároky na kvalitu postupu při výrobě. Záměrně se tak přidává menší množství Ti a Nb, které přispívají velkou měrou ke stabilizaci uhlíku, ale část uhlíku zůstává intersticiálně rozpuštěná ve feritové matici i po válcování za tepla a nevázána na vznikající karbidy titanu, niobu. V porovnání s IF oceli mají BH oceli nižší koeficient normálové anizotropie. Je to dáno technologickým procesem, při kterém je třeba získat potřebné množství volného uhlíku, který způsobuje částečné vystárnutí materiálu již při výrobě a následně brání dosažení maximální hlubokotažnosti plechu. U takto dosaženého BH

efektu často není možné použít následné žárové pokovování či jiné tepelné zpracování tenkého plechu[22].

b) se zvýšeným obsahem Ti resp. Nb

Při druhém výrobním postupu se využívá celková stabilizace uhlíku niobem nebo titanem a to i po válcování za studena. Při tváření se intersticiální uhlík v tuhém roztoku prakticky nevyskytuje[28]. Tím je zaručena vynikající hlubokotažnost těchto plechů. Uhlík potřebný pro tvorbu BH efektu se získává rozpouštěcím žháním karbidonitrických precipitátů při teplotách pod A_{c3} na kontinuální žhací lince s následným dostatečně rychlým ochlazováním. Proces zpracování ocele je znázorněn na obrázku Obr. 15. Ačkoliv se po aplikaci žhání nejedná o čistě IF ocel, dosahuje se výborných plastických vlastností. Dosahovaná velikost vytvrzení (BH efektu) závisí na žhací teplotě, časové prodlevě na žhací teplotě a také na rychlosti následného ochlazení. S vyšší teplotou a s vyšší rychlostí ochlazování získáme výraznější BH efekt. Výroba těchto ocelí je energeticky náročnější oproti ocelím se zvýšeným obsahem C, ovšem u tohoto způsobu výroby lze snadněji zařadit žárové pokovování materiálu[22].



Obr. 15 Princip výroby materiálu s BH efektem při zvýšeném obsahu Ti a Nb[30]

4.3 Alternativní materiály

Jedním z nejdůležitějších požadavků současných trendů ve strojírenství je snižování zátěže životního prostředí. Toto lze dosáhnout např. úsporou paliva při snižování hmotnosti dopravních prostředků a tomu odpovídající úsporu energie při akceleraci a provozu. Znamená to zvýšit podíl lehkých konstrukčních materiálů ve stavbě automobilů.

Trendem nasazování dnešních konstrukčních materiálů je především nahrazení plechových dílců materiály vzniklých na základě polymerních reakcí. Příklad využití a nasazení a náhrady těchto dílců je uveden na obrázku Obr. 16.



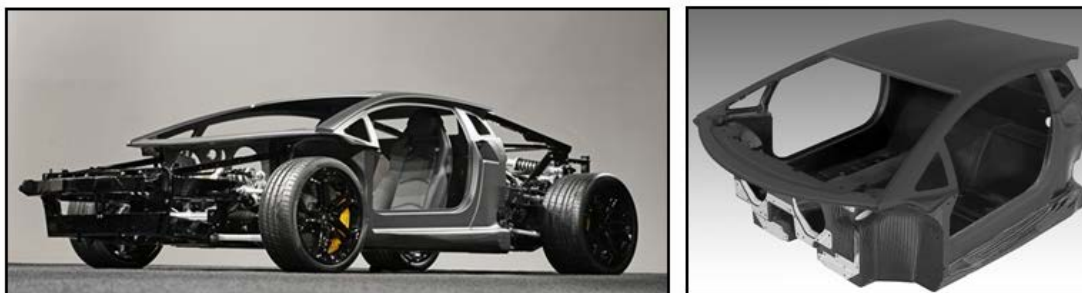
Obr. 16 Příklad použití plastového dílu [18]

4.3.1 Kompozitní materiály

Jako příklad perspektivního materiálu pro tvorbu karoserie budou uvedeny produkty z karbonových vláken. Karbon neboli uhlíkové vlákno (též karbonové vlákno) je název pro vlákno obsahující uhlík v různých modifikacích. Jedná se o dlouhý, tenký pramen materiálu o průměru 5–8 mikrometru miliontiny metru složeného převážně z atomů uhlíku. Atomy uhlíku jsou spojeny dohromady v mikroskopické krystaly, které jsou z převážné většiny orientovány paralelně k dlouhé ose vlákna. Krystalové uspořádání způsobuje, že vlákno je na svou tloušťku velmi pevné. Technologie zpracování dílu z karbonových vláken je poměrně známá a dlouhodobě vyvíjena, ale nadále jsou náklady na výrobu jednotlivých dílů velmi vysoké a jejich nasazení do sériového stavu je vůči technologii zpracování tenkého plechu ekonomicky velmi

náročné. Nasazení tohoto alternativního materiálu je tedy vhodné pro kusové modely, které svoji prodejní cenou vysoko převažují průměrný životní standart[32].

Jako příklad je uveden koncept kabiny vozu Lamborghini, který se touto technologií dlouhodobě zabývá (Obr. 17).

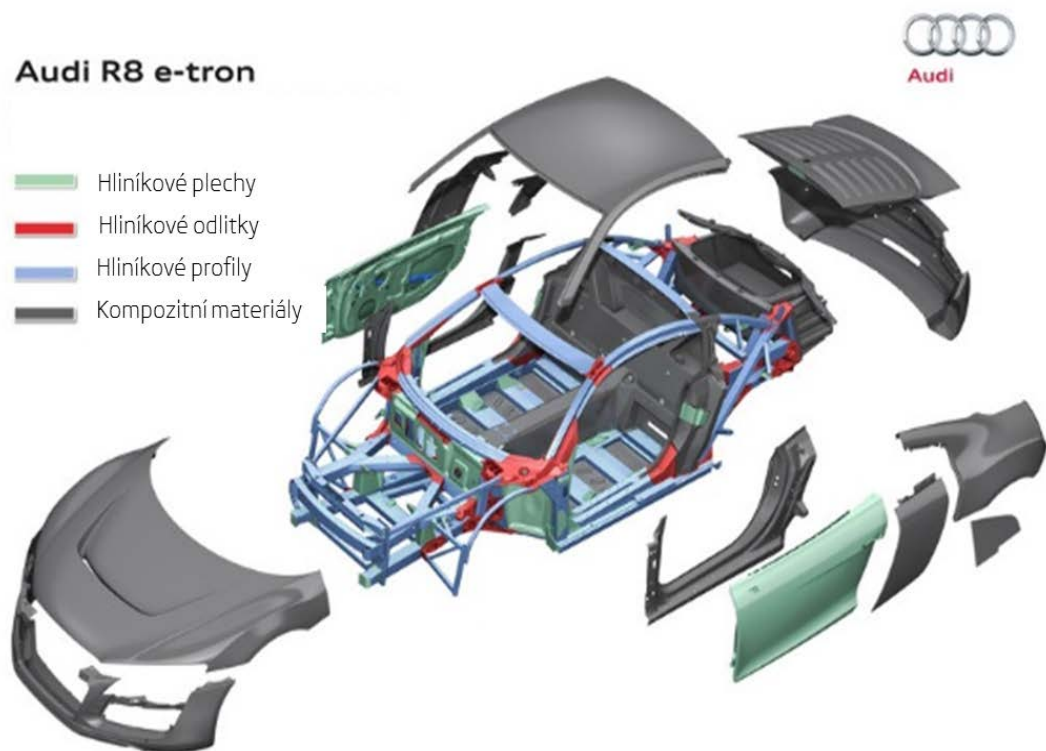


Obr. 17 Kabina vozu Lamborghini vyrobená z karbonových vláken[33]

4.3.2 Slitiny hliníku

Slitiny na bázi hliníku se v posledním desetiletí staly běžnou součástí konstrukce automobilů. Hlavní výhodou hliníkových slitin je jejich nízká hustota (2698 kg/m^3), vysoká korozní odolnost a relativně snadná recyklovatelnost. Hliníkové slitiny mají v porovnání s ocelí přibližně třetinovou hmotnost, ale také nižší pevnostní charakteristiky, takže je nutné navrhovat hliníkové konstrukční prvky s vyšší tloušťkou stěny. Další nevýhodou při použití hliníkových slitin je celkově nižší tvařitelnost a obtížnější svařitelnost oproti ocelím, energetická náročnost výroby slitin Al nebo problémy se zadíráním povrchu při lisování[35].

V současnosti se na celohliníkové karoserie automobilů zaměřuje zejména automobilka AUDI, která vynalezla koncepci lehké hliníkové konstrukce Audi SpaceFrame, která je vidět na obrázku Obr. 18. Podle výrobce přináší tato lehká konstrukce větší stabilitu a bezpečnost celé karoserie, zlepšení jízdních vlastností automobilu a úsporu hmotnosti v porovnání s ocelovými karoseriemi, včetně snižování spotřeby paliva a emisí CO_2 . Základem karoserie Audi SpaceFrame je komplexní struktura z hliníkových plechů, protlačovaných (vyztužených i normálních) profilů a tlakově odlévaných spojovacích uzlů. Kombinací těchto prvků se dosahuje značné tuhosti karoserie, od níž se odvíjí vysoká úroveň pasivní bezpečnosti vozu[22]. Technologií Audi SpaceFrame jsou vybavené vozy Audi A8, Audi TTCoupé, TT Roadster a Audi R8.



Obr. 18 Hliníková konstrukce karoserie Audi R8[34]

Dalším inovačním prvkem je využití tzv. lehčených kovových struktur, které se využívají nejen v automobilovém průmyslu, ale také v letectví či při stavbě kolejových vozidel z důvodu nižší hmotnosti. Mají také výhodné tepelné a zvukově izolační vlastnosti. Jako první se objevily lehké pěnové materiály s otevřenými a uzavřenými póry z hliníku a jeho slitin. V závislosti na velikosti a podílu pórů (až 85%) mají hustotu $0,2\text{—}1,5\text{ kg/dm}^3$. Pěny se vyrábějí ze směsi kovových prášků s nadouvadly. [22]

5. Mechanizmy zpevnění hlubokotažných ocelí

Jednotlivými způsoby k ovlivnění pohybu dislokací je možné dosáhnout různé velikosti zpevnění během plastické deformace. K samotnému zpevnění ovšem vždy dochází za působení několika faktorů zároveň. Přiřadit však jednotlivé mechanismy zpevnění k určitým typům ocelí nelze, neboť zvýšení pevnostních charakteristik je u ocelí vždy dosahováno jejich kombinací[1].

Základní mechanismy, kterými lze zvýšit pevnost hlubokotažných ocelových plechů jsou:

- *deformační zpevnění,*
- *zpevnění tuhého roztoku,*
- *zpevnění zjemněním zrna,*
- *precipitační zpevnění.*

5.1 Deformační zpevnění

Základní vlastností oceli během deformace za studena je zvyšování mechanických vlastností označované jako tzv. deformační zpevnění. U materiálu dochází ke zvýšení meze kluzu R_e , meze pevnosti R_m a snížení tažnosti A_x jinými slovy dochází ke zvýšení odporu materiálu proti rozvoji plastické deformace. Deformační zpevnění je způsobeno samotnou podstatou plastické deformace a je společným fenoménem všech kovových materiálů.

Základním mechanismem tohoto zpevnění je omezování skluzového pohybu dislokací při plastické deformaci. Průběh deformačního zpevnění, popisovaný křivkami zpevnění, je vedle mnoha činitelů, jako jsou teplota, struktura, rychlost deformace aj., závislý také na velikosti přetvoření. V případě, že ke skluzu dislokací dochází pouze v jednom skluzovém systému, je velikost deformačního zpevnění velmi malá, téměř až zanedbatelná. Intenzita zpevnění vzrůstá s počtem aktivovaných skluzových systémů. U monokrystalu je křivku zpevnění, v závislosti na velikosti plastické deformace, možno rozdělit na tři oblasti zpevnění. Z hlediska tváření je nejdůležitější zpevnění v oblasti rozvinutých plastických deformací[40].

Existuje několik teorií popisujících deformační zpevnění v této oblasti.

Mezi základní patří:

- model Pile-up,
- model dislokačního lesa,
- teorie dislokačních skoků.

U polykrystalických materiálů je situace poněkud složitější. Každé zrno při deformaci zpevňuje a zároveň ovlivňuje zpevnění v okolních zrnech. Na velikost výsledného deformačního zpevnění mají vliv také hranice zrn, orientace zrn (textura), vměstky, inkluze apod.

Odpor ideální mřížky kovu proti pohybu dislokací je dán Pierlsovo-Nabarrovým napětím:

$$\tau = G \cdot e^{-\frac{2\pi l}{b}} \quad (1)$$

kde b je hodnota Burgersova vektoru a l je délka dislokační čáry.

Toto napětí je možné zvýšit čtyřmi způsoby zhoršení podmínek pro generování a pohyb dislokací.

Jsou to:

Vzájemná interakce dislokací

- Napěťové pole v okolí shluků dislokací může zastavit činnost Frank-Readových zdrojů.
- Interakce pohyblivých dislokací s dislokacemi lesa, tj. nepohyblivými skupinami dislokací, mohou způsobit zastavení pohybu dislokací.
- Vznik dislokačních skoků protínáním dislokací. Dislokační skoky brzdí dislokace a mohou způsobit zastavení dislokací.

Interakce dislokací s přísadovými atomy

- Vytvořením atmosfér atomů přísad okolo dislokací (vznik Lomer-Cottrellových atmosfér) nebo difuzí atomů přísady do oblasti vrstvené chyby (vznik Suzukiho atmosfér) dochází k brždění dislokací.
- Legováním kovu se může zvýšit energie vrstvené chyby, což způsobuje zhoršení podmínek pro pohyb dislokací.
- Legování kovu, které vede ke vzniku tuhého roztoku, zvyšuje vazebnou energii dislokací k atomům přísady.
- Napěťové pole vzniklé okolo atomů přísady zhoršuje pohyb dislokací.

Interakce dislokací s atomy druhé fáze

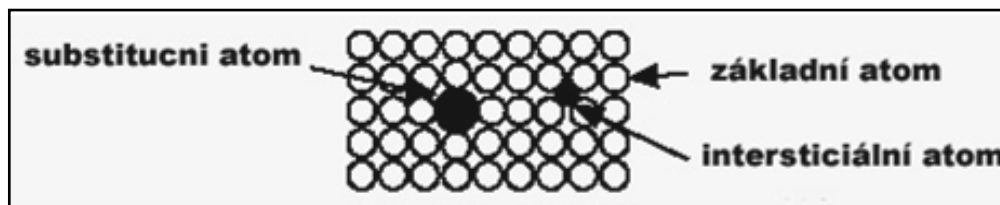
- Částice druhé fáze blokují nebo zhoršují pohyb dislokací přerušením skluzového systému.
- Napětové pole v okolí částic druhé fáze zhoršuje pohyb dislokací.

Interakce dislokací s oblastmi uspořádání

- Stěny domén překáží dislokacím v pohybu na delší vzdálenost.
- Dislokace svým pohybem rozrušuje párové vazby v uspořádané struktuře a tím se snižuje pohyblivost dislokací[41].

5.2 Zpevnění tuhého roztoku

Jedna ze základních charakteristických vlastností železa je jeho schopnost tvořit slitiny s mnoha chemickými prvky. Prvky jako Ni, Cr apod. tvoří se železem substituční tuhé roztoky. Prvky jako N, C, P, B, apod. vytvářejí se železem intersticiální tuhé roztoky. V binárních soustavách se tuhé roztoky většinou nevyskytují v celé oblasti koncentrací obou složek, ale pouze v určitém rozsahu koncentrací, která je vysoce závislá na teplotě, tyto se označují jako tzv. primární tuhé roztoky. V obou případech vzniku tuhých roztoků není velikost atomů přísadových prvků stejná jako velikost atomů železa, a proto jejich přítomnost v tuhém roztoku vyvolává deformaci elementární mřížky základního kovu (Obr. 19). Vzniká určité pole napětí, které superponuje s napětovými poli jednotlivých dislokací, čímž ovlivňuje jejich pohyb. Výsledný pohyb dislokací může být podle vzájemné interakce obou polí nebrzděn (síly obou polí se vyrovnávají) nebo, což je nejčastější případ, je pohyb dislokací brzděn[43].



Obr. 19 Rozdílná velikost atomů v mřížce[38]

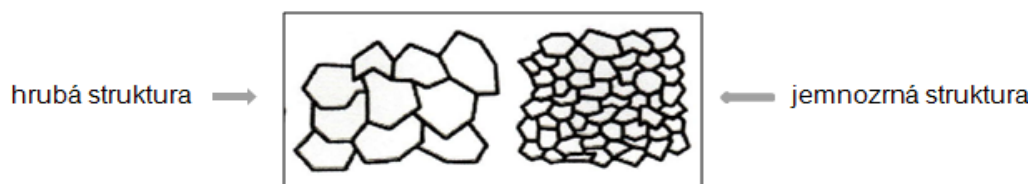
Podle typu tuhého roztoku je možno brzdící efekt vysvětlit různými způsoby. Platí, že čím větší je uspořádanost rozložení přísadové složky, která tvoří tuhý roztok

v mřížce základního kovu, tím větší jsou brzdicí síly. Vlastní zpevnění je způsobeno tím, že pro

pohyb dislokace je potřeba větší napětí k překonání napěťových polí v okolí přísadových prvků. Velikost zpevnění závisí na koncentraci rozpuštěného prvku a jeho velikosti vzhledem k atomům základní mřížky[38][64].

5.3 Zpevnění zjemněním zrna

Zjemnění zrna (Obr. 20) feritu je jeden z nejdůležitějších principů zpevnění při tepelném zpracování ocelí. Jedná se v podstatě o tzv. tepelně-mechanické zpracování. Volbou teploty při řízeném válcování a volbou podmínek následného ochlazování lze získat požadovanou jemnozrnnou strukturu. Princip spočívá v tom, že při tváření za studena dochází ke zvětšení hustoty dislokací, které se šíří na okraj zrn, kde se hromadí [1]. Toto nahromadění na překážce způsobuje napětí, které vede ke zpevnění materiálu. Při hrubé struktuře je nutný velký počet dislokací k překročení této kritické hodnoty napětí, která způsobí vlastní zpevnění materiálu, a proto je zřejmé, že při jemnozrnné struktuře bude zpevnění výraznější při stejném počtu dislokací. V případě, že velikost zrna se u hlubokotažných ocelí pohybuje okolo 0,25 mm, pak mez pevnosti dosahuje 100 MPa. Pokud je zjemněním struktury velikosti zrna 0,0025 mm, pevnosti v tahu se zvýší na 500 MPa[44].



Obr. 20 Zobrazení velikosti zrn[38]

5.4 Precipitační zpevnění

Základním mechanismem precipitačního zpevnění je rozpad přesyceného tuhého roztoku. K rozpadu tuhého roztoku dochází, dojde-li k jeho přesycení rozpuštěnou složkou při změně teploty. K rozpadu tuhého roztoku může dojít pomocí tří odlišných mechanismů, které jsou určující pro výsledné vlastnosti materiálu.

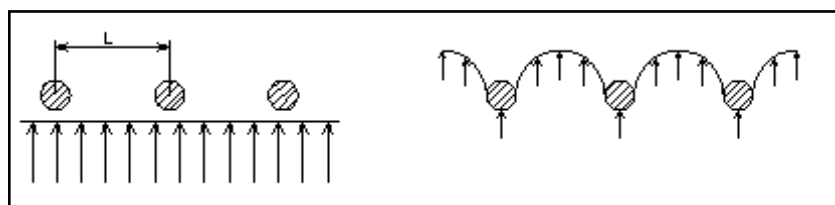
Jedná se o následující mechanismy:

- *segregace,*
- *vznik Widmannstättenovy struktury,*
- *precipitaci.*

Segregací je označován pochod, při němž dochází k vylučování nové fáze za podmínek blízkým rovnovážným. Probíhá při poměrně vysokých teplotách, kde je dostatečně účinná difuze a k vyloučení nové fáze tedy dochází především na hranicích zrn tuhého roztoku α .

Při větším přechlazení dochází již k omezení difusních pochodů a nová fáze se vylučuje pouze v určitých rovinách tuhého roztoku. Vzniká Widmannstättenova struktura.

Při velmi výrazném přechlazení vzniká značně přesycený tuhý roztok. Rozpad tohoto přesyceného nestabilního roztoku za nízkých teplot, kdy difuze atomů je velmi omezená, se označuje jako precipitace. Precipitace nové fáze sice probíhá v celém objemu zrna, ale i zde existují určité energeticky výhodnější roviny pro její tvorbu. Precipitované částice jsou velmi malé a jejich disperznost roste se zmenšující se difusní schopností atomů přísady při dané teplotě. Právě velikost, množství a v neposlední řadě tvar precipitovaných částic má zásadní vliv na konečné vlastnosti materiálu. Za hlavní příčinu zvýšení pevnosti a tvrdosti při precipitačním rozpadu tuhého roztoku je tedy považováno tzv. disperzní vytvrzení, jež je založeno na blokování skluzových rovin drobnými, většinou tvrdými částicemi vzniklými precipitací. Tvrdé precipitované částice nemohou pohybuující se dislokace prorazit. Je-li působící napětí dostatečně veliké, pak se dislokace při srážce s takovou překážkou nezastaví, ale obejde ji a uzavře (Obr. 21)[64].



Obr. 21 Princip blokování skluzových rovin precipitáty

S rostoucím počtem dislokačních smyček roste napětí potřebné pro další pohyb dislokací a vytváření nových smyček. Tímto způsobem se zvyšuje mez kluzu, ale také

hodnota přechodové teploty mezi tvárným a křehkým porušením (lomem) materiálu. Negativním jevem při precipitačním vytvrzení tedy může být nejen snížení tvárnosti, ale i zvýšení náchylnosti ke křehkému porušení. Příčinu zkřehnutí materiálu při precipitaci lze spatřit ve změně vlastností hranic zrn[28].

6. Diagramy mezních přetvoření

V oblasti technologie tváření kovů je velmi důležité a přínosné dokázat zobrazit a definovat možnosti tvařitelnosti konkrétních materiálů. Jednou z možností, která se v tomto případě nabízí a je odzkoušena praxí je určení tvařitelnosti materiálu pomocí diagramů mezních přetvoření (DMP) a stanovení křivky mezních přetvoření (KMP).

6.1 Definice diagramů mezních přetvoření

Při lisování souvisí ztráta stability procesu tváření s vyčerpáním schopnosti libovolného elementu plechu přenášet tvářecí sílu. Ve smyslu definice plastičnosti závisí mezní stupeň přetvoření daného plechu i na stavu napjatosti v průběhu tažení. Označme hlavní normálová napětí v rovině plechu σ_1, σ_2 ($\sigma_3=0$), přičemž $|\sigma_2| \leq |\sigma_1|$ a odpovídající přetvoření $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ jsou definována jako logaritmické deformace. Rovinnou napjatost lze vyjádřit ve tvaru $\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = 1 : m_\sigma : 0$, a pak ukazatel stavu napjatosti m_σ

$$m_\sigma = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad (2)$$

nabývá hodnot $m_\sigma \in \langle -1, 1 \rangle$. Mezní stavy přetvoření daného materiálu je pak možno vyjadřovat za daných teplotně-rychlostních podmínek v závislosti na napjatosti. Všechna tři hlavní přetvoření lze vyjádřit jednou veličinou nazývanou kritická intenzita přetvoření φ_{ik} ,

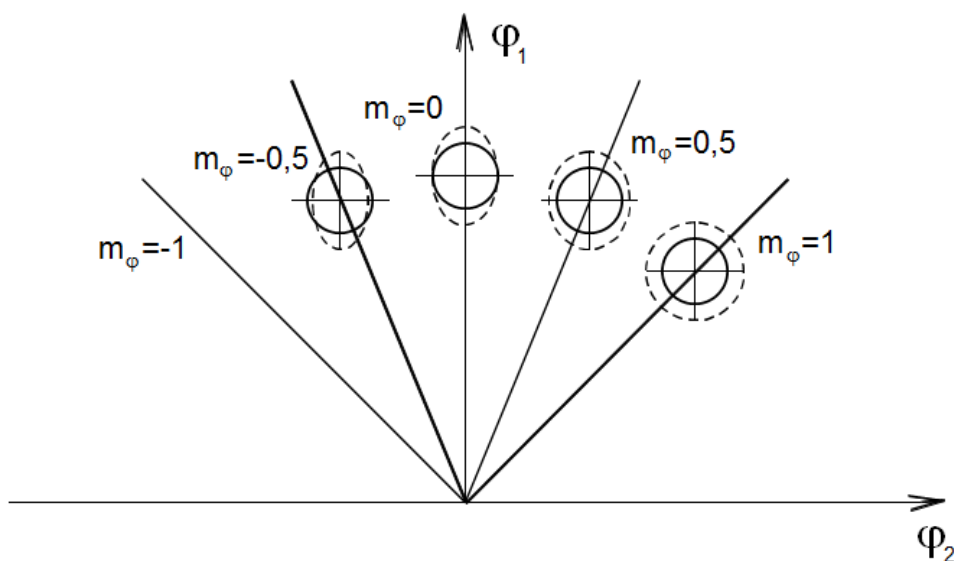
$$\varphi_{ik} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varphi_{1k}^2 + \varphi_{2k}^2 + \varphi_{1k}\varphi_{2k}} \quad (3)$$

Tímto přístupem lze získat Diagram Mezních Přetvoření (DMP) v souřadnicích $m_\sigma - \varphi_{ik}$. K získání DMP lze dojít i kratší cestou než přes výpočet intenzity přetvoření (ze známých hodnot přetvoření) a stavu napjatosti spočteného pomocí vztahů mezi tenzory

napětí a přetvoření. K určení diagramu mezních přetvoření lze bezprostředně využít zjištěné hodnoty hlavních normálových přetvoření φ_{1k} , φ_{2k} . S touto myšlenkou přišli poprvé Keeler (1965) a Goodwin (1968), kdy byl poprvé představen diagram mezních přetvoření jako závislost největšího přetvoření (major strain) φ_1 na nejmenším přetvoření φ_2 v rovině plechu. Jednotlivé stavy napjatosti charakterizované opět ukazatelem m_σ (pro prosté zatěžování $m_\sigma = \text{konst.}$) jsou v tomto diagramu představovány paprsky vycházejícími z počátku souřadného systému. Tedy i diagram s těmito souřadnými osami vyjadřuje závislost mezních deformací na napjatosti. Na výlisku nelze obecně určit přímo velikost napětí. Je však možné pomocí deformační sítě bezprostředně změřit hodnoty přetvoření jako následek působící napjatosti. Je výhodné pro proporcionální přetvoření definovat ukazatel stavu přetvoření m_φ vztahem (4)

$$m_\varphi = \frac{\varphi_2}{\varphi_1} \quad (4)$$

Je zřejmé, že ukazatel stavu přetvoření m_φ leží ve stejném intervalu jako ukazatel m_σ čili $m_\varphi \in \langle -1, 1 \rangle$. Vzhledem k těmto skutečnostem bude ve vztahu ke komplexní analýze přetvoření výhodné používat výhradně DMP v souřadnicích $\varphi_2 - \varphi_1$ a používat ukazatele m_φ namísto m_σ . Praktické zkušenosti ukázaly, že ke vzniku trhlin na výliscích dochází při stavech přetvoření ohraničených hodnotami $m_\varphi = -0,5$ a $m_\varphi = 1$. V tomto rozsahu je pak nutné při sestavování diagramů mezních přetvoření modelovat stavy přetvoření. Grafické znázornění této oblasti je vidět na (Obr. 22)[51].



Obr. 22 Stavy přetvoření v DMP charakterizované ukazatelem m_φ [38]

Velikost mezních deformací je dána nejen plastičností plechu, ale je i výrazně závislá na způsobu definování mezního stavu. Za ten lze považovat na jedné straně dosažení meze pevnosti materiálu, na druhé straně je to porušení plechu tvárným lomem.

K určení DMP je proto nutné získat množství hodnot mezních přetvoření v rozsahu příslušných stavů m_φ pro zvolený mezní stav v daném intervalu. Modelovat různé stavy m_φ lze experimentálně či početně, je-li vytvořen matematický model chování příslušného materiálu. Podle DMP lze hodnotit plastické vlastnosti dvou porovnávaných materiálů, či využít tento diagram ke komplexní analýze přetvoření výlisku.

6.2 Experimentální určení diagramů mezních přetvoření

K určení diagramu mezních přetvoření je nutné získat množství hodnot v mezním stavu, vždy dvojic $[\varphi_{2k} ; \varphi_{1k}]$, v rozsahu $m_\varphi \in (-0,5 ; 1)$, při dané definici mezního stavu. V tomto případě nikoli matematickým modelováním, ale experimentálním způsobem. Původním postupem uplatněným Keelerem (zjišťováním mezních přetvoření na různých typech výlisků) je získání DMP značně náročné, pracné, zdlouhavé a s větším rozptylem získaných mezních přetvoření. Mnohem výhodnější je experimentální modelování stavů přetvoření m_φ v laboratorních podmínkách, např. s využitím trhacích strojů pro zkoušku tahem, zařízení pro hydraulickou zkoušku, či jiným ze speciálních nástrojů. Zmíněné postupy se navzájem liší složitostí, nároky na zkušební zařízení, tvarem a provedením zkušebních vzorků a úplností výsledků, které poskytují. Nejvíce rozšířené a všeobecně známé zkoušky jsou:

- Zkouška tahem tyčí opatřených rozmanitými vruby.
- Zkouška hydrostatická s kruhovou či eliptickou tažnicí.
- Zkouška hloubením plechu tažníky různých poloměrů.
- Zkouška vypínání zkušebních těles s vystřiženými kruhovými segmenty proměnného poloměru.
- Zkouška vypínání zkušebních těles v podobě pruhů proměnné šíře (tzv. Nakazimova metoda).

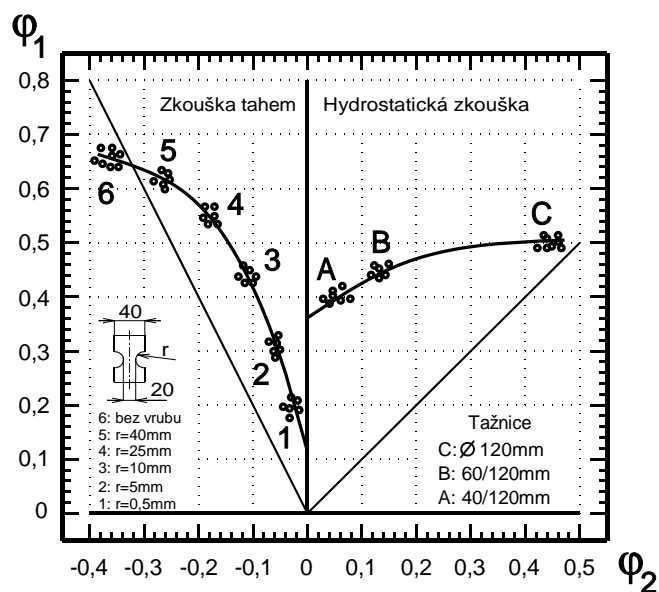
- Zkouška vypínání tvarových nástřihů s vystřiženými kruhovými segmenty konstantního poloměru polokulovým tažníkem.

Při zkoušce tahem tyčí opatřených vruby se různé stavy přetvoření modelují právě rozličnými tvary vrubů.

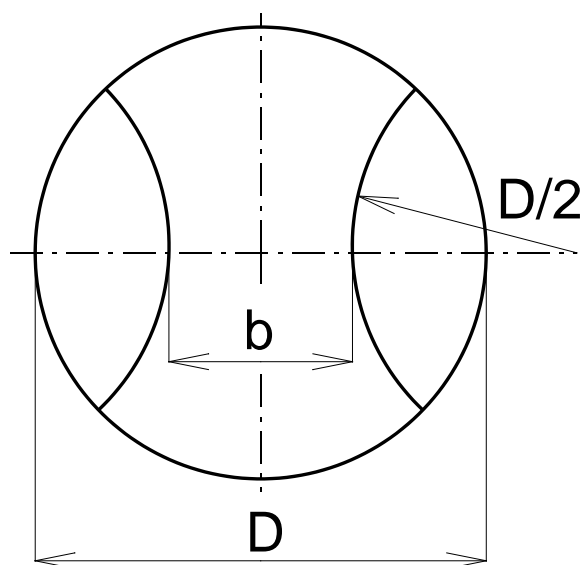
Příprava vzorků není složitá a přetvoření lze jednoduše realizovat na trhacím stroji. Jedním z nedostatků tohoto postupu je, že lze modelovat jen stavy přetvoření odpovídající pouze „levé“ straně DMP[38].

Při zkoušce hydrostatické se rozmanitých stavů přetvoření dosahuje použitím eliptických tažnic s proměnnou velikostí hlavních os. Příprava kruhových vzorků je velmi jednoduchá, mnohem větší nároky jsou však kladeny na zhotovení sady eliptických tažnic a speciálního zkušebního zařízení. Nedostatkem tohoto postupu pak je, že lze naopak modelovat jen stavy přetvoření odpovídající „pravé“ straně DMP. K získání úplného DMP v požadovaném rozsahu přetvoření $m_\varphi \in \langle -0,5 ; 1 \rangle$ je tedy nutno obě tyto metody kombinovat. Diagram mezních přetvoření získaný popsanou kombinací zkoušek je vidět na Obr. 23. Nevýhodou tohoto přístupu je jednak nutnost kombinace dvou zásadně odlišných metod a zejména pak na první pohled patrná nespojitost mezních přetvoření v oblasti rovinného přetvoření ($\varphi_2=0$).

Z řady existujících metod se jeví jako nejvhodnější metoda poslední jmenovaná a to metoda vypínání tvarových zkušebních těles s proměnnou šířkou b . Tvar zkušební tělesa je vidět na obrázku Obr. 24. K celé přípravě potřebného sortimentu zkušebních těles nutných k určení diagramu mezních přetvoření v celém požadovaném rozsahu $m_\varphi \in \langle -0,5; 1 \rangle$ pak postačí jediný střižný nástroj. Zkušební pro zjištění diagramů mezních přetvoření pomocí vypínání tvarových nástřihů se skládá ze speciálního nástroje umístěného na dvojčinném lisu. Nástřihy pevně sevřené v oblasti příruby jsou vypínány polokulovým tažníkem o průměru 100 mm až do okamžiku vzniku trhliny či jinak definovaného mezního stavu. K snadnějšímu sledování procesu plastického přetvoření slouží uzavřený televizní okruh s kamerou umístěnou přímo v nástroji[52].



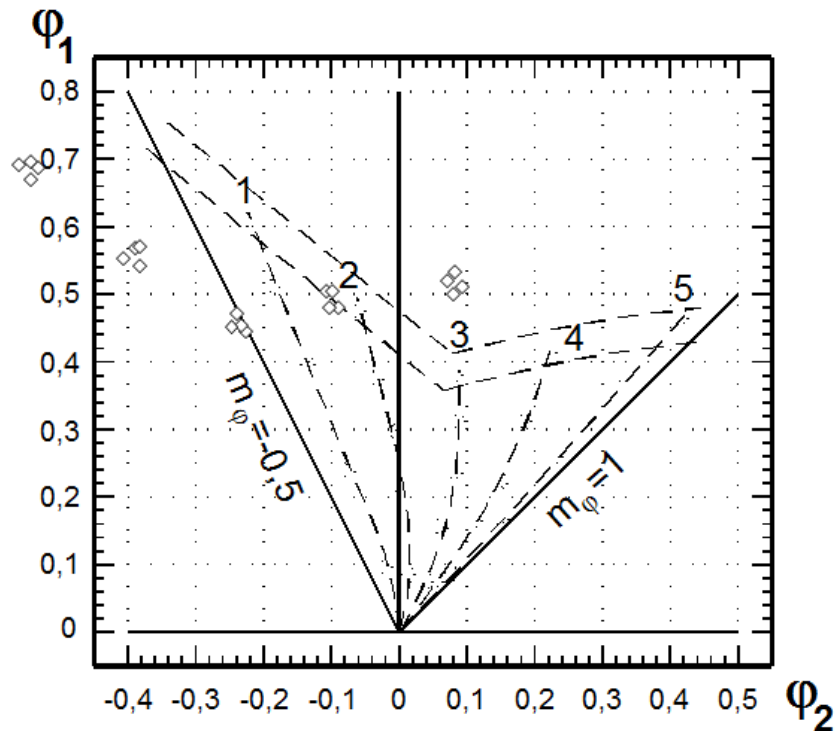
Obr. 23 Mezní stavy přetvoření dosahované zkouškou tahem tyčí s vruby a pomocí zkoušky hydraulické[37]



Obr. 24 Tvarový nástřih k modelování různých stavů přetvoření pomocí vypínání kulovým tažníkem[37]

Vlastní konstrukce diagramu mezních přetvoření je patrná z obrázku Obr. 25, kde je diagram mezních přetvoření vytvořen pomocí vzorků pěti různých šířek. Tyto šířky modelují pět různých stavů přetvoření m_φ představovaných deformačními stopami. Pro rovnoměrné pokrytí požadovaného intervalu stavů přetvoření $m_\varphi \in \langle -0,5; 1 \rangle$ je obvykle nutno použít vzorků celkem 13-ti různých šířek. Bylo prokázáno, že

deformační stopy získané touto metodou jsou v podstatě lineární, čili lze říci, že se jedná o případ proporcionálního přetvoření [53].



Obr. 25 Zjednodušený diagram mezních přetvoření získaný z 5-ti deformačních stop [37]

V případě experimentálního stanovení DMP je nutné velikost mezní deformace stanovit prostřednictvím měření deformační sítě. Otázka tedy je, jakým způsobem zjišťovat na reálném výlisku, a takovým zkušební vzorek je, velikost dosaženého přetvoření, jež bude ve smyslu určité definice považováno za mezní. Jednoznačné definování mezního stavu přetvoření a způsobů jeho určování je velmi důležité, neboť to jsou důležité faktory zásadně ovlivňující polohu a tvar křivek mezních přetvoření.

6.3 Využití optického systému k měření mezních přetvoření

V dnešní době dochází k prudkému rozvoji nasazení optického systému, které se s výhodou využívá v širších oblastech strojírenského průmyslu. Jako dílčí zástupce je možné uvést optické systémy od firmy GOM, mezi které patří systém ARAMIS, PONTOS, ARGUS a další. Tyto systémy umožňují zachycovat tvar a polohu dílčích objektů pomocí snímků na základě exaktního měření. Vědní obor zabývající se touto problematikou se nazývá fotogrammetrie.

Fotogrammetrii lze dělit podle různých kritérií jako např. podle počtu snímků pořízených současně, podle stylu pořízení a vyhodnocení snímků nebo podle časové dostupnosti snímků. Dále je uvedeno rozdělení právě podle časové dostupnosti[61]:

- Offline – jedná se o sekvenční snímání, vyhodnocení je časově nebo prostorově odděleno.
- Online – provádí se simultánním snímáním více snímků a bezprostředním vyhodnocením snímků. Kamery jsou většinou přímo připojeny k počítači.
- Real time – snímání a vyhodnocení jednoho snímku v reálném čase. Frekvence snímání koresponduje s frekvencí změny (deformace, pohyb) snímaného objektu.

6.3.1 Měření deformací pomocí optického systému ARAMIS

Jelikož systém ARAMIS byl v této práci využit k dílčímu měření je následující kapitola věnována popisu tohoto systému.

Bezkontaktní měřicí systém ARAMIS, který je znázorněn na obrázku Obr. 26 se používá pro měření reálných 3D deformací. Měření může být spouštěno dvěma způsoby a to buď externím signálem (např. ze zatěžovacího stroje), nebo v pravidelných časových intervalech. Výstupem z měření je barevná mapa rozložení deformací na měřeném objektu. Při měření rotačních objektů je možnost propojit více systémů ARAMIS do jednoho měřicího systému.



Obr. 26 Systém ARAMIS (výpočetní a snímací část) [36]

K samotnému snímkování (skenování) analyzovaných vzorků, se využívá dvou kamer, které nám jsou schopny poskytnout prostorový obraz. Rozsah měření velikostí dílčích objektů je stanoven výrobcem od 1 mm do 1000 mm, rozsah měření deformace od 0,05% až do stovek %. Výstupní hodnoty je možné zobrazit v požadovaných modech jako je např. grafické zobrazení deformačních polí, zobrazení velikosti hlavních a vedlejších deformací, změny tloušťky materiálu.

Princip měření systému Aramis spočívá ve snímání deformační sítě (tzv. patternu), která musí být nanášena na snímáný vzorek. Nanášení deformační sítě se provádí pomocí spreje a musí být dostatečně kontrastní. Tato deformační síť se liší od běžně používaných sítí a její vzhled souvisí se způsobem vyhodnocování. Systém porovnává odpovídající si body v jednotlivých úrovních zatížení. Z tohoto porovnání je schopen vypočítat 3D posuvy, 3D deformace a tvar deformovaného objektu. Analýza deformace vychází z posuvu tzv. fazet. Měřicí systém ARAMIS rozdělí deformační síť na jednotlivé fazety, v nich se pak měří poměr plochy černé a bílé barvy, podle tohoto poměru jim pak systém přiřadí stupeň šedi. Fazety na vzorku se překrývají z důvodu spojitosti měření (doporučené překrytí je cca. 30%). Nanášení deformační sítě bílou a černou barvou musí být provedeno zcela náhodně. Na deformační síti by neměla vznikat velká bílá místa a také ani větší černá místa[61].

Před samotným měřením je nutné kalibrovat měřicí systém a to z toho důvodu, že kamery nemají automatické zaostřování. K tomuto účelu slouží speciální kalibrační destička (Obr. 27), která je opatřena souřadným systémem a tzv. kalibračními body. Před samotnou kalibrací nainstalujeme kamery před zkušební vzorek. Kalibrace probíhá tak, že destičku držíme mezi kamerami a zkušebním vzorkem. Dále s ní otáčíme a měníme polohu podle pokynů měřicího systému. Po tomto by měla být kalibrace systému úplná.



Obr. 27 Kalibrační destička určena pro kalibraci systému ARAMIS[36]

Aby mohl být obraz zpracován, tak by se měl zkušební vzorek nacházet v kalibračním objemu, který vytvoří právě dvojice kamer. Tím se rozumí, že snímané body, které se dostanou během měření, mimo kalibrační objem nelze později použít pro výpočet. Děj se zaznamenává podle předem nastavené frekvence snímkování. Naměřená data se ukládají přes řídicí trigger do PC. Vyhodnocení měření se provede pomocí vhodného softwaru. Požadované měřené veličiny získáme právě pomocí softwaru, který je schopen vyhodnotit polohu a posunutí jednotlivých fazet na povrchu zkušebního vzorku, dále pak dopočítá rychlost a zrychlení v každém časovém úseku[61][46].

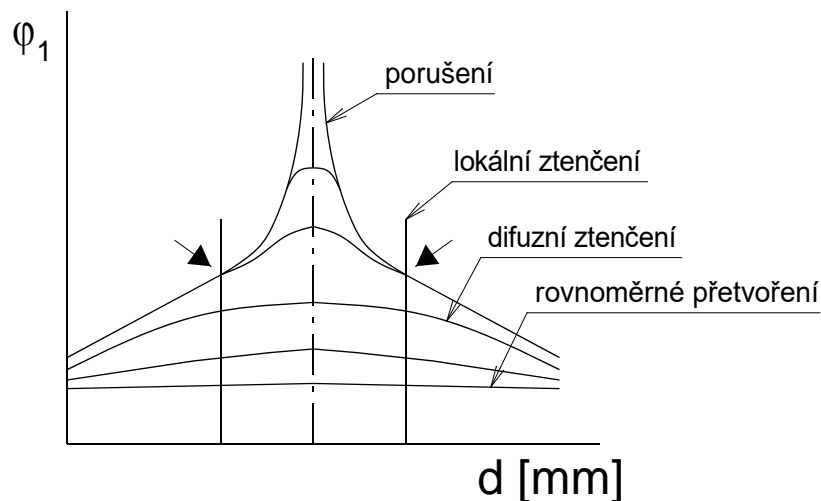
6.4 Stanovení stupně mezního přetvoření

Řešení problému spočívá v určení, pro jak definovaný mezní stav a jakým způsobem se bude zjišťovat velikost dosaženého přetvoření, jež bude považováno za mezní. Bylo konstatováno, že v oblasti velkých plastických přetvoření lze mezní stav definovat v rozmezí meze pevnosti a okamžiku vzniku tvárného lomu. Oba takto zvolené mezní stavy představují krajní hranice. Je zřejmé, že mezi těmito krajními mezemi může existovat celá řada různě definovaných mezních stavů. Volbu mezního stavu je vhodné, s ohledem na komplexní využití diagramů, uvažovat ve vztahu k reálnému výlisku. Určit dosažení meze pevnosti u výlisku je dost obtížné, ne-li nemožné, zatímco objevení se první trhliny je naprosto evidentní. První případ může znamenat nevyužití plastičnosti materiálu, druhý pak znamená již neopravitelný zmetek.

Přestože vysokého lomového přetvoření nelze z praktického hlediska ve vztahu k výlisku již využít, bylo by možné k analýze přetvoření použít i křivku mezních

přetvoření (KMP) stanovenou pro okamžik vzniku lomu. Pro reálné výlisky je však prakticky využitelné jen přetvoření realizované do okamžiku vzniku lokálního ztenčení. Potom se deformace lokalizuje do úzkého krčku, kdy za stavu rovinného přetvoření dochází k prodloužení pouze na úkor tloušťky plechu. V okolí krčku k deformaci prakticky nedochází. Vzhledem k malé tloušťce plechu je pak přírůstek přetvoření v tomto okamžiku pro realizaci změny tvaru výlisku zanedbatelný.

Charakter rozložení přetvoření v okolí trhliny v různých fázích tažení je zřejmý z obrázku Obr. 28. Objektivní vizuální určení definovaného mezního stavu je dosti obtížné. Proto byly na základě experimentálních pozorování navrženy různé metody jeho stanovení, např. metoda ekvivalentního bodu, metoda grafická, metoda interpolační, apod.[38].

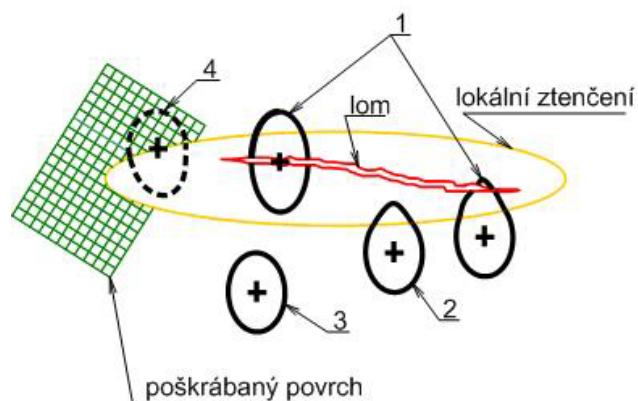


Obr. 28 Charakter rozložení přetvoření φ_1 v okolí trhliny[51]

Obecně nejrozšířenější postup při určování mezního přetvoření dle výše uvedené definice vychází z výběru vhodných elementů z okolí lomu [45], jak je naznačeno na obrázku Obr. 29. Zviditelnění lokálního ztenčení okolo trhliny se dosáhne mírným poškrábáním povrchu plochým brouskem. Výběr pak zahrnuje elementy deformační sítě zasažené lomem (č. 1), lokálním ztenčením (č. 2) a takové, které sousedí s místem porušení, ale nejsou zasaženy ani lomem, ani lokálním ztenčením (č. 3). Poloha bodů v DMP představujících přetvoření dle jednotlivých vybraných elementů je zřejmá - v DMP budou nejvýše body č.1, pak č. 2 a nejnižše č. 3.

Křivka mezních přetvoření ve smyslu navržené definice pro počátek lokálního ztenčení je vedena tak, aby ležela nad body určené elementy č. 3 a pod body danými elementy č. 1 a č. 2. Takto určená KMP v podstatě odděluje v DMP dvě oblasti. Nad ní

existuje lokální ztenčení, pod ní ještě nedošlo k lokalizaci deformace. KMP tvořící rozhraní obou těchto oblastí tak může odpovídat počátku vzniku lokálního přetvoření a plně vyhovět dané definici mezního stavu[51].



Obr. 29 Výběr elementů deformační sítě pro určení mezního přetvoření[45]

Všechny výše zmíněné postupy určení mezního stavu si kladou za cíl co nejpřesnější a nejjednodušší určení mezního přetvoření v souladu s přijatou definicí. V této souvislosti je třeba si dále uvědomit, že rozložení přetvoření (zvláště φ_1) vykazují různě velký gradient, daný zejména tvarem zkušebního tělesa, podmínkami tření, křivostí tažníku. Uvedené skutečnosti komplikují a znesnadňují efektivní určení mezního přetvoření. S ohledem na využívání experimentální metody určení DMP v rozsáhlém měřítku, důležitém pro potřeby praxe, je vhodné modifikovat předchozí způsoby tak, aby přijatá metoda určování mezního přetvoření byla rychlá, snadná, pokud možno jednoznačná a v souladu s jeho definicí. Vzhledem k tomu, že vznik lomu je na výlisku evidentní, je výhodné odvíjet stanovení mezního stavu právě od vzniku lomu. Pak ve smyslu přijaté definice mezního stavu vhodně vybrat v okolí trhliny jednotlivé elementy deformační sítě, které budou použity ke stanovení mezního přetvoření. Pro přesné určení mezního stavu je navíc nutno měřit elementy v místě prvního vzniku lomu. Za mezní přetvoření je dle výše přijaté definice považováno to, které z vnějšku bezprostředně sousedí s lokální zónou [52]. Tomu odpovídá střed elementu č. 4 na Obr. 29, kde 50% elementu je zasaženo lokálním ztenčením. Výběr právě takového elementu je však, s ohledem na proměnnou šířku lokálního ztenčení v závislosti na tloušťce plechu a m_φ při daném parametru sítě, značně problematický.

Z dosud provedených experimentů vyplývá, že přijaté definici mezního stavu se nejvíc blíží hodnoty, které jsou získány měřením elementů č.2 (Obr. 29). Na podstatné části plochy vymezené těmito elementy je rovnoměrné přetvoření a částečné zasažení

lokálním ztenčením, které zvyšuje naměřené přetvoření φ_1 a napomáhá kompenzovat snížení hodnoty přetvoření v důsledku gradientu přetvoření φ_1 . Při dané velikosti elementu sítě je totiž změřená hodnota deformace přiřazena středu elementu. Střed měřené elipsy č. 2, však není totožný s rozhraním „lokální ztenčení-rovnoměrná oblast“, kde lze očekávat dle přijaté definice mezní přetvoření, ale je posunut dál do rovnoměrné oblasti, a tedy k nižším hodnotám přetvoření. Tento postup má tu výhodu, že snížením počtu měření (omezujeme se pouze na měření elementů č.2) se poněkud sníží pracnost celého experimentu. Další výhodou je, že umožňuje následné statistické zpracování výsledků, které značně rozšiřuje množství informací výtěžitelné z realizovaného experimentu[53].

Z předchozích kapitol je zřejmá podstata komplexní analýzy přetvoření výlisků, včetně uvedení výhod a předností. Její velká nevýhoda především v tom, že je možné takovou analýzu provádět pouze na skutečně odlisovaném výrobku. Touto metodou tedy není možné najít optimální řešení, aniž by se realizovalo vlastní tváření. Ve fázi kdy je již vyroben tažný nástroj (velmi často i nástroje pro následné operace tváření) je již velmi limitován počet parametrů, které lze měnit v rámci optimalizace průběhu lisování. Nelze tedy tímto způsobem posuzovat lisovatelnost dílu ve stadiu jeho navrhování či ve stadiu konstrukce lisovacího nástroje.

Možnost analyzovat proces přetvoření plechu již ve fázi konstrukce výlisku či nástroje vyžaduje vyřešit problém výpočtu plastické deformace v problematické oblasti navrhovaného výlisku. Pro jednoduché tvary součástí a po zavedení určitých zjednodušujících předpokladů lze výpočet napětí a deformace provést „klasickou“ cestou.

K těmto používaným metodám výpočtu především patří[51]:

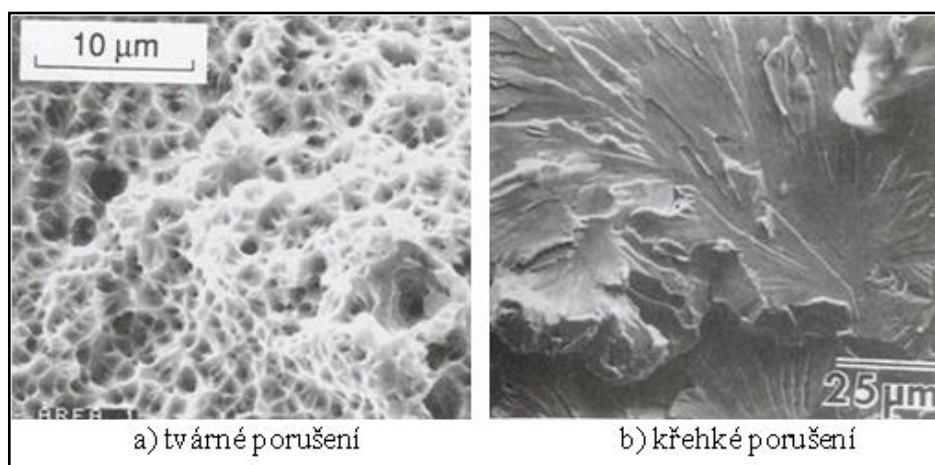
- Řešení diferenciálních rovnic rovnováhy s použitím podmínek plasticity.
- Metoda energetické rovnováhy.
- Metoda horního odhadu.
- Metoda kluzových čar, atd..

7. Úvod do teorie lomů

Analýza kovových materiálů v podmínkách mezních zatížení hraje velmi důležitou roli při hodnocení celkových vlastností vhodných k tvařitelnosti plechu. Při tváření karosářských výlisků jsou materiály často podrobeny náročným způsobům technologie tváření, které jsou předurčeny jejich tvarem, je proto dobré se seznámit se základními typy lomových ploch a jejich mechanismy vzniku zejména pak u hlubokotažných ocelí.

7.1 Klasifikace druhů lomů v kovech

Na konstrukční dílce působí řada namáhání (statické, cyklické, rázové), navíc za normálních, snížených nebo zvýšených teplot. Teorie a současné laboratorní zkušební metody jsou zaměřeny na poznání podstaty vlastností při jednotlivých způsobech namáhání a na určování objektivních a reprodukovatelných parametrů mezních stavů umožňujících racionální navrhování konstrukcí. Při namáhání materiálu do jeho porušení při vzniku a růstu trhlin působí mikro a makromechanismy. Ty se projevují ve specifických mikro- a makromorfologiích lomu. Charakteristickým rysem je tvar faset, které se zkoumají pomocí elektronové mikroskopie transmisní a rastrovací (scanning). Je však potřeba rozlišovat křehký a houževnatý lom, jenž vychází z velikosti energie na vytvoření lomu. Lomy s nízkými hodnotami energie se označují jako křehké, lomy s vysokými hodnotami energie jako houževnaté[54]. Morfologie tvárného a křehkého porušení je vidět na obrázku Obr. 30.



Obr. 30 Příklad morfologie tvárného a křehkého porušení[58]

Zpravidla se morfologie lomové plochy rozlišuje na fasety štěpného porušení a fasety s jamkovou morfologií. Přitom se křehké lomy projevují nejčastěji fasetami štěpného porušení a houževnaté lomy fasetami s jamkovou morfologií. Záleží to však na daných kritériích.

Lzespecifikoval různá hlediska, která při vzniku lomu působí. Rozlišuje atomové mechanismy porušování, mikromechanismy porušování, mikroskopické hledisko, rozsah plastické deformace a energetickou bilanci [55].

Atomové mechanismy porušování

V tomto případě dochází k porušení účinkem:

- normálových napětí, kdy dochází k postupné ztrátě meziatomových vazeb na čele klínovitých trhlin. Ty jsou již buď vadou materiálu, nebo vznikají jako důsledek nahromadění dislokací.
- smykových napětí, kdy dochází k pohybu dislokací ve skluzových rovinách.

Mikromechanismy porušování

U kovů je téměř vyloučeno synchronní porušení meziatomových vazeb v lomovém průřezu. Proto při porušení cestou vzniku a rozvoje trhlin je potřeba hledat podstatu mikromechanismu v postupné, časově rozložené ztrátě vazby atomových dvojic tvořících čelo trhliny. Jelikož mikromechanismus porušování určuje způsob tvorby povrchu trhliny, projevuje se v morfologii lomových ploch. Díky elektronové fraktografii se rozlišují dva základní mikromechanismy porušení lomových ploch, a to:

a) Štěpné porušení

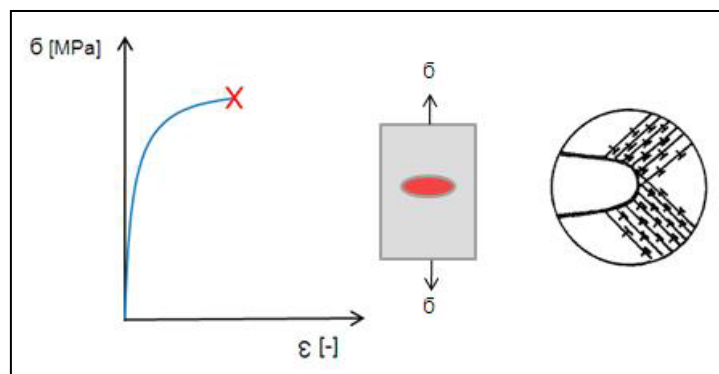
Při transkrystalickém štěpném porušení dochází k oddělování vrstev atomů účinkem normálových napětí podél štěpných rovin. Jde o proces tří na sebe navazujících etap: 1. etapa vzniku zárodků trhlin (etapa nukleace trhlin), 2. etapa pomalého, stabilního růstu zárodků trhlin (etapasubkritického růstu), 3. etapa rychlého, nestabilního růstu štěpných trhlin. Při štěpení a vzniku trhliny dochází vždy k plastické deformaci[56].

Interkrystalické štěpné porušení představuje asynchronní tahové porušení meziatomových vazeb(dekoheze).

Základní a obecnou příčinou tohoto porušení je relativní snížení pevnosti atomových vazeb na hranicích zrn ve srovnání s vazbami uvnitř zrn[55].

b) Tvárné porušení

Tvárné porušení rozlišuje dvě hlavní kategorie kritérií, a to založené na mikrostruktuře materiálu a změn, jenž závisí na vzniku a rozvoji porušení během procesu tváření a na makroskopických efektech mikroskopických procesů, které vedou k tvárnému lomu [55]. Houževnatý (tvárný) lom probíhá po předchozí plastické deformaci a z pravidla bývá doprovázen vznikem lokalizovaného zúžení. Lom je iniciován ve středu zúžené plochy zkušební tyče a šíří se v rovině, přibližně kolmo ke směru tahového napětí. V určité vzdálenosti od povrchu zkušební tyče se charakter lomu mění, lom probíhá dále ve směru největší složky napětí, přibližně pod úhlem 45° k ose tyče a má charakter smykového lomu. Rovněž tyto lomy na reálných tělesech jsou často kombinovány s jinými druhy lomů[57][59].

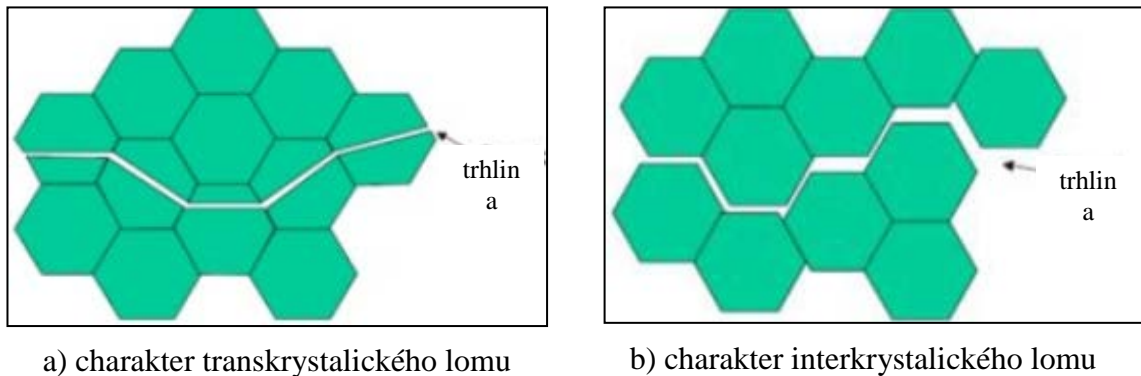


Obr. 31 Průběh vzniku tvárného lomu[59]

Za transkrystalické tvárné porušení se považují lomy s jamkovou (dutinovou) morfologií. Toto porušení seskládá ze tří etap: 1. nukleace mikroporuch, 2. růst mikroporuch, 3. koalescence mikroporuch. Růst je zprostředkováván plastickou deformací matrice, vyústováním lokálních skluzů na povrch defektu. Jinak pojem „tvárný lom“ není vždy jednoznačně chápán. Zpravidla se jimi označují lomy, které mají jamkovou morfologii a formují se prostřednictvím vzniku, růstu a koalescence mikroporuch v procesu plastické deformace[57].

Interkrystalické tvárné porušení jsou způsobeny procesy nukleace, růstu a koalescence mikroporuch lokalizovaných do oblasti hranic zrn, příp. z vysokoteplotních fází. Základní příčinu tvoří přítomné částice sekundárních fází

nadkritické velikosti na hranicích zrn anebo soustavy apriorních defektů na hranicích zrn. Přitom musí být střední plošná mezičásticová vzdálenost na hranicích zrn menší než střední plošná mezičásticová vzdálenost uvnitř zrn. Přitom na způsob rozvoje lomové trhliny může mít rozhodující vliv velikost krystalitů, fázová a strukturní heterogenita, příp. charakter dislokační substruktury a podmínky porušování (hlavně teplota, rychlost zatěžování a stav napjatosti). Charakter transkrystalického a interkrystalického porušení je naznačena na obrázku Obr. 32.



Obr. 32 Charakter transkrystalického a interkrystalického porušení[58]

Existují však i další speciální mikromechanismy porušování, mezi něž patří zejména únava a creep (deformace). Z hlediska makroskopické struktury se lomy skládají zpravidla z vlastního únavového lomu a koncového lomu. Existují různé mikromechanismy iniciace a růstu únavového lomu závislé na druhu materiálu, jeho nehomogenitě, amplitudě působícím napětí, frekvenci, vlivu okolí apod. Z creepu je potřeba rozlišovat tvárné porušování materiálu při zvýšených teplotách a klasické creepové porušování. Creepové lomy vznikají v procesu tečení prostřednictvím vzniku a rozvoje mezizrnných kavit a trhlin, jenž vedou k interkrystalickému porušení bez výrazné makroplastické deformace. Rozlišuje se creep dislokační, difúzní, pokluzový a superplasticita[55].

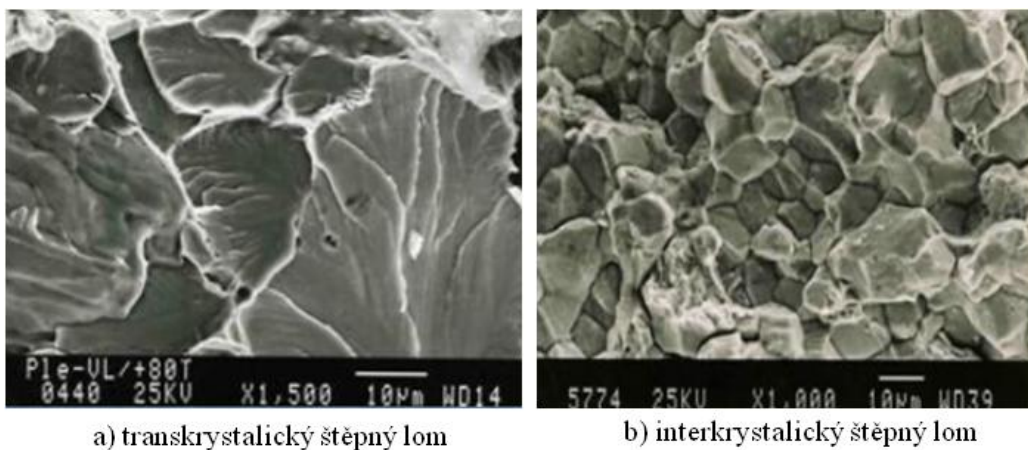
7.1.1 Mikroskopické hledisko při klasifikaci lomů

V mikroskopickém měřítku jsou lomy hodnoceny jako houževnaté při tvárné separaci, křehké při vzniku transkrystalickým štěpením, interkrystalickým oddělením, příp. dekohezi hraničních oblastí.

7.1.2 Makroskopická hlediska při klasifikaci lomů

Rozlišují se hlediska:

- podle rozsahu plastické deformace, která předchází a provází růst lomové trhliny. Zjednodušeně se dělí na křehké a houževnaté, příp. podle velikosti plastické deformace na křehké do 1 promile, kvazikřehké do 1 %, kvazihouževnaté do 5 %, houževnaté nad 10 %. Rovněž je potřeba rozlišovat lomy hodnocené vizuálně (makroměřítko) nebo podle způsobu růstu lomové trhliny (mikroměřítko). Všechny druhy interkystalických lomů a transkystalických štěpných lomů (Obr. 33) se zdají vizuálně křehké, stejně ty s transkystalickým tvárným porušením.



Obr. 33 Ukázka transkystalického a interkystalického štěpného lomu [64]

- podle velikosti spotřeby energie pro porušení, jelikož vznik lomu v makroskopickém měřítku křehkým způsobem, je charakterizováno nízkou spotřebou energie do porušení. Naopak makroskopicky houževnatý lom se vyznačuje vysokou spotřebou energie do porušení. Tohoto energetického kritéria se také využívá k rozlišení makroskopicky křehkých lomů (nízkoenergetické roztržení) a makroskopicky houževnatých lomů (vysokoenergetické roztržení), které se oba vytvářejí mikromechanismem tvárného porušení. Další proces, který je doprovázen zpravidla velmi malým podpovrchovým rozptylem energie, je energeticky málo náročný a vede zpravidla ke křehkým lomům, je štěpení [55].

- dle potřeby dodávání energie mezi elastickou energií uvolněnou během růstu lomové trhliny a vynaloženou prací proti růstu trhliny. Dělí lomy na stabilní (při porušování roste lomová trhlina jen při soustavné energetické dotaci z vnějšku) a nestabilní, kdy při porušování roste lomová trhlina náhle, nekontrolovaně elastickou energií nahromaděnou v tělese. Přitom každý nestabilní lom je v makroskopickém měřítku křehký[54].

Tyto mikromechanismy se uplatňují při přetížení statickém a rázovém, při speciálních podmínkách namáhání (únava, creep) mohou být částečně modifikované.

7.1.3 Křehký lom ocelových částí

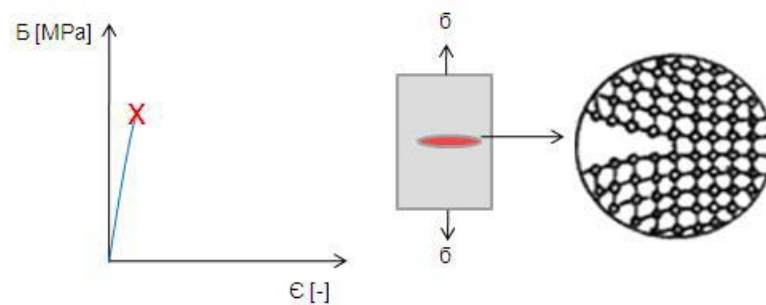
Křehký lom probíhá při napětí blízkém mezi pružnosti, bez zřetelné plastické deformace viz obrázek Obr. 34. Proces křehkého porušení tělesa s ostrou trhlinou skládá z několika etap. Nejprve dochází k otupení (zaoblení) původně ostrého čela trhliny. Poté k malému nárůstu trhliny, pomalému stabilnímu (subkritickému) růstu trhliny a k jejímu rychlému nestabilnímu růstu (křehkému lomu). Náhlý křehký lom vzniká při napětích nižších, než je makroskopická mez kluzu, navíc za podmínek nestabilního růstu lomové trhliny[56]. Nezanedbatelně působí na subkritický růst i cyklické namáhání (ať již na vzduchu nebo v korozivním prostředí) nebo stálé zatížení v korozivním prostředí (koroze za napětí).

Tyto okolnosti nebo snižování lomové houževnatosti v důsledku cyklického namáhání, koroze a zkřehnutí (vodíkem, neutronovým zářením) vedou ke konečnému porušení náhlým křehkým lomem. Tento sklon závisí zejména na geometrii tělesa a trhliny, mechanických vlastnostech (na chemickém složení, struktuře, mezi kluzu, houževnatosti) a na vnějších podmínkách (především na teplotě, stavu napjatosti, rychlosti deformace a velikosti tělesa).

Náhlý křehký lom se vyskytuje u ocelí nízké a střední pevnosti (tj. u nízkouhlíkových a nízkolegovaných ocelí s mezí kluzu pod 1250 MPa), které mají tranzitní chování s mechanismem vysokoenergetické tvárné separace nebo s nízkoenergetickým transkrystalickým štěpením. Dále se vyskytuje u ocelí vysoké pevnosti (tj. u ocelí s mezí kluzu nad 1250 MPa) prakticky v celém rozsahu teplot používaných při jejich aplikacích. V mikroskopickém měřítku jde o tvárné porušení

(koalescenci) dutin. Rovněž je u ocelí s oslabenými hranicemi zrn zkřehnutím a u velmi tenkých plechů (bez ohledu na pevnost).

Za určitých okolností můžou rovněž nastat časově závislé lomy. V tomto případě konečnému porušení náhlým křehkým lomem předchází pomalý (subkritický) růst trhliny a snižování houževnatosti. Ke konečnému porušení náhlým křehkým lomem dochází zpravidla únavou, tečením, korozí pod napětím (korozní praskání), zkřehnutím v prostředí roztavených kovů (některé kovy a slitiny ve stavu napjatosti), vodíkovým zkřehnutím nebo zkřehnutím vlivem neutronového záření[54].



Obr. 34 Průběh křehkého lomu[59]

8. Cíle experimentální části

Hlavní přínos disertační práce spočívá v objasnění a v nalezení příčiny vzniku plastické nestability při technologii výroby karosářského výlisku. Tato nestabilita se projevuje vznikem trhlin, které jsou vidět na obrázku Obr. 35. V experimentální části je provedena materiálová i technologická analýza, která je nutná pro komplexní objasnění a rozšíření poznatků v oblastech tváření karosářských výlisků, a to především vlivu použitého materiálu na rozvoj plastické deformace v oblastech mezních přetvoření.

Získání nových poznatků na základě řady experimentálních měření z oboru teorie tváření kovů a materiálového inženýrství slouží k rozšíření znalostí v oboru problematiky tváření nepravidelných karosářských výlisků.

Jednotlivé cíle experimentální části jsou shrnuty do následujících bodů:

1. Na základě dostupných poznatků z praktického lisování nalézt pro analýzu dva materiály stejné jakosti z odlišných svitků, které vykazují různorodé chování v mezních oblastech plastické deformace.
2. Provedení standardních mechanických zkoušek a zjištění ukazatelů tvařitelnosti testovaných materiálů za účelem možné identifikace jejich rozdílného deformačního chování. Naměřené mechanické hodnoty konfrontovat s deklarovanými hodnotami z materiálových listů a atestů předepsaných zákazníkem a odpovídající platným normativům.
3. Stanovení deformačního chování testovaných materiálů v závislosti na stavu napjatosti (DMP) a určení průběhu a velikosti deformace v oblastech mezních přetvoření pro zvolené charakteristické stavy napjatosti.
4. Pomocí materiálových analýz objasnit možný vliv struktury materiálu na rozvoj plastické deformace a případně identifikovat a detekovat nežádoucí fáze či sloučeniny ovlivňující její velikost.

Uvedené poznatky a rozborů poznatků jsou uvedeny níže v dílčích kapitolách této práce.

9. Nalezení vhodného materiálu pro experiment

Na základě dlouhodobých zkušeností a statistických záznamů kvality byl patrný zvýšený výskyt tvorby trhlin na postranici vozu (Rám Combi pravý), oproti ostatním lisovaným dílům. Z tohoto důvodu byl vybrán tento díl, který patří do skupiny extrémně náročných karosářských výlisek a to vzhledem k technologii výroby. Se zaměřením na tento výlisek proběhlo sledování lisovacího cyklu pro zachycení dílů (vstupního materiálu), na kterých se objevily zmíněné kvalitativní problémy. Posléze došlo k zajištění problematického svitku použitého pro nástřihy jako vstupní materiál, společně se svitkem o stejné jakosti, který nevykazoval kvalitativní neshody během výroby těchto dílců. Svitky byly odebrány z materiálu s označením DC 06 ZE 50/50 BPO (DIN EN 10 152) o jmenovité tloušťce 0,75 mm. Jelikož se tvorba trhlin projevovала náhodně, bylo nutné věnovat delší časové období při sledování výrobního procesu lisovací linky. Místo ve kterém došlo k porušení na sledovaném díle, bylo vyzorováno v oblastech „C-Sloupku“ viz obrázek Obr. 35.



Obr. 35 Postranice vozu se znázorněným místem trhliny a samotnou trhlinou

V Tab. 3 jsou porovnány materiály z dvou různých svitků stejné jakosti, kde se jako referenční svitek vybral materiál, který při lisování nevykazoval žádné vážnější problémy. Pro zjednodušení následného značení bude dále v práci referenční svitek označen jako **D** – **dobrý** a svitek, který vykazuje trhliny jako **V** – **vadný**.

Tab. 3 Vybrané svitky pro experimentální část

Použitý svitek	Datum lisování	Číslo svitku	Dávka	Směna	Pozorované závady
Svitek „D“	25. 9. 2010	6503210000	600 ks.	ranní	bez závad
Svitek „V“	15. 3. 2011	9465020000	600 ks.	noční	trhliny

10. Ověření mechanických hodnot vybraných materiálů

Z důvodu ověření korektnosti materiálových hodnot deklarovaných výrobcem, došlo k realizaci průvodních zkoušek. Jedná se o normalizovanou statickou zkoušku tahem, zjišťující základní hodnoty mechanických vlastností. Dále pak měření drsnosti povrchu.

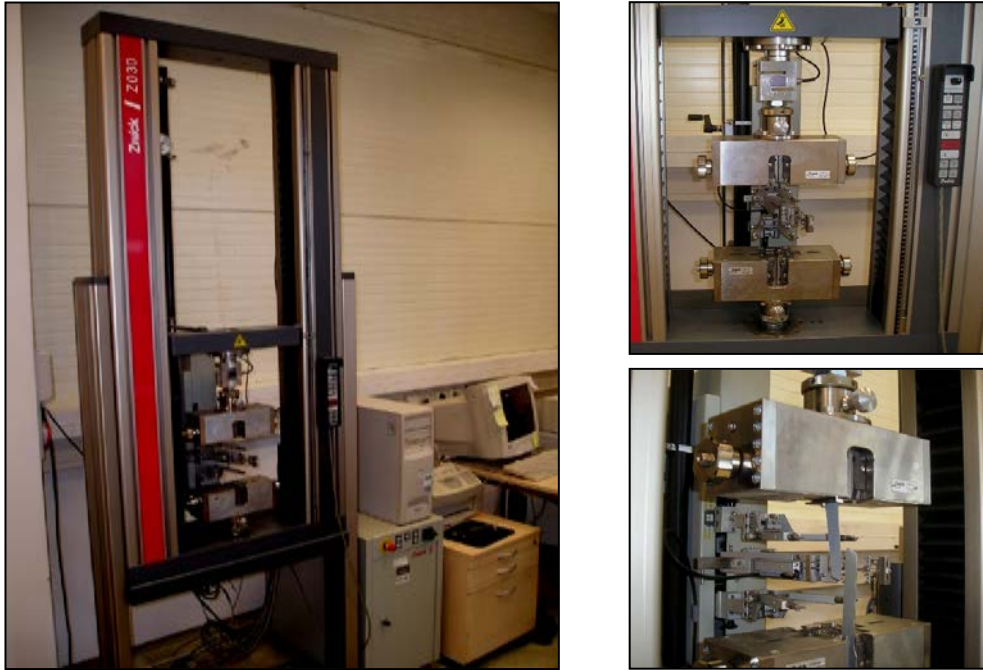
10.1 Statická zkouška tahem

Statická zkouška jednoosým tahem je základní zkouška materiálu, pomocí které se zjišťují informace o základních mechanických vlastnostech materiálu. Zkouška je využívána pro hodnocení mechanických vlastností materiálu. Podmínky zkoušky, zejména teplota a rychlost zatěžování jsou předepsány normou. Při zkoušce se zaznamenává zatěžující síla F a jí odpovídající deformace. Jedná se o rozšířenou zkoušku v technické praxi, která je jednoduchá, účelná a časově nenáročná. Zkušební vzorky jsou plošného tvaru (pro plechy), které se zatěžují jednoosým tahem až do porušení soudržnosti cílem zjistit napětíové a deformační charakteristiky. Zkoušky kovových materiálů tahem se v ČR řídí normou ČSN EN ISO6892-1[39].

K realizaci zkoušky tahem a zjištění mechanických vlastností byl použit trhací stroj Zwick/Z030 (Obr. 36), který je ve ŠKODA AUTO a.s. běžně využíván k podobným úkonům.

Parametry trhacího zařízení:

- | | |
|------------------------------|----------------------|
| ➤ jmenovité zatížení | 100 kN |
| ➤ rychlost příčnicku | 0,001 – 200 mm/min. |
| ➤ rozlišovací úroveň systému | 0,0087 μm |
| ➤ frekvence přenosu dat | 50 Hz |
| ➤ nutné příslušenství | software Zwick |



Obr. 36 Trhačka Zwick/Z030 (vlevo kompletní zařízení, v pravé části jsou zobrazeny upínací čelisti s průtahoměrem)

Základní materiálové charakteristiky testovaných materiálů byly stanoveny zkouškou tahem, kde zkušební vzorky se odebraly ve směrech 0° , 45° , 90° vůči směru válcování. Pro testované materiály se hodnoty materiálových charakteristik vždy stanovily ze souboru 5 vzorků. Tvar a rozměry zkušebních tyčí jsou v souladu s normou a byly zhotoveny pomocí střížného nástroje. Rovněž metodika provedení zkoušky je v souladu s výše uvedenou normou ČSN EN ISO6892-1 [39].

Průběh zkoušky:

Vzorky byly odebrány pro tyto směry:

- kolmo na směr válcování (90°),
- 45° ke směru válcování,
- podél směru válcování (0°).

Každý zkušební vzorek byl ještě jednou zvlášť prohlédnut a jeho tloušťka přeměřena digitálním posuvným měřidlem MitsuToyo, které měří s přesností 0,01 mm. Vlastní průběh zkoušky byl zaznamenáván a průběžně vyhodnocen počítačem. Programované vybavení v připojeném počítači vyhodnocuje všechny základní charakteristiky ($R_{p0,2}$, R_m , A_{80} , A_g , n , r).

Stanovení exponentu deformačního zpevnění n bylo v souladu s normou EN 10130:1991. Z hlediska tvařitelnosti je nutné tyto parametry posuzovat společně, proto bylo využito komplexního ukazatele tvařitelnosti KUT, který je dán vztahem:

$$KUT = \frac{R_m}{R_{p0,2}} \cdot A [-] \quad (4)$$

Hodnoty materiálových charakteristik zjištěné popsáním způsobem byly zpracovány do tabulek (Tab. 4 a Tab. 5), kde jsou uvedeny střední hodnoty (výběrové průměry) charakteristik v jednotlivých směrech doplněny o hodnotu směrově střední dle vztahu:

$$x_s = \frac{(x_0 + 2x_{45} + x_{90})}{4} \quad (5)$$

10.2 Diskuze výsledných hodnot

Výsledné hodnoty jsou zpracovány pomocí grafických a tabulkových výstupů, které jsou součástí přílohy této práce. Jmenovitá tloušťka pro svitek „D” byla 0,75 mm (tolerance rozměrů dle EN 10 143). Skutečná tloušťka byla naměřena 0,74 mm.

Tab. 4 Výsledky mechanických hodnot pro materiál „D” ve třech směrech

Směr $n = 5$	90 °	45 °	0 °	x_s
$R_{p0,2}$ [MPa]	137	141	135	138
$\Delta R_{p0,2}$ [MPa]	1	2	1	
R_m [MPa]	277	282	282	280
ΔR_m [MPa]	2	1	2	
A_{80} [%]	48,8	48,1	49	48,6
ΔA_{80} [%]	0,9	1,5	1	
A_g [%]	25,6	25,7	26,9	26,06
ΔA_g [%]	0,1	0,4	0,2	
KUT	98,67	96,2	102,36	
r [-]	2,63	2,23	2,05	2,3
n [-]	0,24	0,236	0,246	0,241

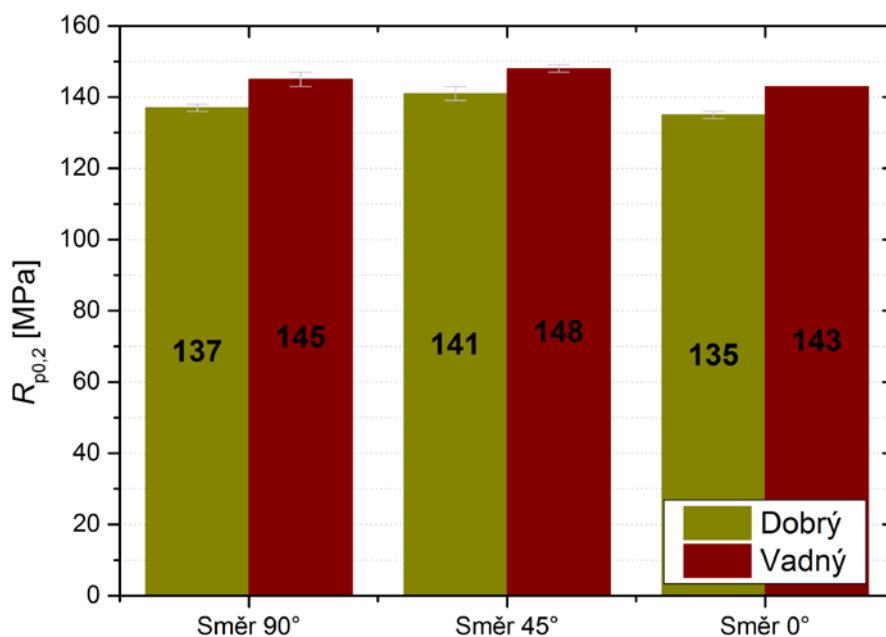
Jmenovitá tloušťka pro svitek „V” byla 0,75 mm (tolerance rozměrů dle EN 10 143).

Skutečná tloušťka byla naměřena 0,74 mm.

Tab. 5 Výsledky mechanických hodnot pro materiál „V” ve třech směrech

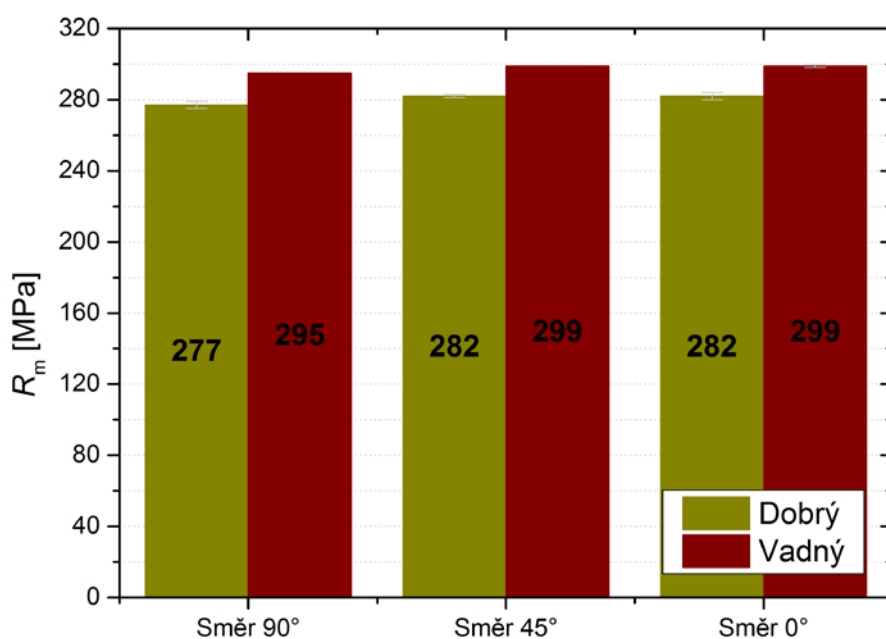
Směr n = 5	90 °	45 °	0 °	x_s
$R_{p0,2}$ [MPa]	145	148	143	145
$\Delta R_{p0,2}$ [MPa]	2	1	0	
R_m [MPa]	295	299	299	298
ΔR_m [MPa]	0	0	1	
A_{80} [%]	46,1	45,8	47,3	46,4
ΔA_{80} [%]	0,6	0,7	1	
A_g [%]	24,3	25	25,9	25,06
ΔA_g [%]	0,2	0,2	0,7	
KUT	93,79	92,53	98,9	
r [-]	2,5	2,03	1,94	2,15
n [-]	0,227	0,226	0,235	0,229

Naměřené a vypočtené hodnoty jsou přehledně zobrazeny v následujících grafech. Na obrázku Obr. 37 jsou vyneseny hodnoty meze kluzu ($R_{p0,2}$) pro vzorky zhotovené z dobrého svitku („D”) a pro vzorky z vadného svitku („V”). Z grafu je patrná vyšší hodnota meze kluzu pro materiál vadný a to pro všechny směry odebrání vzorků vzhledem ke směru válcování. Nejvyšší hodnoty byly naměřeny u vadného svitku pro směr 45°, naopak nejnižší u dobrého materiálu pro směr 90°. Rozdíly mezi dobrým a vadným svitkem pro jednotlivé směry jsou téměř shodné, kde změna se pohybuje v rozmezí 5%.



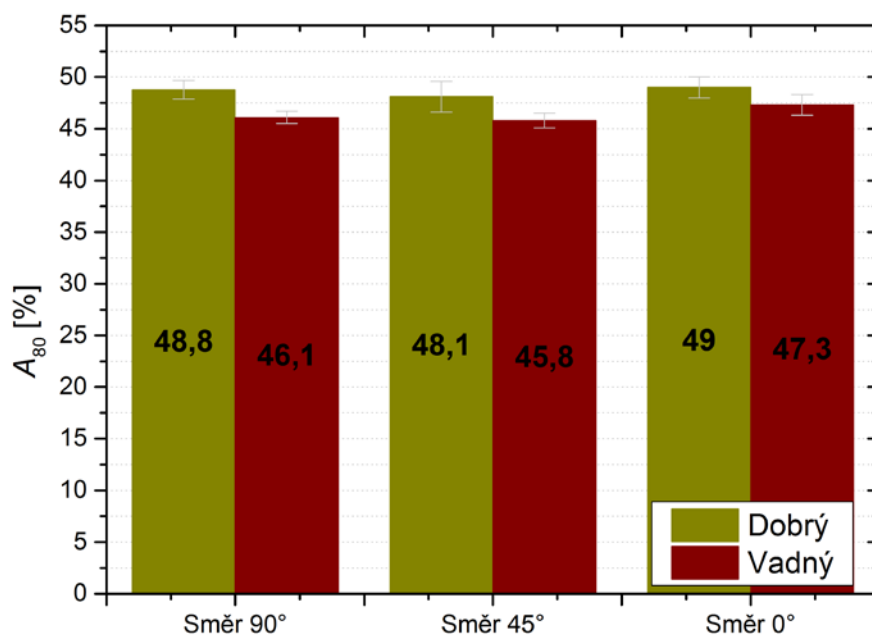
Obr. 37 Porovnání meze kluzu pro dobrý a vadný materiál

Na obrázku Obr. 38 jsou vyneseny hodnoty meze pevnosti R_m . Zde je stejný trend jako u meze kluzu, kde vzorky z vadného svitku disponují vyšší mezí pevnosti oproti dobrému materiálu. Nejvyšší hodnoty je shodně dosaženo u materiálu vadného ve směru 45° a 90°. Naopak nejnižší pevnost byla naměřena u vzorku z dobrého materiálu pro směr 90°. Maximální rozdíl hodnot mezi dobrým a vadným materiálem je 5,68 %.



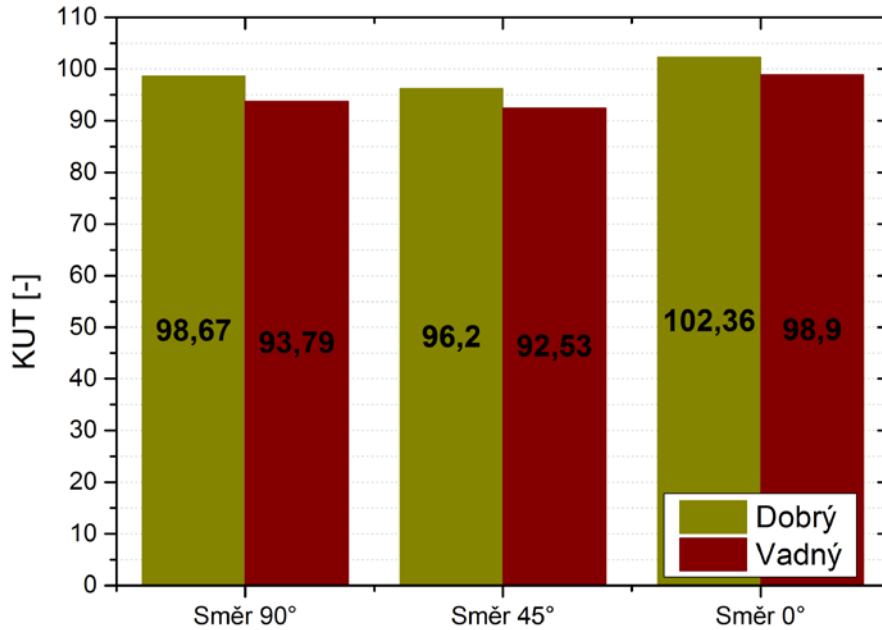
Obr. 38 Porovnání meze pevnosti pro dobrý („D“) a vadný („V“) materiál

Graf na obrázku Obr. 39 znázorňuje velikosti tažností pro jednotlivé materiály. Při experimentálním měření byl použit průtahoměr se vzdáleností měřících čelistí 80 mm, takže se jedná o hodnoty tažností A_{80} . Zde je opačný trend jak u meze kluzu, tak u meze pevnosti a to ve větších hodnotách u dobrého materiálu. U dobrého materiálu nejsou výrazné rozdíly, hodnoty tažnosti se pohybují okolo 49%. Nejvýraznější rozdíl mezi dobrým a vadným materiálem je viditelný ve směru 90° , který činí rozdíl vyjádřený v procentech 5,53%.



Obr. 39 Porovnání tažnosti pro dobrý („D“) a vadný („V“) materiál

Pro lepší přehled schopnosti materiálu se plasticky tvářet se používá komplexní ukazatele tvařitelnosti KUT, který udává hodnoty vypovídající o vhodnosti materiálu pro tažení. Větší KUT znamená vyšší schopnost tvařitelnosti. Na obrázku Obr. 40 jsou vyneseny hodnoty KUT, kde je patrná nejlepší schopnost pro tváření ve směru 0° u dobrého materiálu. Ve všech směrech je u vzorků zhotovených z dobrého materiálu ukazatel tvařitelnosti vyšší. Největšího rozchod hodnot mezi dobrým a vadným materiálem je pozorován ve směru 90° , který činí rozdíl vyjádřený v procentech 4,94 %.



Obr. 40 Porovnání KUT pro dobrý („D”) a vadný („V”) materiál

Na základě výše uvedených grafů lze jednoznačně konstatovat vyšší mez kluzu a pevnosti pro vzorky z vadného svitku. Velikost tažnosti naopak u vadného svitku vykazuje nižší hodnoty. Tento průběh by mohl být způsoben např. zvýšeným podílem perlitické fáze na úkor tvárné fáze feritu. Komplexní ukazatele tvařitelnosti dávají informaci o materiálu „D”, který je schopen se lépe plasticky deformovat, takže pro tváření je vhodnější oproti materiálu „V”.

Naměřené mechanické hodnoty byly porovnány s mechanickými hodnotami požadovanými pro danou jakost materiálu a konfrontovány s hodnotami deklarovanými výrobcem materiálů. Na základě těchto porovnání je možné konstatovat, že oba testované materiály (materiál „D” a „V”) splňují dané normy a výrobcem udávané mechanické hodnoty se shodují s naměřenými hodnotami. Z výsledků prvních analýz tak bylo patrné, že predikce následně problematického materiálu je na základě provedené statické zkoušky tahem prakticky nemožná. Oba materiály jsou z tohoto pohledu vhodné a nemohou být dále předmětem reklamačního řízení.

Kompletní výsledky získané pomocí zkoušky tahem, jsou součástí této práce v příloze P1 a P2.

10.3 Měření drsnosti povrchu

Drsnost povrchu testovaných materiálů byla měřena ve spolupráci s laboratoří přesného měření ŠKODA Auto a.s. Mladá Boleslav. Měření bylo provedeno na přístroji MAHR MARSURFPS1, který je znázorněn na obrázku Obr. 41.



Obr. 41 Drsnoměr MAHRMARSURFPS1[60]

Podmínky pro měření povrchů zkoušených materiálů jsou vidět v tabulce 6 a vycházejí z DIN EN ISO 4288:1998 a DIN EN ISO 3274:1998.

Tab. 6 Podmínky měření drsnosti povrchu

Mezní vlnová délka λ_c (l_c) [mm]	2.5
Měřená délka l_n [mm]	12.5
Celková délka l_t [mm]	17.5
Rádus hrotu r_{Spmax} [μm]	5.0

Měřicí přístroj MAHR MARSURFPS1 pracuje vždy s jedním z pěti možných programů. Přístroj provádí měření v šesti cyklech, z nichž se jeden (s největším rozptylem hodnot) automaticky odfiltruje. Výsledkem jsou potom průměrné hodnoty zjištěné z pěti nezávislých cyklů. Měření proběhlo přiložením měřicího snímače na povrch plechu ve směru rovnoběžném a kolmém vůči směru válcování v souladu s předpisem SEP 1490 dle normy pro hutní výrobu[60][37]. V obou případech bylo provedeno pět měření drsnosti povrchu na vnější a vnitřní straně plechu. Výsledky měření jsou stanoveny v Tab. 7.

Tab. 7 Drsnosti naměřené na povrchu přístřihů pro materiály „D” a „V”

Zjišťované veličiny	Svitek „V“		Svitek „D“	
	Vnitřní strana	Vnější strana	Vnitřní strana	Vnější strana
Ra [μm]	1,18	1,17	1,31	1,35
Δ Ra	0,04	0,05	0,02	0,04
Rz [μm]	7,26	6,74	7,34	7,55
Δ Rz	0,55	0,12	0,25	0,44
RPc [cm⁻¹]	101	104	98	89
Δ RPc	2,55	3,15	1,14	1,44

10.4 Diskuze výsledných hodnot

Ukazatelé hodnoty drsností mají významný vliv na kvalitu povrchu. Z hlediska tváření musí povrch plechu splňovat určitá kritéria tak, aby byla zajištěna finální kvalita povrchové vrstvy daného dílce a to s ohledem na následné procesy výroby spjaté s konečnou podobou karosářského dílce (lakování, svařování).

Kladené kritéria vzhledem k technologii tváření za studena je možné obecně popsat následovně:

- vzhledem ke schopnosti přilnavosti mazadla a zabránění poškození původní struktury
- vzhledem ke schopnosti přenášet vysoké kontaktní tlaky, ke kterým dochází při tváření za studena mezi funkčními částmi lisovacího nářadí

Hodnoty Ra vyjadřují aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic a Rz je součet výšky nejvyššího výstupku profilu a nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky. Vnější stranou je myšlena vnější plocha plechového svitku použitého pro nástřihy, vnitřní strana je plocha vně svitku.

Na základě naměřených hodnot tvrdostí je mírný rozdíl mezi vadným a dobrým svitkem, kde nižší hodnoty Ra vykazuje vadný svitek. Tvrdost Ra není výrazně odlišná v závislosti na měřené straně svitku. Součet výšky nejvyššího výstupku profilu a nejnižší prohlubně profilu Rz je v nejnižší míře analyzován na vnější straně vadného svitku. Pro zbylé plochy hodnoty Rz nevykazují výrazné rozdíly.

Výsledné hodnoty byly porovnány s kmenovou kartou materiálu, která odpovídá podmínkám zákazníka a dále porovnány s dostupnými výsledky z předchozích měření u jakostně podobných materiálů. Předepsané hodnoty drsnosti požadované zákazníkem jsou stanovené pro hodnotu Ra v rozmezí 1,0 až 1,5 [μm] a minimální hodnota RPC nesmí být nižší než 60 [cm^{-1}]. Na základě porovnání výsledných hodnot obou materiálů nevykazují výše popsané ukazatele významnějších odchylek, které by mohly mít vliv na vznik trhlin v oblastech mezních přetvoření. Oba zkoušené materiály „D“ i „V“ v tomto případě splňují předepsané hodnoty drsnosti dané předpisem zákazníka (kmenová karta) a nelze je podstoupit reklamačnímu řízení.

Příslušná kmenová karta je uveden v příloze této práce pod číslem P3.

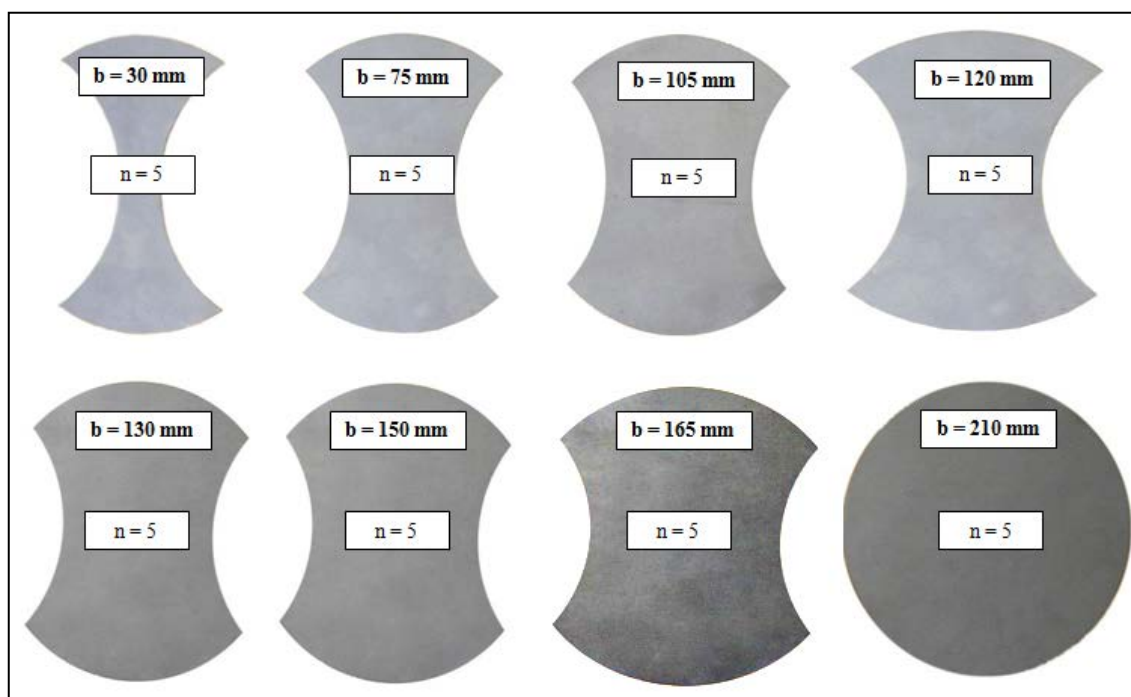
11. Sestavení diagramů mezních přetvoření

Jelikož bylo nutné pro následné rozборы co nejlépe poznat a zmapovat chování zkoušených materiálů, byly pro tyto účely sestaveny diagramy mezních přetvoření společně s určením křivek určující mezní oblasti. Hlavním cílem sestavení těchto diagramů bylo sledování průběhu tvařitelnosti zkoušených vzorků materiálů s označením „D“ a „V“.

K určení a stanovení DMP (KMP) byl využit optický systém ARAMIS popsáný v kapitole 6.3.1. Metodika vyhodnocení a sestavení DMP (KMP) odpovídá a je popsána dle ISO/DIS 12004-2 [59].

11.1 Analýza mezních přetvoření pomocí systému ARAMIS

K následné analýze byly nejprve připraveny zkušební série vzorků, které měli za úkol svým proměnným tvarem geometrie přístřihu monitorovat různé stavy napjatosti. Pro vytvoření DMP (KMP) byly zhotoveny série vzorků pro materiál „D“ a „V“ a to tak, že od každé deformační stopy bylo připraveno 5 vzorků. Přístřihy vzorků pro materiál „D“ jsou na obrázku Obr. 42.



Obr. 42 Sestava zkušebních vzorků pro materiál „D“ (analogicky pro materiál „V“)

Na takto připravené vzorky byl nanesen stochastický povlak (pattern), který se zhotoví aplikací bílé a posléze černé barvy na povrch. Systém ARAMIS na základě tohoto vzoru přiřadí každému bodu charakteristické číslo (charakteristický odstín šedi) a nanese vlastní síť. Měření deformace probíhá snímáním posunu těchto bodů a deformace sítě. Příklad takto vzniklého patternu je na obrázku Obr. 43.



Obr. 43 Zkušební vzorek s naneseným stochastickým vzorem

Takto připravené vzorky byly umístěny a dále deformovány pomocí zkušebního zařízení CBA300. Rozmístění pracoviště pro snímání a měření deformací je na obrázku Obr. 44. Uspořádání pracoviště při snímání deformace pomocí systému ARAMIS. Nejprve však bylo nutné provést kalibraci systému (snímacích kamer) pomocí kalibrovací destičky, které bylo popsáno v kapitole 6.3.1. Kritériem pro ukončení procesu snímání a celé zkoušky byl vznik trhliny na zkušebním vzorku.

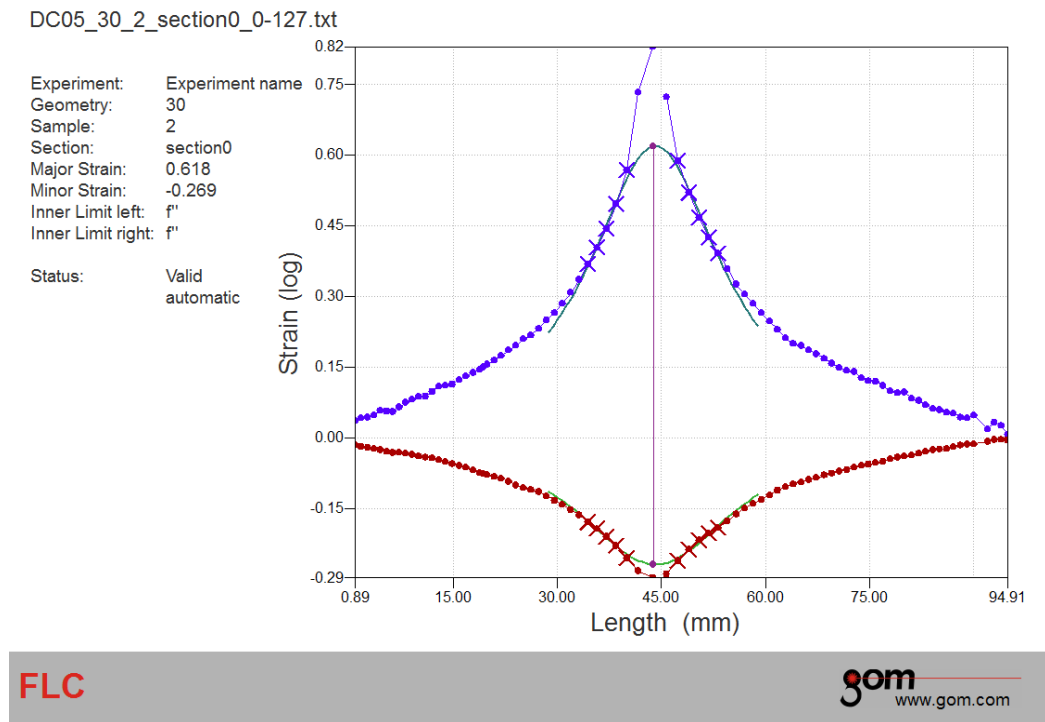


Obr. 44 Uspořádání pracoviště při snímání deformace pomocí systému ARAMIS

11.1.1 Výsledné hodnoty

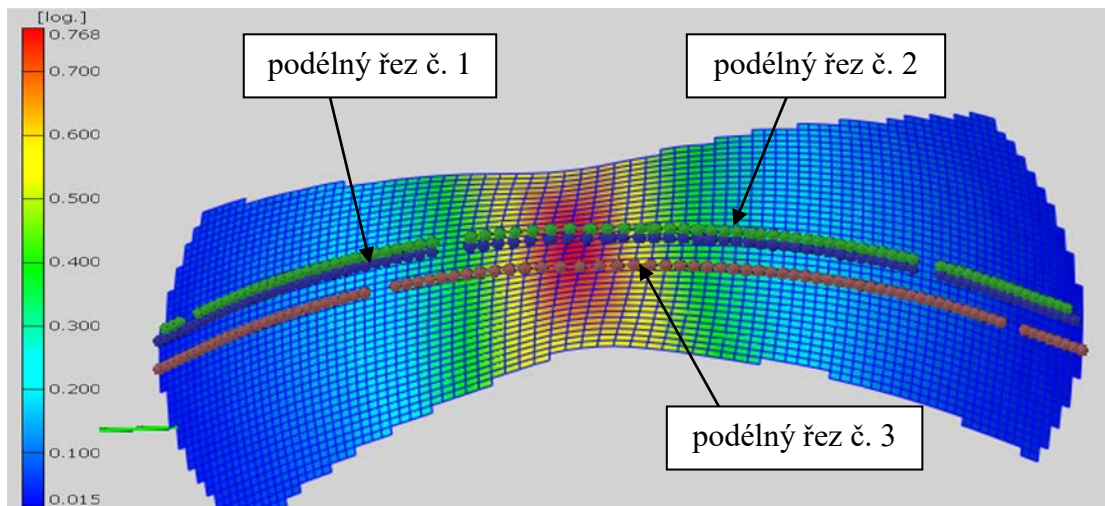
Systém ARAMIS vyexportoval z naměřených dat průběhy hlavního a vedlejšího přetvoření. Ale tyto hodnoty nelze použít jako výsledné hodnoty k sestavení DMP a to proto, že při tváření za mezí pevnosti nastává nestabilita. Na toto pamatuje norma ISO/DIS 12004-2 [62].

Tato norma upravuje výsledné hodnoty získané pomocí systému ARAMIS tak, aby bylo možné získat hodnoty, které jsou v oblastech mezních přetvoření, neboli v těsné blízkosti trhliny na zkušebním vzorku. V této oblasti pak došlo k proložení třech podélných řezů, jež měli za úkol monitorovat průběh velikosti hlavních a vedlejších deformací. Tyto podélné řezy byly umístěny v těsné vzdálenosti od sebe a zároveň co nejbližše vzniku trhliny. Dále pak systém ARAMIS pracuje s hodnotami, které leží v okolí vzniku trhliny. Tyto hodnoty pak pomocí matematických závislostí vynáší do standardizovaných protokolů. Grafické zobrazení takto upravených hodnot je uvedeno na obrázku Obr. 45.

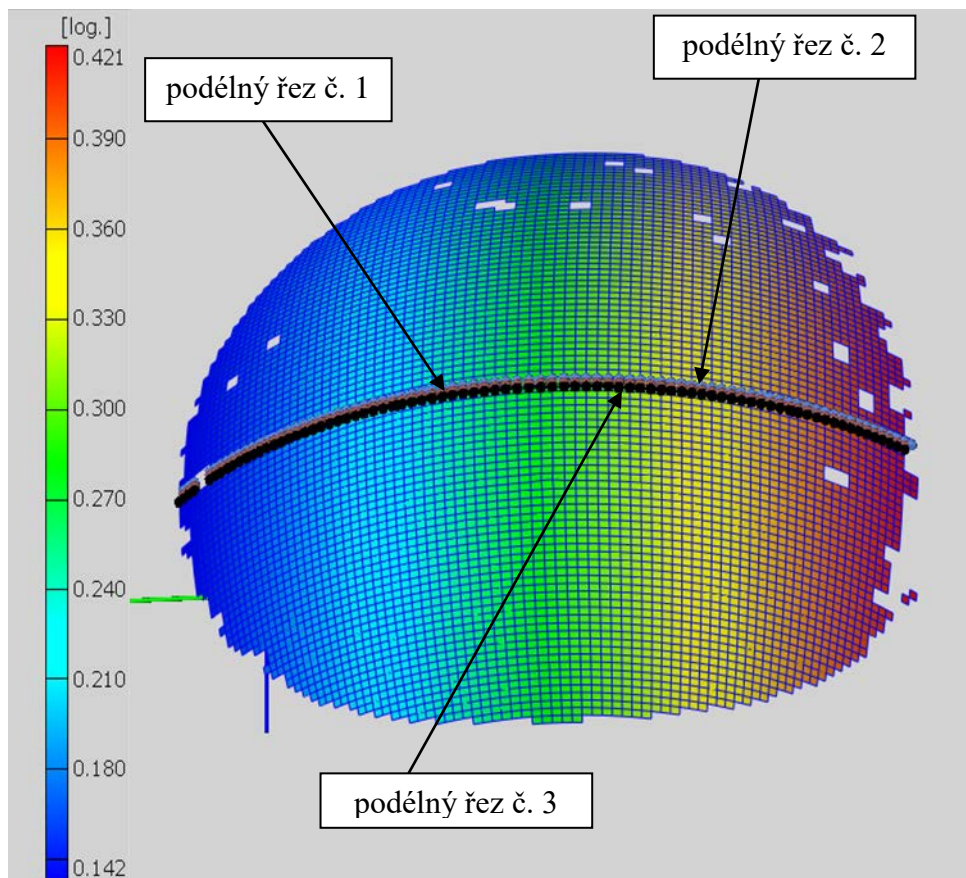


Obr. 45 Rozložení hlavního přetvoření φ_1 (modře) a vedlejšího přetvoření φ_2 (červeně) po provedeném výpočtu dle normy [62]

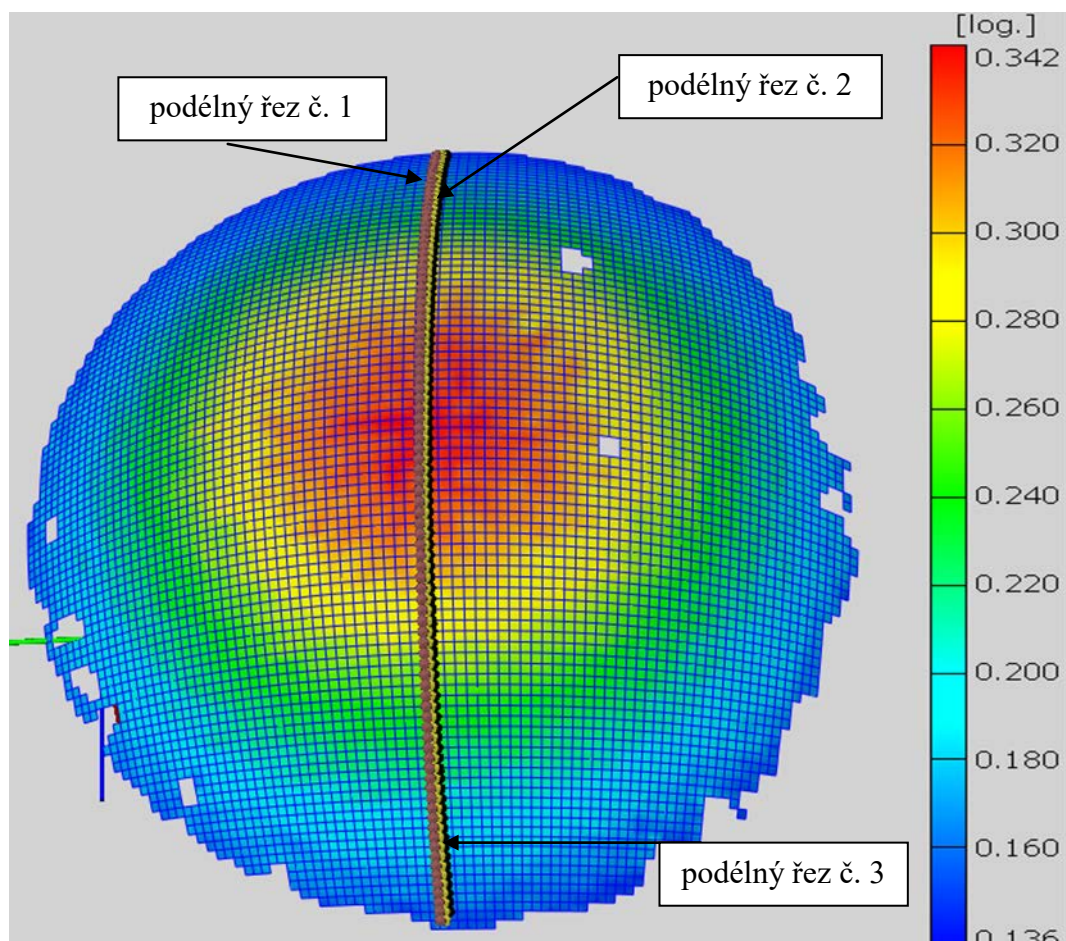
Tyto úpravy dle ISO/DIS 12004-2 byly provedeny pro všechny měřené vzorky. Na obrázcích Obr. 46, Obr. 47 a Obr. 48 jsou zobrazeny příklady rozložení deformací na vzorku ve zvolených podélných řezech u zkušebních vzorků o šířce = 30 mm, 120 mm a 210 mm pro materiál „D“.



Obr. 46 Příklad rozložení podélných řezů pro zkušební vzorek $b = 30$ mm, materiál „D“

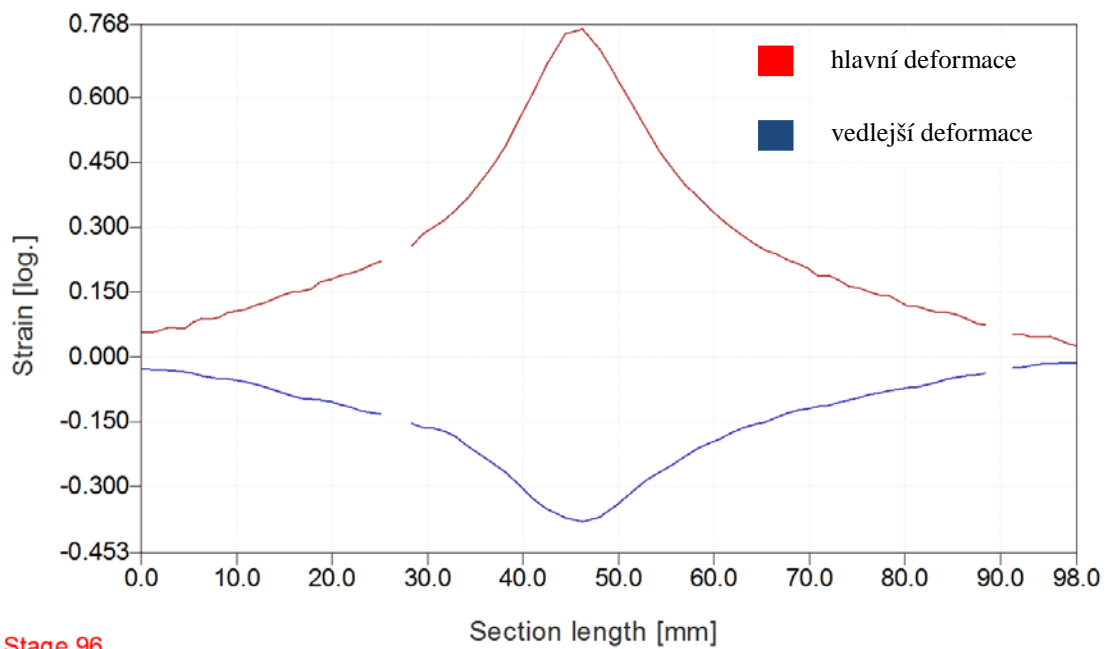


Obr. 47 Příklad rozložení podélných řezů pro zkušební vzorek $b = 120$ mm, materiál „D“



Obr. 48 Příklad rozložení podélných řezů pro zkušební vzorek $b = 210$ mm, materiál „D“

Pro takto sestavené zkušební vzorky byly dále vygenerovány průběhy hlavních a vedlejších deformací v oblastech podélných řezů. Pro příklad průběhu těchto deformací jsou na obrázcích Obr. 49, Obr. 50 a Obr. 51 znázorněny průběhy hlavních a vedlejších deformací pro podélné řezy č. 1, u vzorků s $b = 30$ mm, 120 mm a 210 mm materiál „D“.

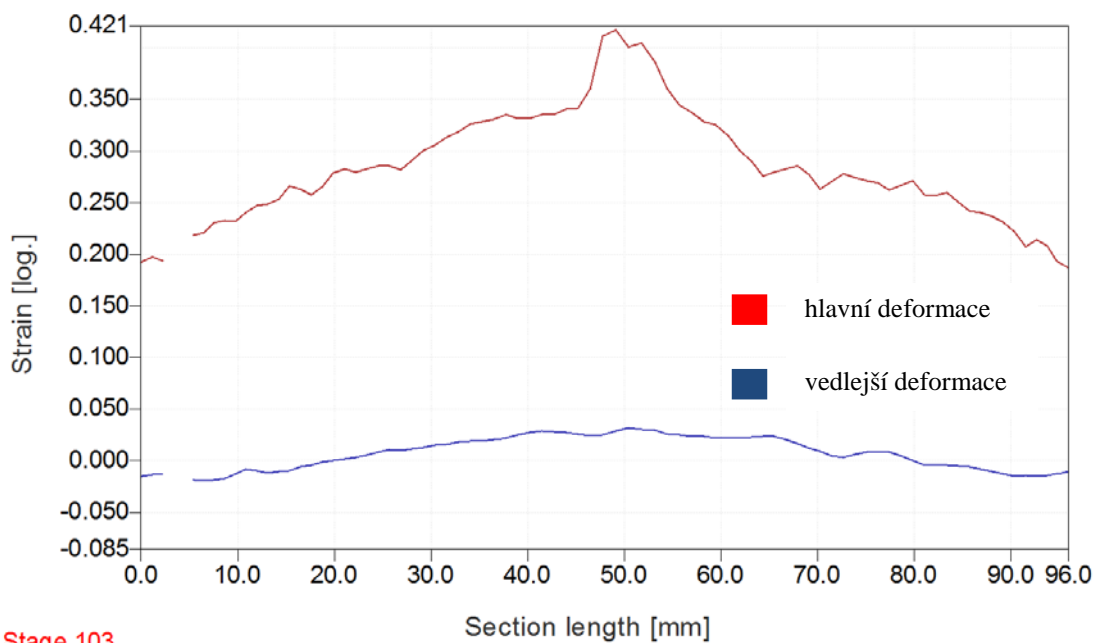


ARAMIS

5/21/13

gom
www.gom.com

Obr. 49 Příklad průběhu hlavních a vedlejších deformací podél řezu č. 1 (zkušební vzorek $b = 30$ mm, materiál „D“)



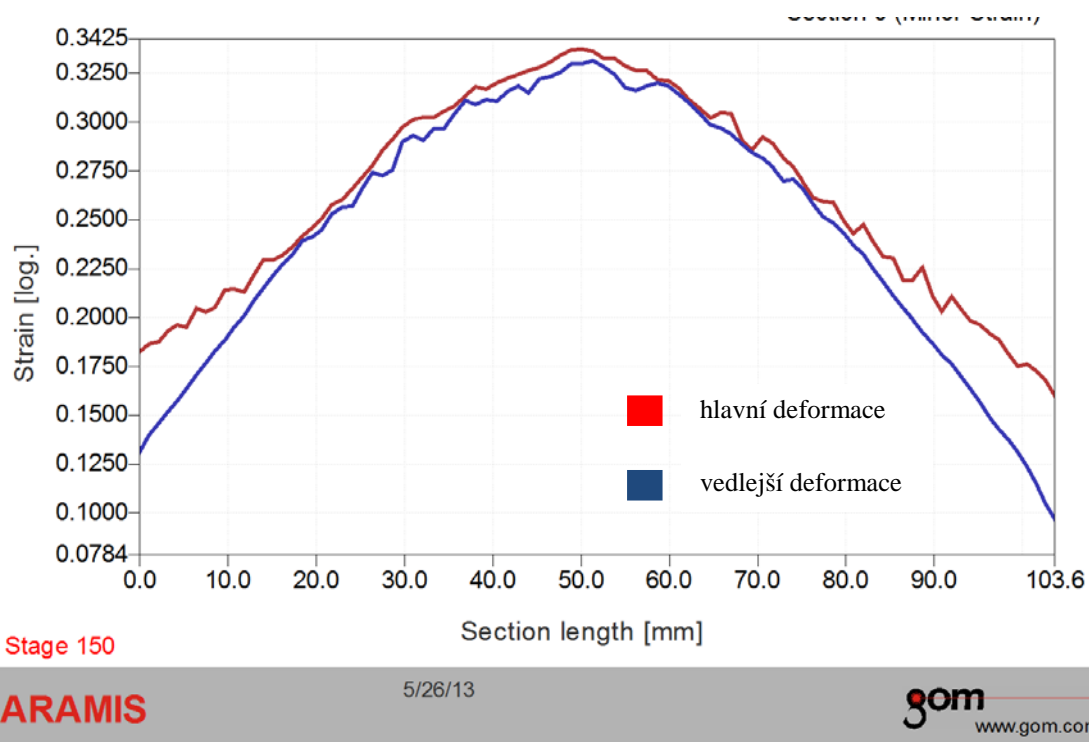
ARAMIS

5/22/13

gom
www.gom.com

Memory: 1525/8941/21231 MB

Obr. 50 Příklad průběhu hlavních a vedlejších deformací podél řezu č. 1 (zkušební vzorek $b = 120$ mm, materiál „D“)



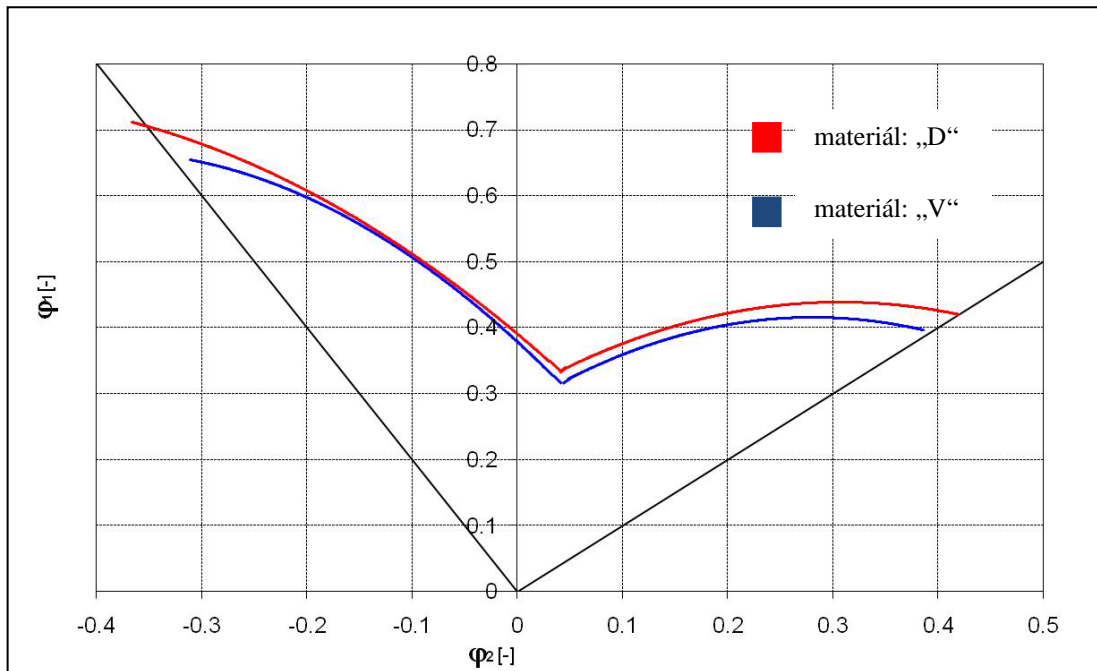
Obr. 51 Příklad průběhu hlavních a vedlejších deformací podél řezu č. 1 (zkušební vzorek $b = 210$ mm, materiál „D“)

11.2 Diskuze výsledných hodnot

Pro lepší porovnání křivek mezních přetvoření jsou vyneseny průběhy křivek mezních přetvoření pro materiál „D“ (červená křivka) a „V“ (modrá křivka) do jednoho grafu (viz obrázek Obr. 52). Materiál „D“ vykazuje v celém průběhu vyšší hodnoty deformace, kde u středu levé větve regresní křivky není nárůst moc výrazný. Od středu levé větve směrem doleva dochází k postupně zvětšujícímu se rozchodu mezních křivek, kde nejmarkantnější rozptyl je pozorovatelný v levé straně diagramu v oblasti přetvoření $m_{\varphi} = 0,5$, tedy v oblastech jednoosého tahu. Konkrétně se jedná o hodnoty pro dobrý materiál $\varphi_{1D} = 0,71$ a pro vadný $\varphi_{1V} = 0,65$, kde rozdíl vyjádřený v procentech činí 8,45 %.

Další významný rozdíl mezi těmito dvěma materiály je možné pozorovat od středu diagramu k pravé části regresních křivek, kde je podobný trend jako u levé větve. Zde dochází k rozptýlení výsledných hodnot hlavních a vedlejších deformací. Tento rozdíl vykazuje nejvyšších diferencí na konci diagramu v pravé části neboli v oblastech

dvouosého namáhání. Procentuální rozdíl mezi materiálem „D“ a „V“ dosahuje v těchto místech 9 %.



Obr. 52 Zobrazení křivek mezního přetvoření pro materiál „D“ a „V“

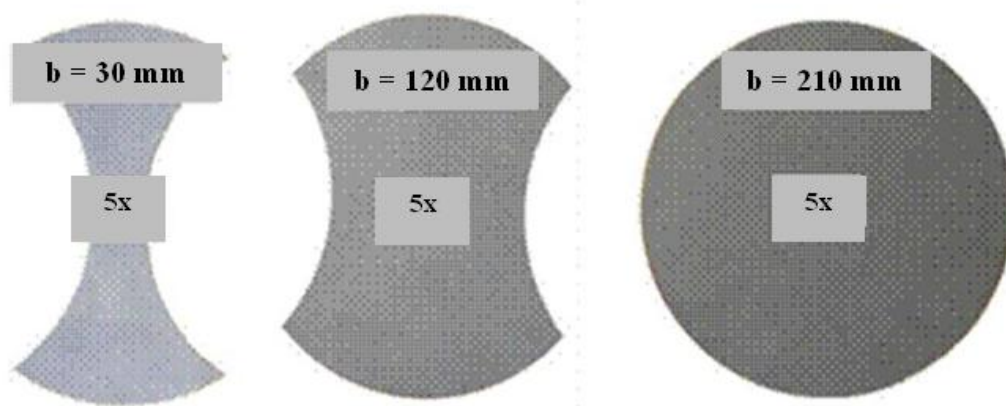
Z porovnání mezních diagramů vychází pro obě metody lepší schopnost přetvoření pro materiál „D“ a to ve všech oblastech grafu. Tato skutečnost potvrzuje lepší vhodnost materiálu pro tváření nepravidelných dílců. Vzhledem k průběhu KMP u materiálu s označením „V“, je ale také možno konstatovat, že i tento materiál je vhodný pro tváření karosářských dílců.

12. Sledování rozvoje plastické deformace

Pro další výzkum bylo nutné pomocí experimentálních měření nalézt mezní stavy přetvoření zkoušených materiálu „D“ a „V“. Vzhledem k požadavkům na kvalitu výlisku bylo nutné přetvořit zkoušené sady vzorků do oblastí mezních tak, aby tyto oblasti byly z hlediska požadavků na kvalitu výlisků přijatelné. Dosažení těchto oblastí je z hlediska kvality dílu přijatelné v případě, že nedojde ke vzniku namoženiny popř. trhlin. Cílem následných experimentů bylo stanovení a dosažení těchto mezních stavů a příprava takto vzniklých vzorků pro následné materiálové rozборы.

12.1 Stanovení oblasti mezních přetvoření

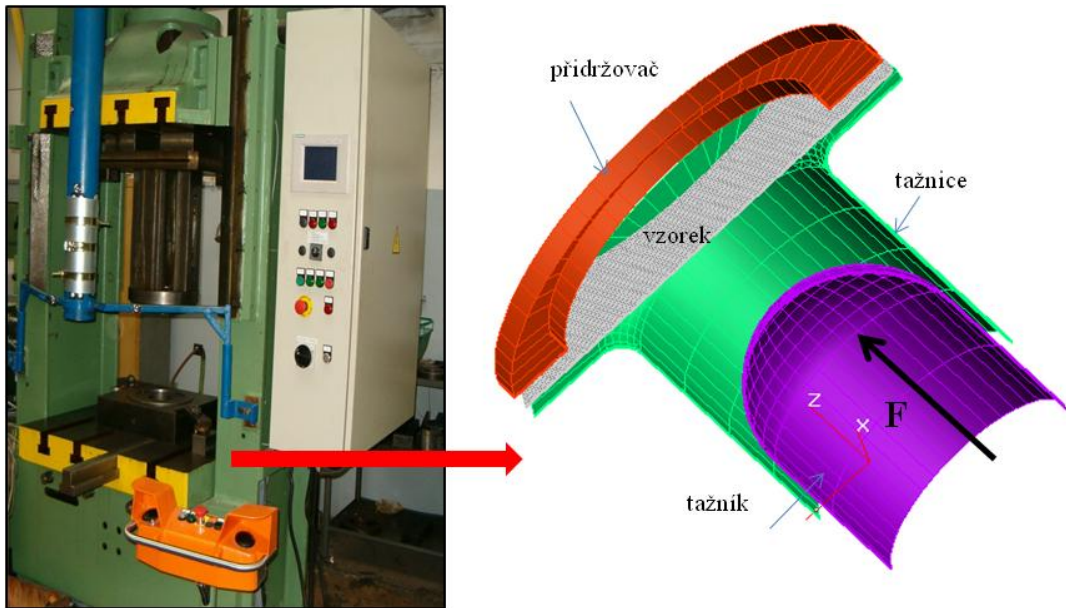
Nejprve byly připravena sada vzorků z materiálu „D“ a „V“. Z důvodu rovnoměrného pokrytí požadovaných intervalů stavů přetvoření $m_\varphi = -0,5$ až $m_\varphi = 1$ byly použity 3 různé tvary přístřihů, kde šířka přístřihu b se měnila v rozmezí 30 mm až 210 mm (kruhový přístřih). Připravené sady vzorků pro materiál „D“ bez plastické deformace jsou zobrazeny na obrázku Obr. 53. Pro jednotlivé deformační stopy byly zhotoveny sady po 5 vzorcích a to pro materiál „D“ a „V“.



Obr. 53 Skupina vzorků pro materiál „D“ (analogicky pro „V“)

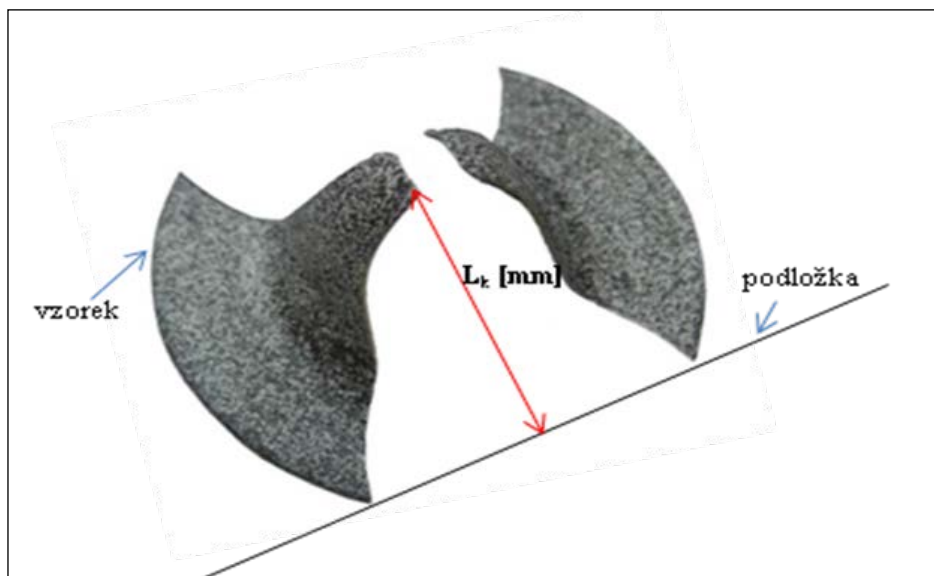
Takto připravené vzorky byly vypínané pomocí obdobného zařízení jako v případě sestavení DMP, takže pomocí dvojčinného lisu CBA300. Na obrázku Obr. 54 je naznačeno schéma hlavních částí nástroje lisu CBA300 a dále způsob vypínání

zkušební vzorku o průměru přístřihu $b = 30$ mm. Kritériem pro ukončení zkoušky byl vznik trhliny na testovaném vzorku.



Obr. 54 Lis CBA300 společně se schématem vypínání zkušební vzorku pro $b = 30$ mm

V okamžiku dosažení kritéria konce zkoušky, byly takto přetvořené vzorky proměřeny pomocí digitální posuvky MituToyo a byla naměřena hodnota s názvem kritická hloubka tahu L_k , která odpovídala hloubce tahu při vzniku trhliny. Zkušební měření pro vzorek o průměru přístřihu $b = 30$ mm je znázorněno na obrázku Obr. 55.



Obr. 55 Příklad odečtení L_k pro zkušební vzorek $b = 30$ mm (materiál „D“)

Toto experimentální měření bylo provedeno pro obě dvě sady vzorků. Výsledné naměřené hodnoty, jsou uvedeny v tabulkách Tab. 8 a Tab. 9 zvlášť pro vzorky ze série „D“ a série „V“.

Tab. 8 Hodnoty L_K pro materiál „D“

Rondele n = 5	$\phi D = 30 \text{ mm}$	$\phi D = 120 \text{ mm}$	$\phi D = 210 \text{ mm}$
$L_k[\text{mm}]$	35	41	48
$\Delta L_k[\text{mm}]$	1	2	1

Tab. 9 Hodnoty L_K pro materiál „V“

Rondele n = 5	$\phi D = 30 \text{ mm}$	$\phi D = 120 \text{ mm}$	$\phi D = 210 \text{ mm}$
$L_k[\text{mm}]$	33	39	46
$\Delta L_k[\text{mm}]$	1	1	1

Z předchozích měření jsme získali hodnotu L_k , která odpovídá vzniku trhliny. Pro oblast tváření je již tato hodnota nepřijatelná, protože při výrobě karosářských dílců by byl takto porušený výlisek považován za znehodnocený.

Proto bylo nutné stanovit hloubku tahu, kde se nevyskytuje vznik trhlín, ale stále bude v mezním stavu. Na základě této podmínky byl stanoven následující předpoklad dosažení oblasti přípustných mezních přetvoření.

Maximální hloubka tahu přípustná pro tváření se stanovila na základě předpokladu, že mezní stav splňující kritérium kvality výlisku bude o 2 mm níže než naměřená hodnota L_k , neboli $L_k - 2 \text{ mm} = L_{km}$. Místo největšího přetvoření vykazují nejčastěji střed vrchlíku, vzniklý působením tažníku, takže pro materiálový rozbor budou vzorky odebrány z této oblasti.

Tímto byla určena nová hodnota s označením L_{km} , která definovala oblast mezních přetvoření, která by byla ze strany kvality výlisku přijatelná. Výsledné hodnoty L_{km} jsou uvedeny v tabulce Tab. 10.

Tab. 10 Hodnoty L_{km} pro materiál „D“ a „V“

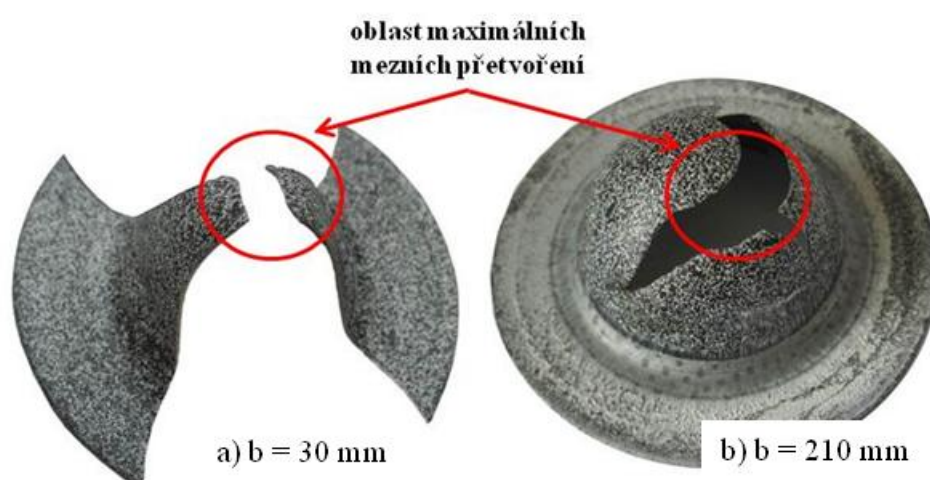
Rondele n = 5	$\phi D = 30 \text{ mm}$	$\phi D = 120 \text{ mm}$	$\phi D = 210 \text{ mm}$
---------------	--------------------------	---------------------------	---------------------------

L_{km} pro D [mm]	33	39	46
L_{km} pro V [mm]	31	37	44

12.2 Analýza velikosti mezních deformací

Jedním z cílů práce bylo sledovat a stanovit vliv materiálu na rozvoj plastické deformace v oblastech mezních přetvoření, bylo nutné nejprve stanovit velikost deformace u zkoušených materiálů. K tomuto experimentu bylo využito poznatků z předchozí kapitoly 12.1, kde přípustná oblast mezních deformací vzniká při experimentálně zjištěných mezních hloubkách tahu L_{km} , které byly shrnuty v kapitole 12.1.

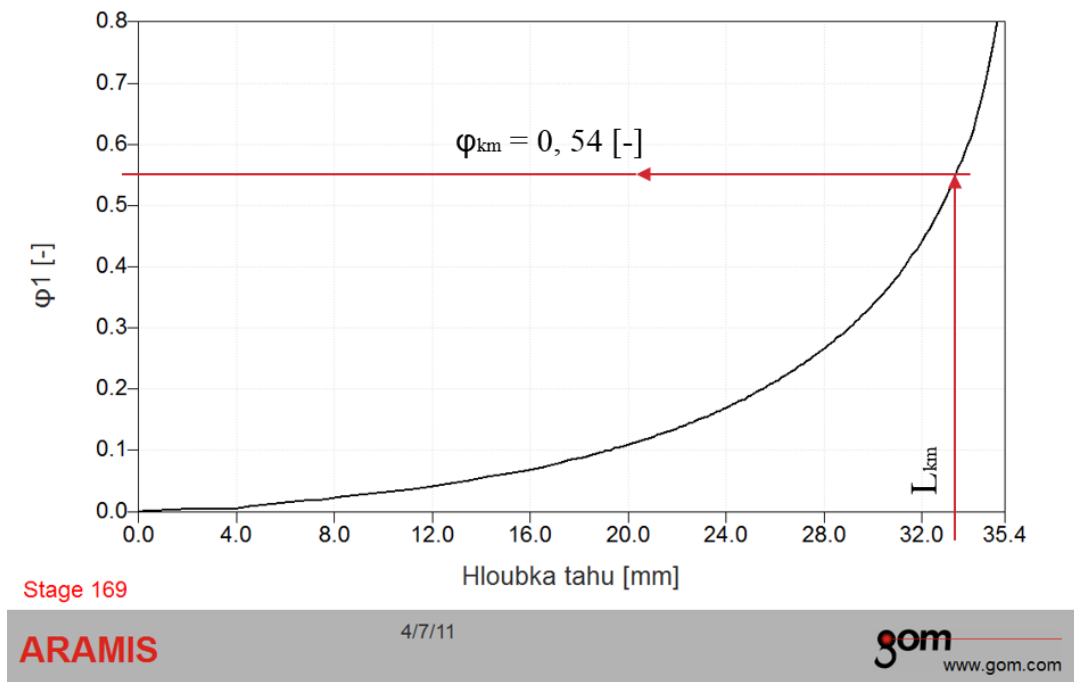
Pro určení velikosti deformace, která by odpovídala mezní hloubce tahu L_{km} byl proveden následující experiment. Nejprve byly připraveny série vzorků o průměru přístřihu $b = 30\text{ mm}$, 120 mm a 210 mm pro každý analyzovaný materiál „V“ a „D“ po třech vzorcích. Na takto připravené vzorky byl nanesen stochastický povlak (pattern) podobně jako v kapitole 11.1 tak, aby tyto vzorky byly připraveny pro bezkontaktní měření pomocí systému ARAMIS. Tyto vzorky byly dále vloženy mezi funkční části lisu CBA300 a vypínány do ukončení zkoušky. Na obrázku Obr. 56 je příklad měřených vzorků pro šířku přístřihu 30 a 210 mm. Kritériem pro ukončení zkoušky byl vznik trhliny.



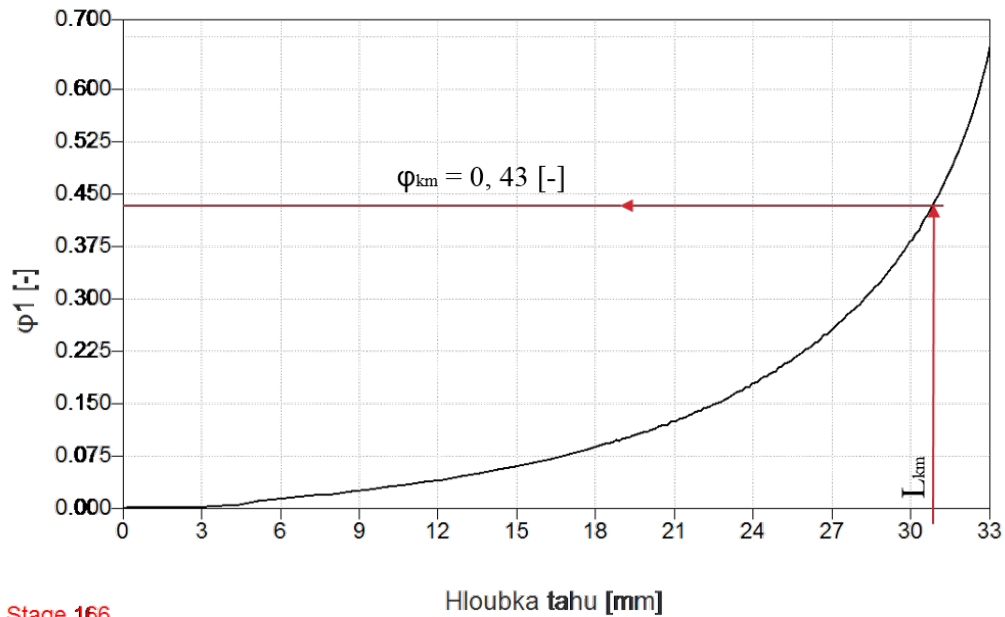
Obr. 56 Příklad zkoušených vzorků o průměru přístřihu pro $b = 30$ a 210 mm

Jelikož systém ARAMIS je schopný naměřit velikost deformace vzhledem k dráze nástroje (tažníku) lisu CBA300, bylo možné sestavit křivky, popisující závislost hloubky tahu na velikosti deformace. Požadovaný výsledek pro tento experiment spočívá v nalezení hodnoty deformace při hloubce tahu L_{km} .

Hloubka tahu je nám již známá a odečtením z grafu (závislost hloubky tahu na deformaci) zjistíme požadovanou deformaci φ_{1m} . Výsledné hodnoty závislostí $L_{km} - \varphi_{1m}$ jsou uvedeny na obrázcích Obr. 57 až Obr. 62.

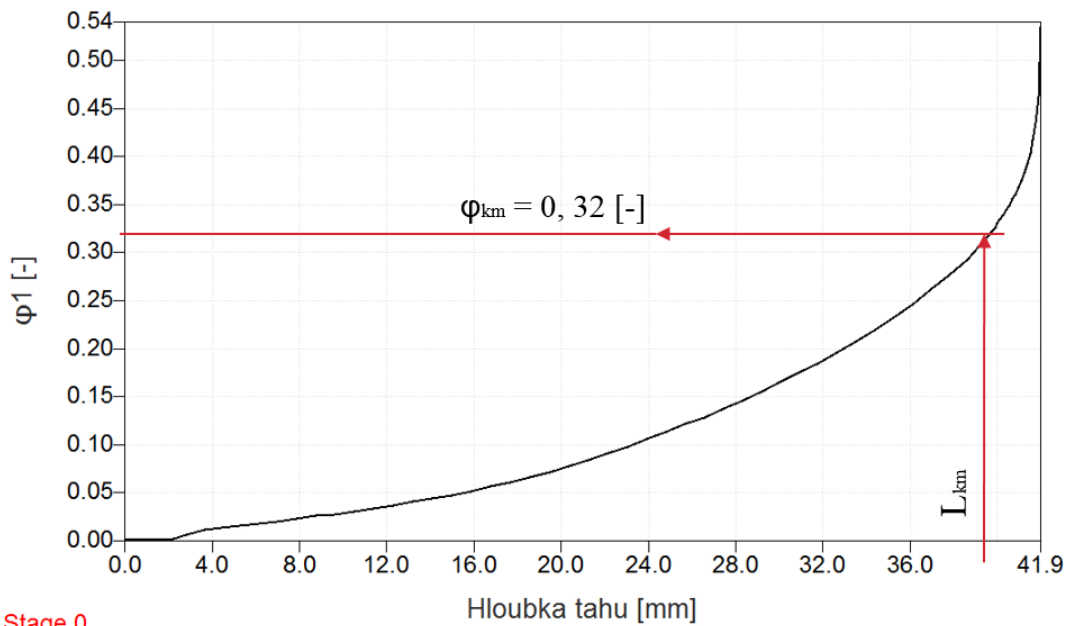


Obr. 57 Velikost deformace v závislosti na hloubce tahu pro materiál „D“ na přístřihu o průměru 30 mm



Obr. 58 Velikost deformace v závislosti na hloubce tahu pro materiál „V“ na přístříhu o průměru 30 mm

V grafech na obrázku Obr. 57 a Obr. 58 je vynesena závislost vzdálenosti pohybu tažníku na velikosti deformace pro přístřih o průměru 30 mm pomocí zkonstruovaných čar, které na ose hloubky tahu (osa x) vychází vertikálně nahoru z hodnoty L_{km} . V místě průniku s křivkou se vytvoří další horizontální přímka, která přesně zobrazí hodnotu deformace φ_{1m} na ose y. Výsledné hodnoty pro konkrétní přístřih a materiál jsou zobrazeny v tabulkách Tab. 11 a Tab. 12. Po odečtení u přístřihu o průměru 30 mm z dobrého materiálu vykazuje hodnota deformace $\varphi_{km} = 0,54$ při hloubce tahu 33 mm. Mezní deformace pro vadný materiál v hloubce tahu 31 mm činí $\varphi_{km} = 0,43$. Procentuálně se jedná o rozdíl deformací mezi dobrým a vadným materiálem cca. 20%.



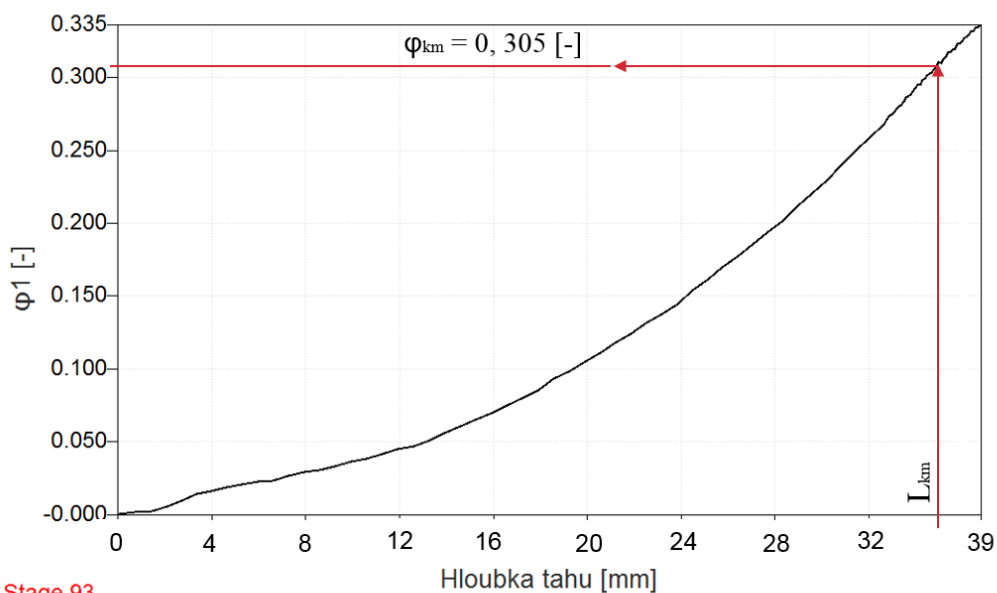
Stage 0

ARAMIS

4/7/11

gom
www.gom.com

Obr. 59 Velikost deformace v závislosti na hloubce tahu pro materiál „D“ na přístřihu o průměru 120 mm



Stage 93

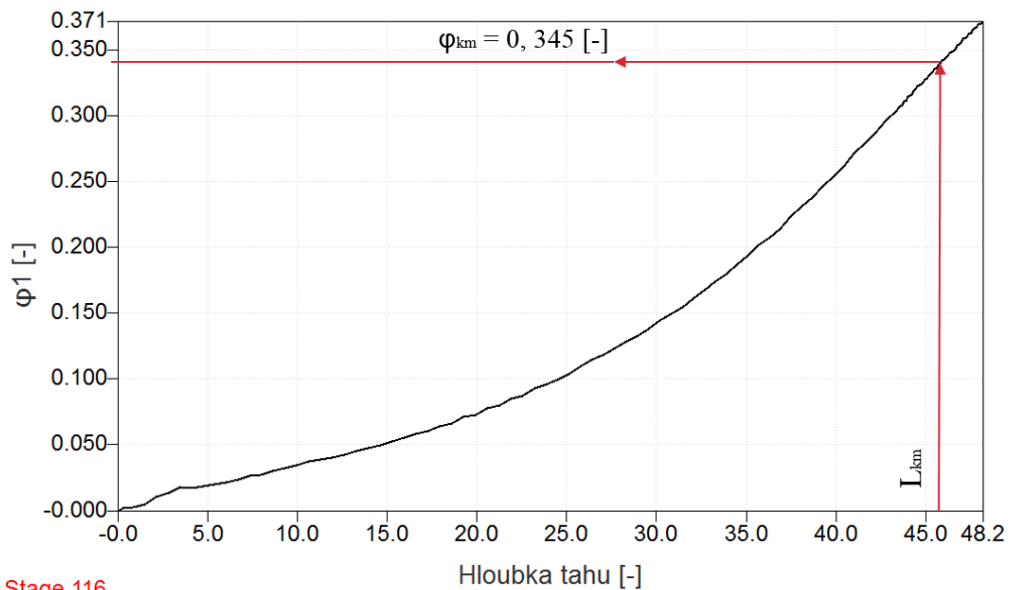
ARAMIS

4/7/11

gom
www.gom.com

Obr. 60 Velikost deformace v závislosti na hloubce tahu pro materiál „V“ na přístřihu o průměru 120 mm

Grafy na obrázcích Obr. 59 a Obr. 60 zobrazují průběhy pro zkušební vzorky z přístříhu o průměru 120 mm. Zde je stejný trend jako u předchozích vzorků, kde dobrý materiál vykazuje vyšší hodnotu mezní kritické deformace $\varphi_{km} = 0,32$ oproti vadnému materiálu, který dosahuje hodnoty deformace o velikosti $\varphi_{km} = 0,305$. Procentuálně je rozdíl mezi jednotlivými materiály vyjádřen hodnotou 4,7 %. Kritická limitní hloubka pro dobrý materiál je 39 mm a pro materiál vadný je 37 mm.



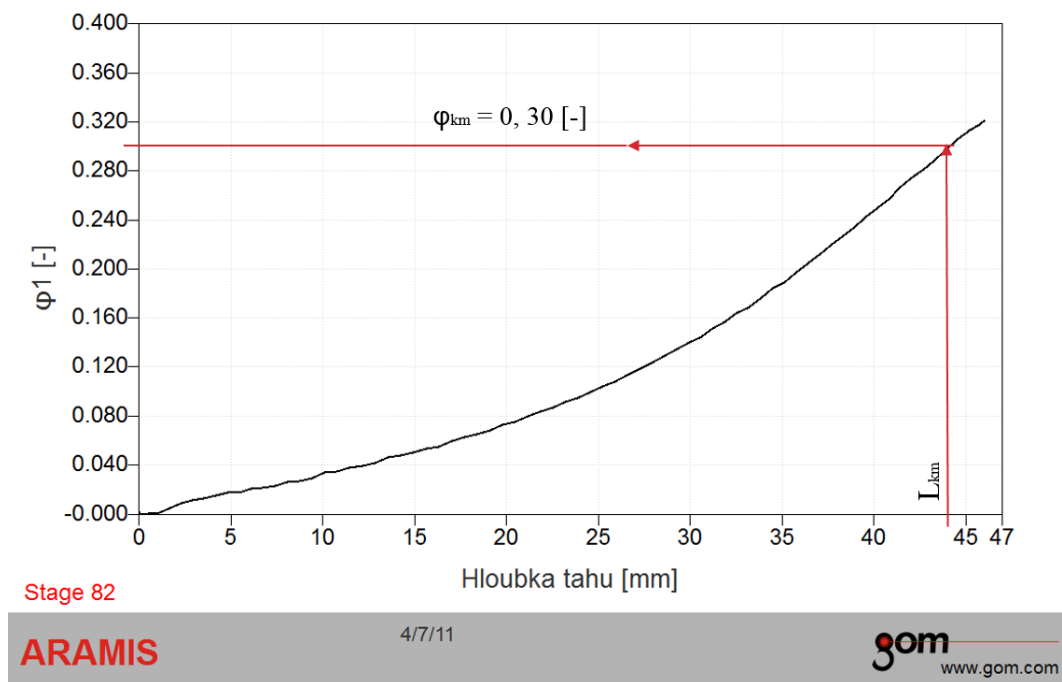
Stage 116

ARAMIS

4/8/11

gom
www.gom.com

Obr. 61 Velikost deformace v závislosti na hloubce tahu pro materiál „D“ na přístříhu o průměru 210 mm



Obr. 62 Velikost deformace v závislosti na hloubce tahu pro materiál „V“ na přístřihu o průměru 210 mm

Grafy znázorněné na obrázcích Obr. 61 a Obr. 62 zobrazují průběhy pro zkušební vzorky z přístřihu o průměru 210 mm. Dobrý materiál opět dosahuje vyšších hodnot mezní deformace $\varphi_{km} = 0,345$ a materiál vadné šarže pouze $\varphi_{km} = 0,30$. Rozdíl mezi jednotlivými materiály činí cca. 8%.

V tabulkách Tab. 11 a Tab. 12 jsou pro lepší přehled uvedeny hodnoty konkrétních mezních deformací při předem definované hloubce tvářecího nástroje.

Tab. 11 Hodnoty hloubky tahu a kritické mezní deformace pro materiál „D“

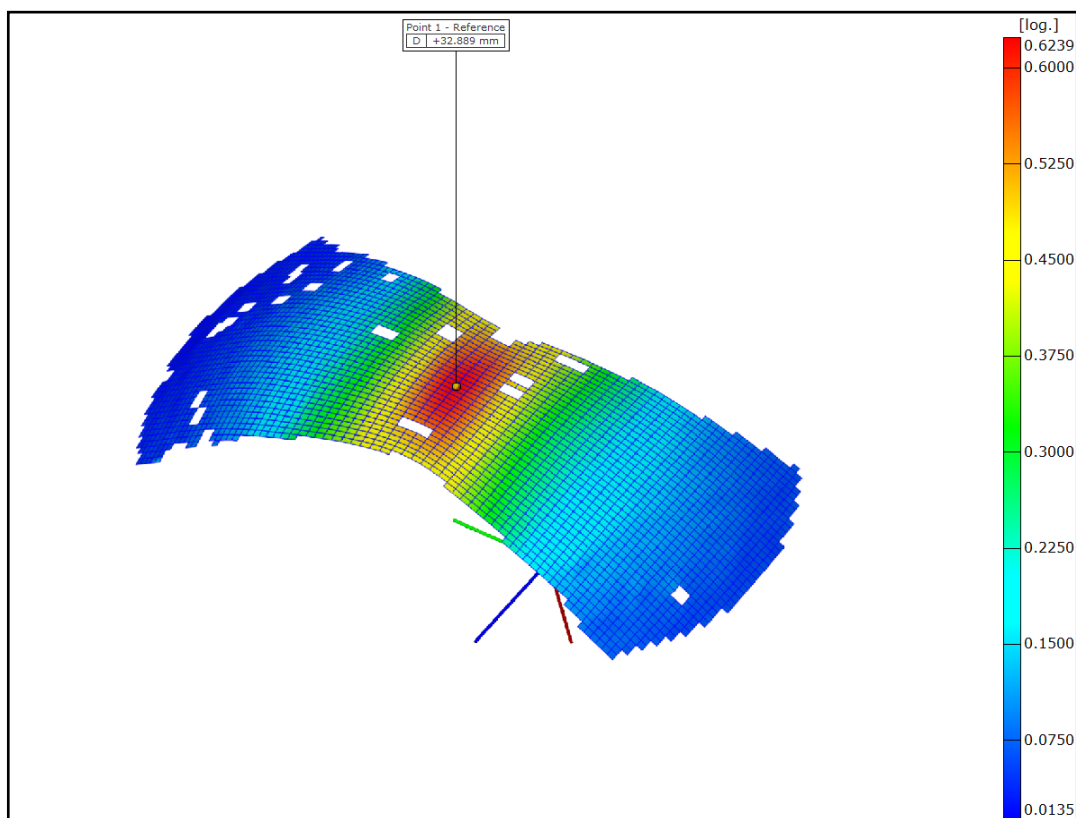
Svitek D	L_{km} [mm]	φ_{km} [-]
$\phi D = 30$ mm	33	0,54
$\phi D = 120$ mm	39	0,32
$\phi D = 210$ mm	46	0,345

Tab. 12 Hodnoty hloubky tahu a kritické mezní deformace pro materiál „V“

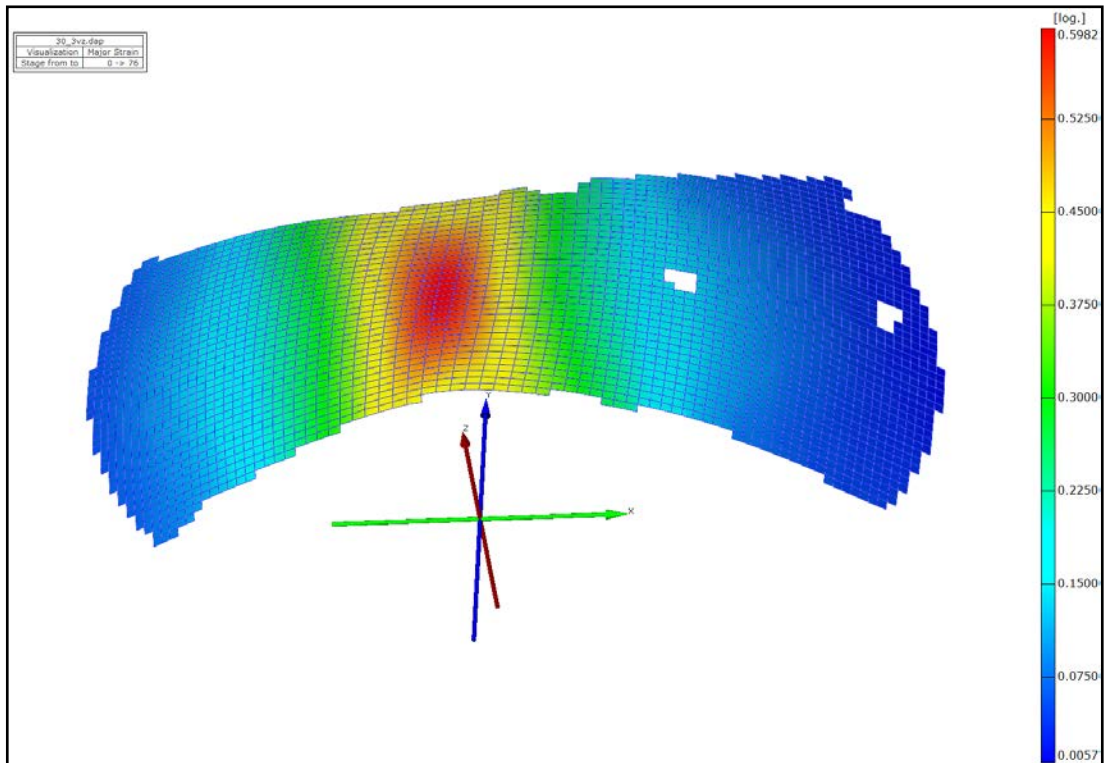
Svitek V	L_{km} [mm]	φ_{km} [%]
$\phi D = 30$ mm	31	43

$\phi D = 120 \text{ mm}$	37	0,305
$\phi D = 210 \text{ mm}$	44	0,31

Pro názornější představu o rozvoji plastické deformace u zkušebních vzorků (série „D“ a „V“), jsou dále zobrazeny na obrázcích Obr. 63 až Obr. 68 výsledné hodnoty rozvoje plastické deformace pomocí deformačních polí získané pomocí bezkontaktní metody ARAMIS.

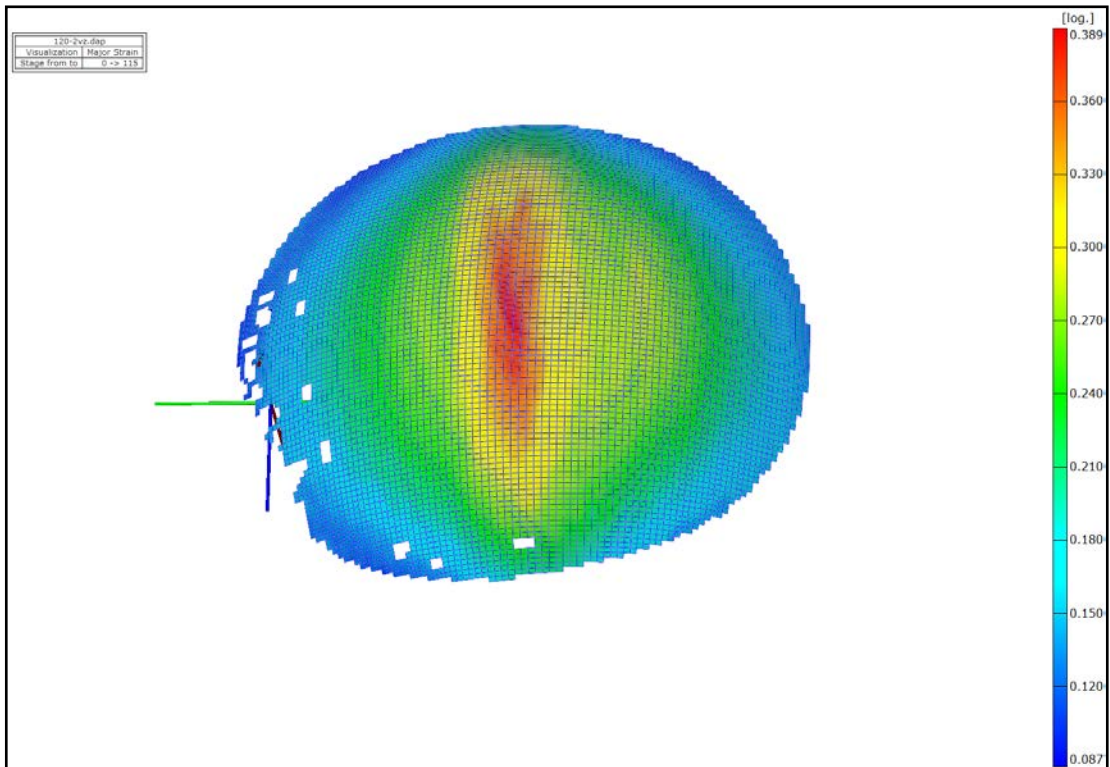


Obr. 63 Rozložení deformace u přístřihu o průměru 30 mm pro materiál „D“

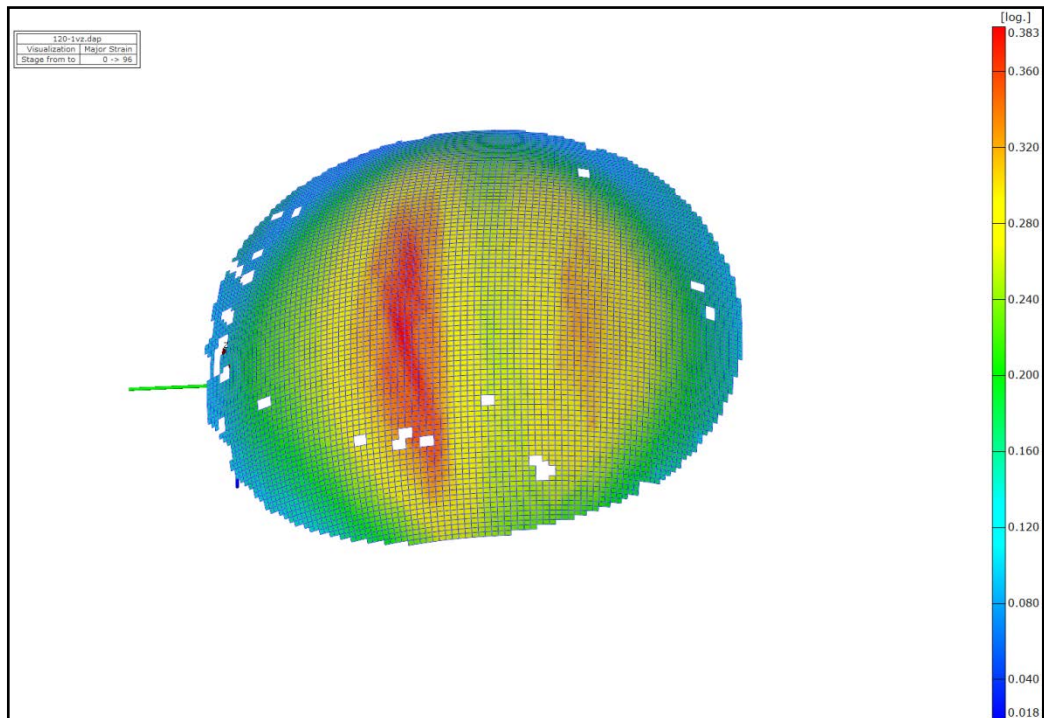


Obr. 64 Rozložení deformace u přístříhu o průměru 30 mm pro materiál „V“

Deformační mapy (Obr. 63 a Obr. 64) získané pomocí optické metody ARAMIS přehledně znázorňují rozložení deformace na povrchu zkušebních vzorků. Na základě barevné škály, která je zobrazena v pravé části obrázku lze odečíst velikost deformace pro jednotlivé oblasti. Pro tento experiment jsou nejdůležitější oblasti mající červené zabarvení, protože vykazují největší přetvoření. Pro přístřih o šířce 30 mm je oblast s největší deformací analyzována na středu pomyslného vrchlíku vzniklého od tvářecího nástroje. Dle měřítka určující velikost deformace, lze vidět větší přetvoření u materiálu dobrého $\varphi_1 = 0,63$, a vadné vzorky vykazují dle deformační škály $\varphi_1 = 0,58$.

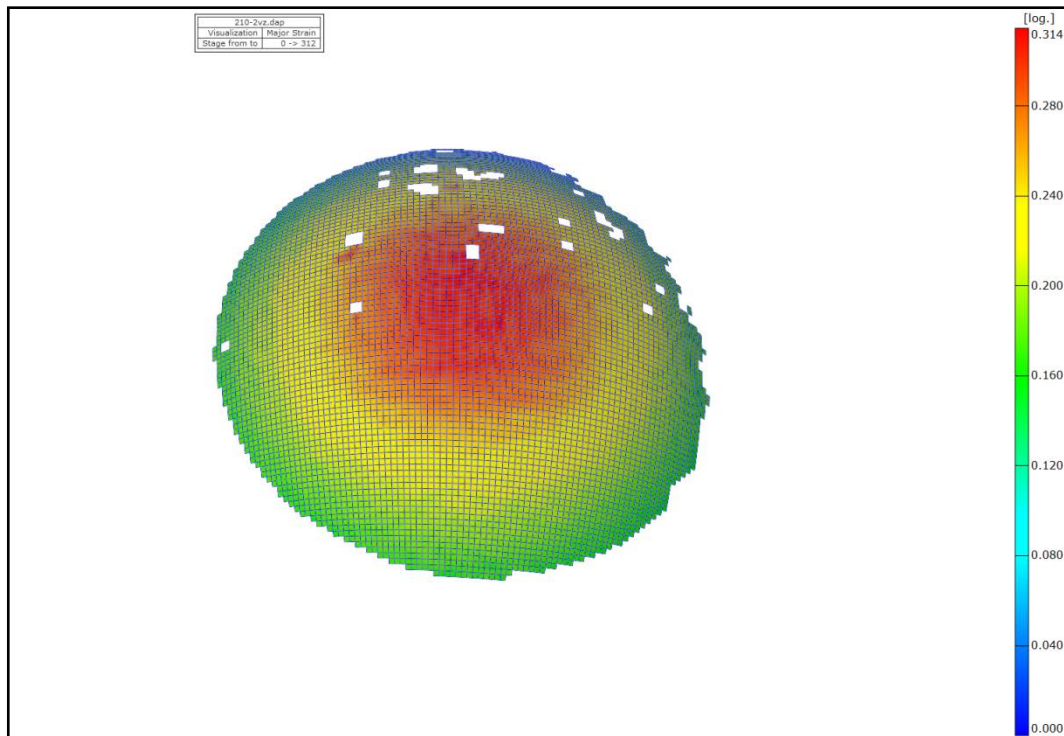


Obr. 65 Rozložení deformace u přístřihu o průměru 120 mm pro materiál „D“

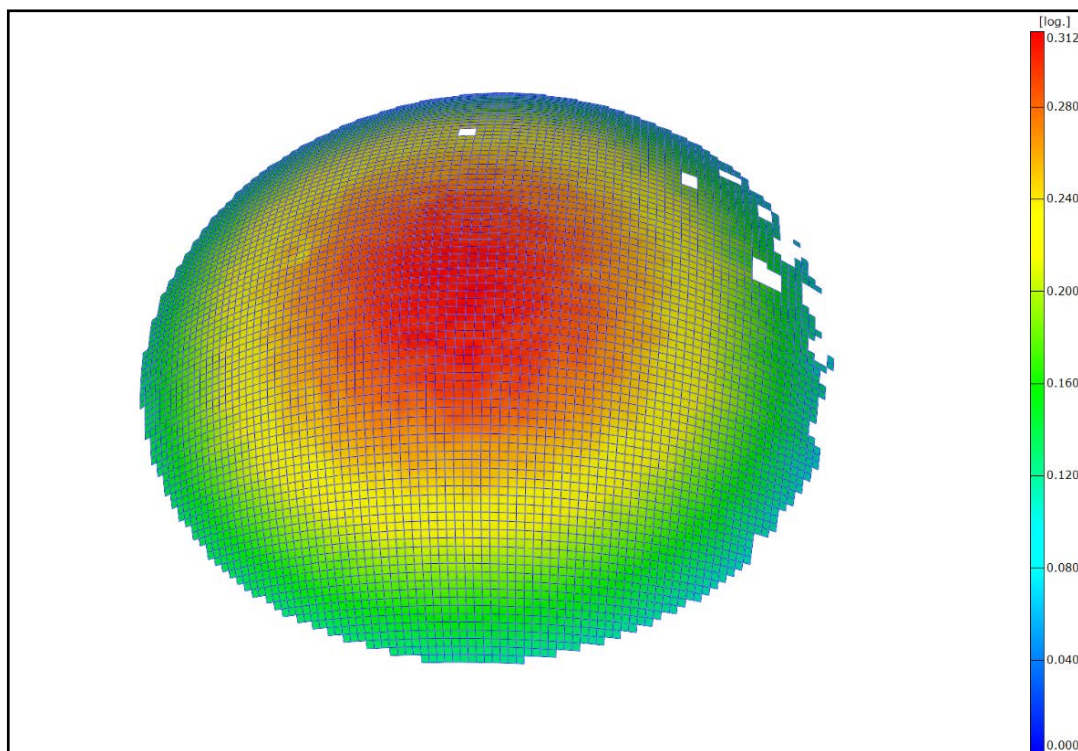


Obr. 66 Rozložení deformace u přístřihu o průměru 120 mm pro materiál „V“

Zkušební vzorky z dobrého materiálu o šířce přístřihu 120 mm mají napěťovou špičku opět na středu vrchlíku s největším napětím $\varphi_1 = 0,39$ (Obr. 65). Avšak pro stejnou šířku přístřihu u vadného materiálu je evidentně vidět posun maximální deformace mimo střed pomyslného vrchlíku vykazující hodnotu $\varphi_1 = 0,38$ (Obr. 66). Rozložení oblasti deformací je orientováno ve směru válcování plechu.



Obr. 67 Rozložení deformace u přístřihu o průměru 210 mm pro materiál „D“



Obr. 68 Rozložení deformace u přístříhu o průměru 210 mm pro materiál „V“

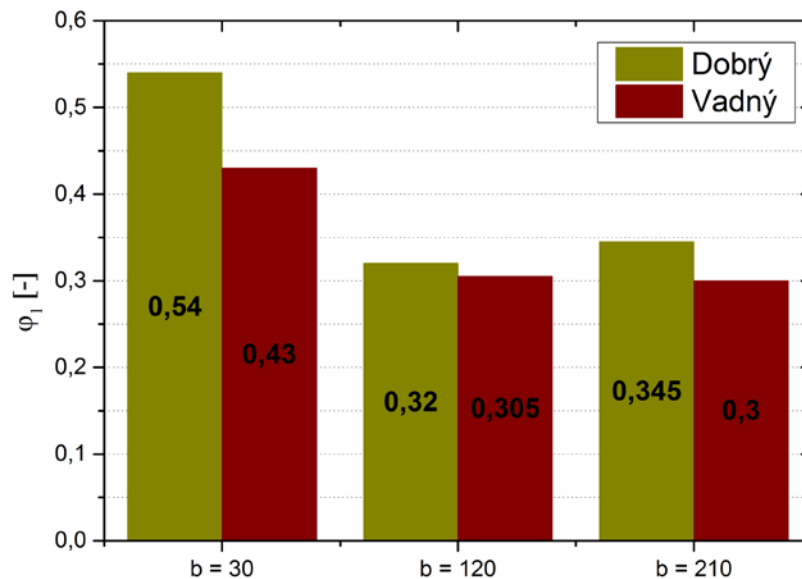
Snímky vzniklé při tváření vzorků s šířkou přístříhu 210 mm jsou znázorněny na obrázcích Obr. 67 a Obr. 68.

Oblasti s maximální deformací jsou pro dobrý i špatný vzorek na středu vrchlíku (vykresleno červeně). Dle škály deformace vychází nepatrný rozdíl mezi dobrým a špatným materiálem ve prospěch dobrého o pouhé 0,6 %. Rozložení deformace je pro oba materiály shodný, šíří se rovnoměrně od středu vrchlíku.

12.3 Diskuze výsledných hodnot

Na základě získaných hodnot pro jednotlivé vzorky, které byly vytvořeny pro oba materiály neboli pro materiál „V“ (problematický svitek) a materiál „D“ (referenční svitek) je možné vysledovat následující (Obr. 69). Z každého materiálu bylo vytvořeno 15 vzorků a to tak, že od každé deformační stopy bylo vytvořeno 5 vzorků. Pro tyto vzorky byla určena hodnota L_k , která zachycuje okamžik (hloubku tahu) při kterém dochází ke vzniku trhliny. Při porovnání výsledných hodnot mezi oběma materiály je vidět, že materiál „V“ dosahuje nižších hodnot L_k , to znamená, že trhlina se vyskytne dříve než u materiálu „D“.

Vzhledem k dosaženým a vyhodnoceným výsledným hodnotám je možné konstatovat následující. U vzorků vyhotovených ze svitku „V“ (problematický lisování) je vidět na křivce, která popisuje hodnotu hloubky tahu, že bylo dosaženo stanovené hodnoty L_{km} pro oblast mezního přetvoření dříve, než u vzorků zhotovených ze svitku č. „D“ (referenční materiál). Toto by mohlo podobně jako z předchozích analýz ukazovat na nižší tvařitelnost materiálu vzhledem ke stavu napjatosti.



Obr. 69 Velikosti deformace pro jednotlivé velikosti zkušebních vzorků („D“ a „V“)

13. Materiálový rozbor

Na základě závěrů z předchozích kapitol bylo poukázáno na rozdílné hodnoty deformací mezi svitky „D“ a „V“, kde byla následující část práce zaměřena na objasnění příčin, která mají za důsledek tyto nuance. Pro objasnění příčiny rozdílu mechanických vlastností v technologických testech byl proveden materiálový rozbor s cílem analyzovat vliv struktury materiálu na rozvoj plastické deformace v oblastech kritických (mezních) přetvoření. Jelikož práce zasahuje velkou měrou do vědních disciplín materiálového výzkumu, byla v této části navázána spolupráce s Univerzitou Pardubice. V následující kapitole jsou uveřejněny dílčí výsledky se zaměřením na vliv materiálu na rozvoj plastické deformace.

13.1 Rozbor chemického složení

Analýza chemického složení byla provedena na vzorcích ve výchozím stavu, tj. bez plastického přetvoření. Výsledky rozboru materiálu s označením „D“ a označením „V“ jsou uvedeny v tabulkách Tab. 13 a Tab. 14.

Tab. 13 Chemické složení pro svitek „D“ [hm. %][63]

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
< 0,01	0,07	< 0,01	0,006	0,005	0,01	0,02	0,01
V	Al	Nb	Ti	B	O ₂	N ₂	Mo
< 0,01	0,06	< 0,01	0,08	<0,0005	0,0024	0,0026	< 0,01

Tab. 14 Chemické složení pro svitek „V“ [hm. %][63]

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
< 0,01	0,15	< 0,01	0,014	0,008	0,02	0,02	0,02
V	Al	Nb	Ti	B	O ₂	N ₂	Mo
< 0,01	0,07	< 0,01	0,06	<0,0005	0,0029	0,0047	< 0,01

Složení zkoušených materiálů odpovídá oceli stabilizované titanem s redukováným obsahem intersticiálů. Ze srovnání vyplývá vyšší podíl některých prvků u materiálu s horší plasticitou („V“). V možném negativním vlivu na plasticitu se jedná o rozdíl obsahu manganu, fosforu a dusíku. I při zjištěných rozdílech je u obou materiálů obsah intersticiálního dusíku podle obecně přijímaných kritérií dostatečně vázán v poměru s hliníkem a titanem.

U hodnocených vzorků nebyl zjištěn detekovatelný podíl niobu, z čeho lze vyvodit, že u použitého materiálu je stabilizace založena především na působení Ti a Al. Jejich vliv na plasticitu spočívá vedle schopnosti vázat rozpuštěné intersticiály, rovněž v tendenci stabilizovat zrno ve formování případných jemných precipitátů. Proto lze jejich

vliv do jisté míry sledovat právě v souvislosti s odpovídající stavbou zrn, a to s ohledem k problematickému sledování volně rozpustného Al.[63][64].

13.2 Hodnocení stavby zrn

Hodnocení zrn bylo provedeno obrazovou analýzou (systém AnalySiSDOCUOlympus). Hodnocení bylo zaměřeno na změny geometrických parametrů zrn v různém stavu plastického přetvoření, které odpovídalo různorodým stavům napjatosti v závislosti na tvaru dodaných zkušebních vzorků (Obr. 70).



Obr. 70 Ukázka dodaných vzorků pro materiál „D“ a „V“, poloměr přístřihu $b = 30$ a 120 mm

Měření tvaru zrn pro různé stavy deformace bylo provedeno na ploše výbrusu s odpovídajícím rozlišením $800\times$ a pro měření výchozího stavu materiálu bylo pro upřesnění doplněno měřením na ploše s odpovídajícím zvětšením $500\times$. V obou případech s vyloučením zrn s nedostatečným kontrastem.

Výsledné hodnoty měření geometrie zrn jsou porovnány a popsány v tabulkách Tab. 15 a v Tab. 16 a na obrázcích Obr. 71 a Obr. 72 jsou dále snímky z měření geometrie zrna.

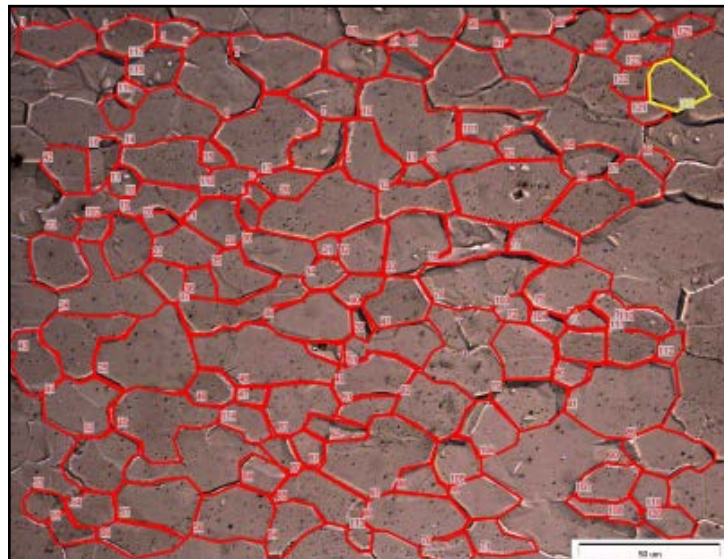
Tab. 15 Výsledné geometrie zrna pro proměnu šířku vzorku b a oblasti bez plastické deformace, pro svitek „D“

Vyhodnocení vzorky "D"	Oblast měření [μm^2]	Zakulacení	Prodloužení	Tvarový faktor
bez plastické deformace	145,61	0,43	1,53	0,69
$b = 30$ mm	195,84	0,20	2,21	0,62

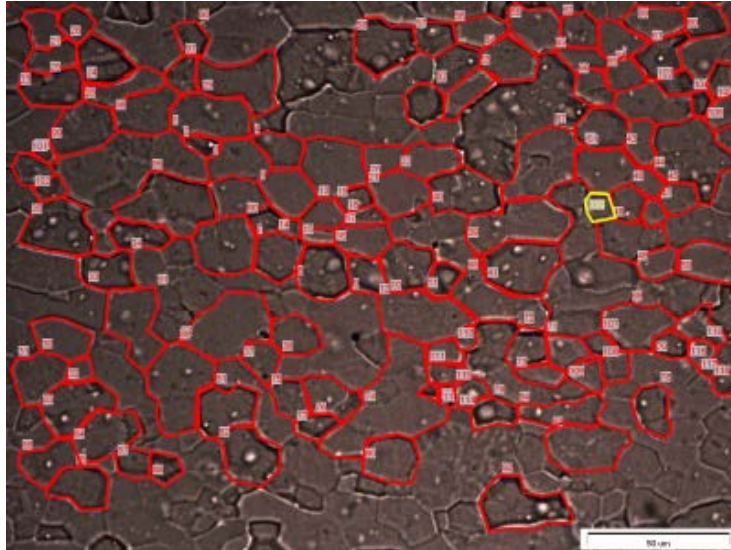
b = 120 mm	210,58	0,17	2,45	0,58
b = 210 mm	135,22	0,06	4,04	0,44

Tab. 16 Výsledné geometrie zrna pro proměnou šířku vzorku b a oblasti bez plastické deformace pro svitek „V“

Vyhodnocení vzorky "V"	Oblast měření [μm^2]	Zakulacení	Prodloužení	Tvarový faktor
bez plastické deformace	137,08	0,36	1,66	0,67
b = 30 mm	189,57	0,27	1,93	0,65
b = 120 mm	152,79	0,18	2,34	0,58
b = 210 mm	121,10	0,06	4,08	0,40



Obr. 71 Snímek geometrie zrn bez plastické deformace pro vzorek „D“ (zv. 500x) [63]

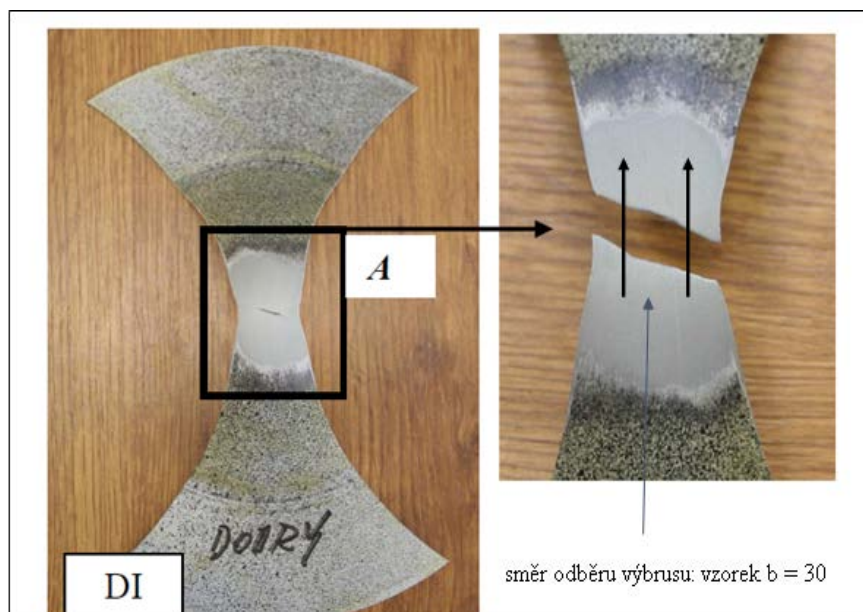


Obr. 72 Snímek geometrie zrn bez plastické deformace pro vzorek „V“ (zv. 500x) [63]

Při srovnání výsledných hodnot pro vzorek „D“ a „V“ byly ve většině případů u vzorku s označením „V“, vysledovány nižší hodnoty rozvoje geometrie zrn než u vzorků s označením „D“. Z celkového pohledu na rozvoj geometrie zrn je možné vysledovat podobný trend růstu tvaru zrn pro obě dodané série vzorků zhotovené ze svitků „D“ a „V“. U obou zkoušených materiálů odpovídal trend rozvoje geometrie zrna jakosti ocele.

13.3 Rozbor strukturních fází

Vzorky, které byly odebrány ze zkoumaných svitků („D“ a „V“), byly podrobeny materiálovému rozboru, který měl za úkol odhalit vliv materiálu resp. strukturních částic na plastickou deformaci. Tyto zkušební vzorky byly odebrány z oblastí mezních přetvoření, kolmo na směr vzniku namoženiny popř. trhliny (Obr. 73).



Obr. 73 Příklad oblasti odebraného výbrusu pro $b = 30$ mm

K tomuto účelu byl použit rastrovací elektronový mikroskop řady Tescan VEGA 5130 SB, společně s detektory EDX pro mikroanalýzu identifikovaných částic (Obr. 74).

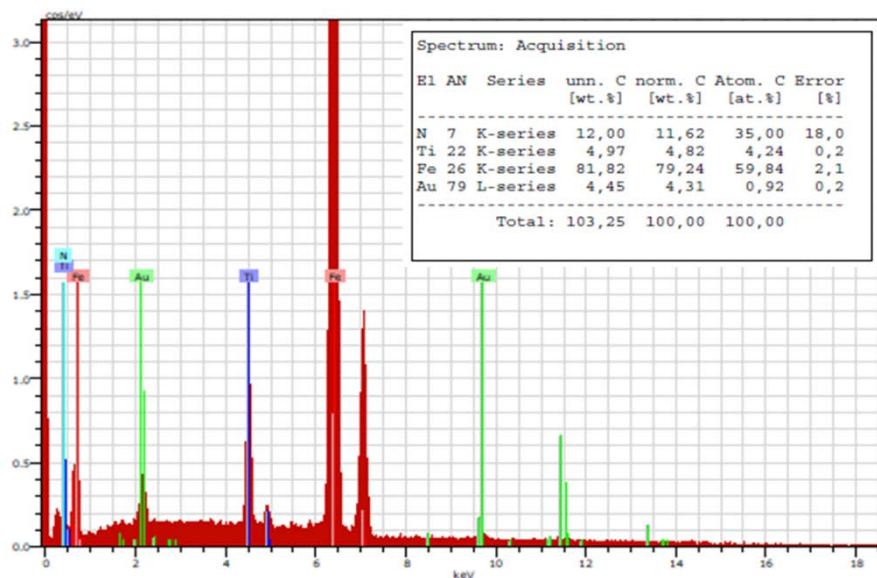


Obr. 74. Mikroskop Tescan VEGA

Na základě strukturních analýz byly identifikovány částice, které byly níže rozděleny do jednotlivých skupin podle jejich etapy vzniku a vlivu na plastickou deformaci. U zkoušených vzorků (sada „D“ a „V“) sestavených z hlubokotažné oceli stabilizované Ti, byly vyzorovány následující druhy částic.

Primární (hrubé) precipitáty typu TiCN popř. TiN, které vznikají při krystalizaci (v litém stavu) na hranicích zrna i ve feritické matici. I když částice TiN

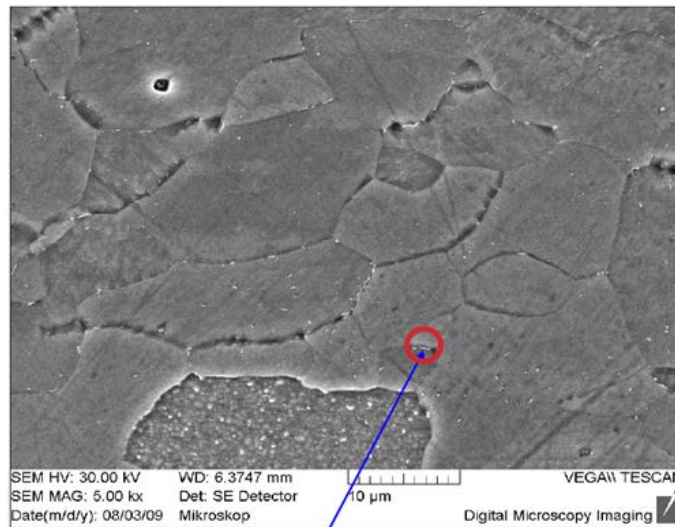
jsou stabilní, přispívají k precipitačním reakcím vyskytujícím se v průběhu dalších operací, kdy působí jako nukleační místa pro precipitaci fází typu TiS a $Ti_4C_2S_2$. Tento efekt ale nebyl pozorován, naopak sekundární precipitace byla zjištěna nezávisle na vzniku primárních hrubých fází typu TiN, resp. TiCN (Obr. 75). Dále je nutno v této souvislosti uvést, že karbidy a nitridy mohou být částečně rozpuštěny během opakovaného ohřevu před válcováním za tepla a mohou být precipitovány do jemné formy. Vzhledem k vlivu těchto částic na plastickou deformaci závisí jak na obsahu, tak na velikosti precipitátů. Jemné mají intenzivnější vliv a dochází k interakci s rekrystalizací a vývojem textury. Hrubé precipitáty, u kterých nedojde k rozpuštění, se stávají z hlediska zpevnění neefektivní [63].



Obr. 75 Identifikace částice pomocí EDX analýzy: TiN (bodová analýza) [63]

Sekundární (jemné) precipitáty typu TiS popř. $Ti_4C_2S_2$, které vznikají dodatečně při opakovaném ohřevu a tepelném zpracování oceli při teplotách cca. 1250°C až 950°C. Vedle presence precipitátů jako primárních produktů odstraňování intersticiálních atomů mikrolegurami (TiCN, TiN) byly dále lokálně zjištěny skupiny velice jemných precipitátů, které mohly vzniknout v průběhu následných operací při zpracování plechu. Obrázek Obr. 75 prezentuje distribuci jemných sekundárních precipitátů typu TiS u zkoušeného vzorku, vyloučených jak na hranicích, tak i v interiéru feritického zrna. Jejich specifická morfologie odpovídá konkrétnímu typu a

rovněž etapě vzniku fáze na rozdíl od primárních nitridů (TiCN, TiN)[63]. Rozbor konkrétního typu fáze je uveden v příloze P4 a P5 této práce.

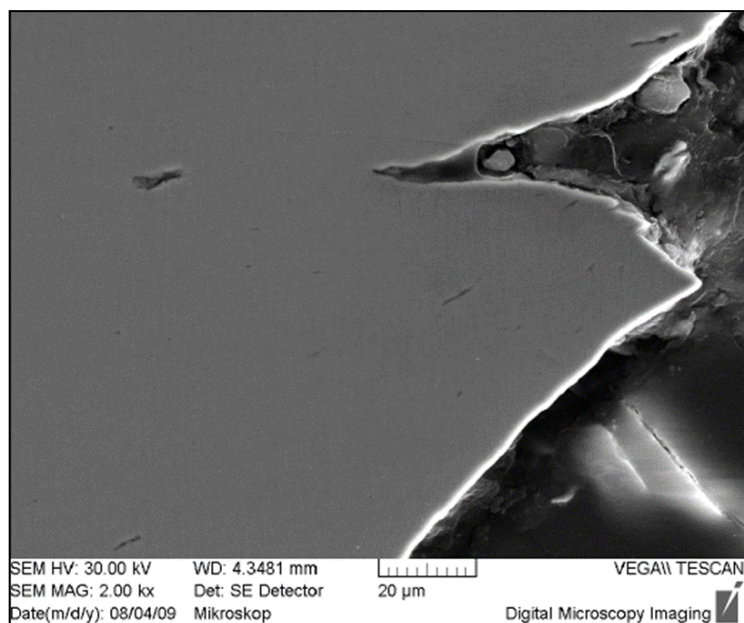


Obr. 76 Výskyt jemných precipitátů typu TiS[63]

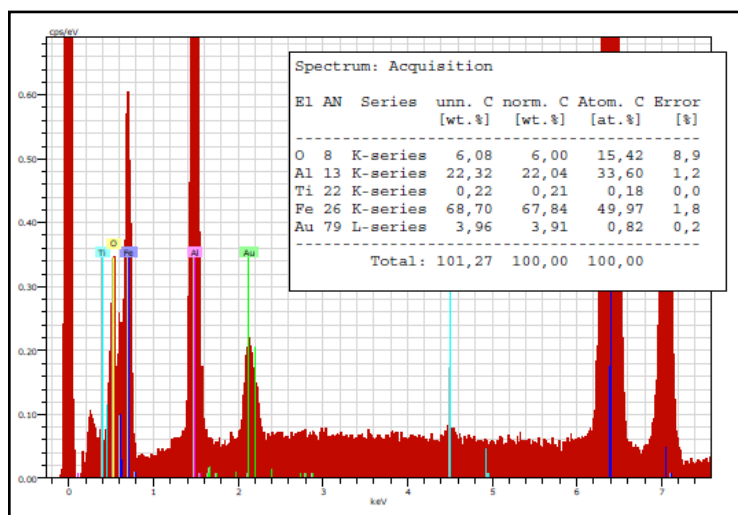
Důležitý parametr hodnocení jakosti plechů je tedy výskyt a rozložení sekundárních (jemných) precipitátů popř. tepelná rozpustnost primárních precipitátů, tj. jejich schopnost precipitace do jemné formy

Dále byl vedle výše uvedených fází zjištěn následující sortiment charakteristických *inkluzí*, které byly identifikovány převážně jako Al_2O_3 (Obr. 76). Tyto fáze mají dle rozborů vliv v případě výskytu shluku v dosahu plastické nestability-krčku, kde vedou k iniciaci mikrotrhlin a ke změně morfologie a průběhu lomu (Obr. 77).

Vliv inkluzí je dále zobrazen v příloze P6 a P7 této práce.



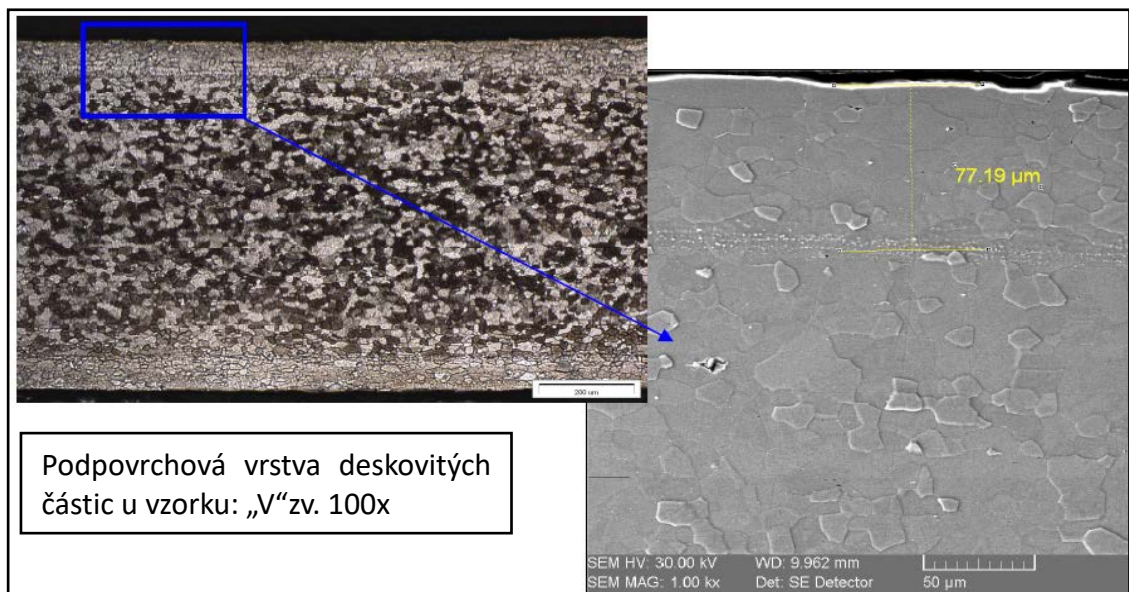
Obr. 77 Vliv inkluzí na průběh lomů[63]



Obr. 78 Identifikace částice pomocí EDX analýzy: Al_2O_3 (bodová analýza)[63]

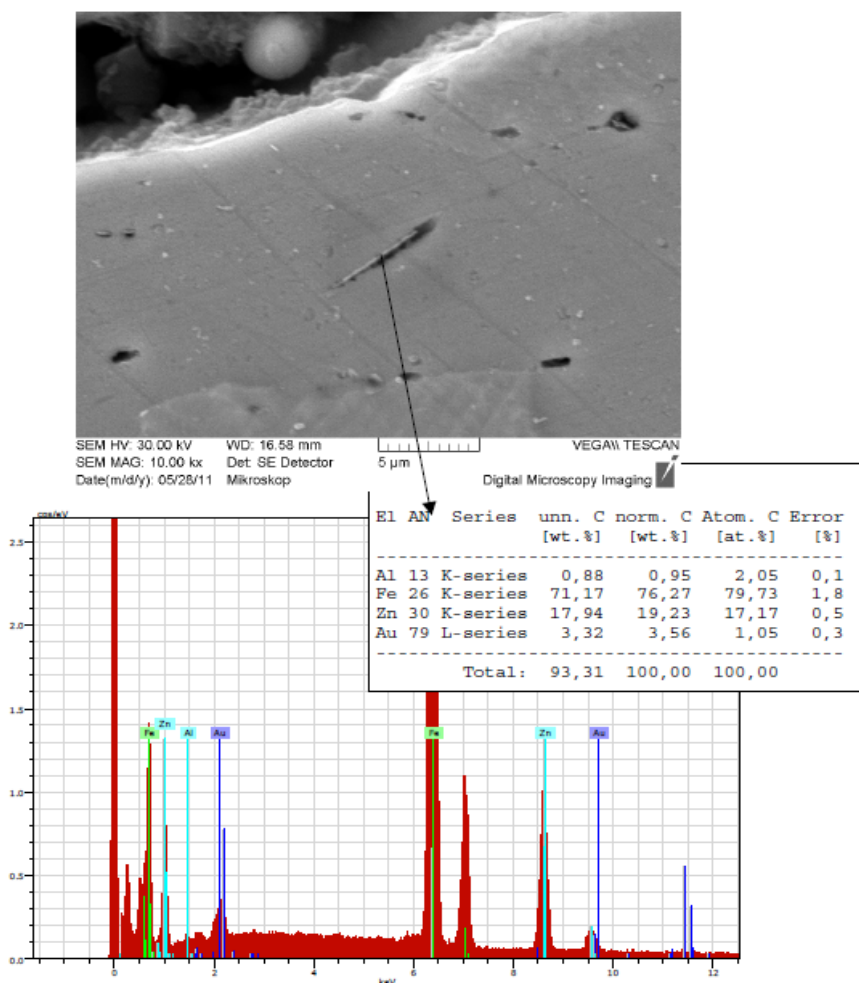
13.3.1 Deskovité precipitáty v povrchové vrstvě materiálu „V“

Podstatný rozdíl ve výskytu precipitačních částic u srovnávaných materiálů „D“ a „V“ byl zjištěn v povrchové vrstvě vzorků neboli konkrétně výskyt specifických fází v povrchové vrstvě svitku s označením „V“. Metalograficky bylo pozorováno povrchové pásmo s odlišným sortimentem i charakterem precipitátů oboustranně se stejnou tloušťkou pásma v dané části plechu. U výchozího stavu plechů jakosti „V“ je toto pásmo, oboustranně ohraničené tloušťkou cca. 80 μm od povrchové vrstvy (Obr. 79).



Obr. 79 Podpovrchové pásmo jemných částic, vzorek „V“ [63]

Tento efekt byl potvrzen u všech zkoušených vzorků zhotovených ze svitku „V“. Oproti vzorkům zhotoveným ze svitku „D“, kde nebyl tento jev dále pozorován. Následné metalografické analýzy se přednostně zaměřily na dokumentaci tohoto pásma resp. na tvar a distribuci vyskytujících se fází a jejich vliv na rozvoj plastické deformace. Pomocí chemické analýzy byly identifikovány velice jemné (deskovité) fáze, které se vyskytovaly po hranicích feritického zrna v podpovrchovém pásmu u svitku „V“ a dále pak byly pomocí mikroanalýz zaznamenány intermetalické fáze na bázi Fe-Zn (Obr. 80)[63].



Obr. 80 Identifikace částice pomocí EDX analýzy: Fe-Zn[63]

13.4 Diskuze výsledných hodnot

Chemické analýzy prokázaly u zkoumaných vzorků výskyt jemných strukturálních částic, které byly popsány jako precipitáty sulfidů titanu. Tyto částice byly detekovány u obou sad vzorků pro svitek „V“ a „D“. Na základě dosavadních poznatků mohou mít tyto částice významný vliv na rozvoj plastické deformace a působit tak jako retardéry rozvoje plastické deformace a to zejména v mezních oblastech vylisku.

Významný rozdíl mezi materiály (vzorky) „V“ a „D“ byl zjištěn v charakteristice stavby podpovrchové vrstvy. U vzorků vyrobených ze svitků s označením „V“ byla zjištěna podpovrchová souvislá vrstva jemných (deskovitých) částic. Tyto částice byly následně identifikovány jako interkrystalické fáze se zastoupením Zn jejich důsledkem je vznik intermetalických fází na bázi Fe a Zn.

14. Návaznost na disertační práci

Jedním z hlavních cílů disertační práce bylo propojení vědních oborů a poznatků z teorie tváření a materiálového inženýrství. Vzniklý impuls k řešení problematiky tváření karosářského dílu (Rám Combi pravý) nabízel široké pole působnosti a stanovení metodiky testů a výzkumu v této oblasti. Bylo nastoleno hledisko řešení problematiky vzhledem k známým technologickým zkouškám, které bylo dále rozšířeno o poznatky z vědního oboru materiálové inženýrství.

Pro hlubší poznání vlivu materiálu na velikost a rozvoj plastické deformace, bych doporučoval rozšířit sortiment zkoušených ocelí. Práce byla zaměřena na feritické oceli o vysoké čistotě s minimálním obsahem uhlíku. Pro názornost a jednodušší detekci by bylo dobré rozšířit sortiment zkoušených ocelí o jakostně odlišné šarže, tak aby bylo možné detekovat co nejdětailněji vliv inkluzí na plastickou deformaci v oblastech mezních přetvoření. Tímto by bylo možné vytvořit sortiment materiálů s detailním pohledem na materiálový rozbor a výskyt strukturních částic zejména pak jemných (sekundárních) precipitátů.

Z hlediska tváření pro analýzu tvařitelnosti a vlivu jemných precipitátů by bylo dále dobré sestavit a modelovat co nejširší sortiment stavů napjatosti vzhledem k výskytu jemných (sekundárních) precipitátů v daných oblastech. Je nutné dále konstatovat, že výsledné hodnoty byly omezeny identifikací dílčích inkluzí neboli rozlišovací schopností použitých přístrojů. Při požadavku na vyšší rozlišovací schopnost nad možnosti dostupných prostředků (TESCAN VEGA) nebylo možné detekovat nalezené jemné částice.

15. Přínos disertační práce

Předkládaná disertační práce napomáhá svojí výzkumnou částí k řešení problematiky tváření karosářských výlisků. Dále pak tato práce vychází z dlouholetých poznatků a zkušeností, které byly načerpány během mého působení v prostředí sériových lisoven nejen firmy Škoda Auto. Výzkumná část svými dílčími závěry se zaměřuje na konkrétní problémy a popisuje aktuální použití řešení této problematiky přímo v prostředí sériové výroby.

Na základě dílčích rozborů je možné stanovit jasný postup a metodu řešení vzniku trhlin v případě, kde není možné klasickými technologickými testy objasnit příčinu nestability materiálu. Impulsem vzniku této práce byla dlouhodobá nemožnost reklamace problematických materiálů, které vykazovali vznik trhlin. Protože dosavadní testy neprokázali nevhodnost použitých jakostí ocelí k tváření za studena, a proto nebylo dále možné postoupit reklamační řízení u výrobce oceli.

Výzkumná část proto byla záměrně soustředěna na takto problematické materiály a došlo tak k využití poznatků nejen z oboru teorie tváření, ale i z vědného oboru materiálového inženýrství. Stanovil se materiálový ukazatel, který byl identifikován jako intermetalická fáze typu Fe-Zn. Tento ukazatel byl identifikován u všech testovaných vzorků problematického materiálu s označením „V“. Na základě tohoto zjištění byla upravena metodika vyhodnocení kvality jakosti dodávaných ocelí. Dodavatel těchto svitků byl upozorněn na následující poznatky a došlo k upravení metodiky určení výstupní kvality jakosti dodávaných materiálů přímo u výrobce oceli.

Pro extrémně namáhané dílce není možné dodávat výrobci sériových dílů takto modifikované oceli. Vzniklé závěry z provedených analýz a experimentů jsou jasným vodítkem řešení situace, kdy není možné identifikovat příčiny vzniku plastické nestability pomocí běžných testů.

16. Závěr

Impulsem pro vznik této práce bylo prohloubení a rozšíření poznatků z oblasti technologie tváření tenkého plechu podpořené spoluprací s vědním oborem materiálového inženýrství. Na základě dlouhodobě neobjasněné příčiny vzniku namoženin popř. trhlin u nepravidelných karosářských výlisků byla nastolena otázka vysvětlení vzniku nestability tvářecího procesu na základě studia a analýzy rozvoje plastické deformace s následnými materiálovými rozbory testovaných materiálů.

V práci byly provedeny série testů, které se běžně využívají k účelům ověření technologických a materiálových parametrů. Pro analýzu byly vybrány materiály používané pro výrobu karosářského výlisku nepravidelného tvaru (Rám Combi pravý) s označením DC 06 ZE 50/50 BPO. Během procesu výroby se objevil problém, kdy docházelo k nestabilnímu chování materiálu (vzniku trhliny). Materiál z tohoto svitku je v práci označován písmenem „V“ jako vadný. Referenční materiál byl použit ze svitku o stejné jakosti, který však nevykazoval při výrobě většího počtu kusů závažnější závady způsobující znehodnocení výsledného dílu. Pro tento materiál se používá označení „D“ jako dobrý.

Průvodní analýza pro oba testované materiály byla statická zkouška tahem, aby bylo možné vyhodnotit základní materiálové vlastnosti (mez kluzu, mez pevnosti, tažnost a komplexní ukazatel tvařitelnosti) a následně porovnat výsledné hodnoty mezi dobrým a vadným materiálem. Materiál s označením „D“ vykazuje svými výslednými charakteristikami lepší vlastnosti ovlivňující tváření za studena. Při porovnání výsledných hodnot zkoušených materiálů („D“ a „V“) s materiálovými listy je však nutné konstatovat, že výsledné hodnoty odpovídají normativům stanovené normou DIN EN 10 152 a materiály jsou tudíž podle standardů výrobce ocele vhodné pro výrobu karosářských dílců.

Nelze opomenout, že při výrobě tohoto karosářského dílce dochází k prolínání oblastí, pro které je typické jednoosé namáhání s oblastmi, pro něž je typické dvouosé namáhání. Také je nutné podotknout, že při bližší analýze tvářeného dílu bylo zjištěno, že ke znehodnocení dílce dochází zejména v oblastech tažných rádiusů lisovacích nástrojů. Takže se zcela jistě pohybujeme v oblastech s předpokládanou vysokou deformací blížící se meznímu stavu přetvoření. Diagramy mezních přetvoření spolu

s křivkami mezních přetvoření byly sestaveny pomocí optického systému ARAMIS. Při porovnání výsledných hodnot KMP pro materiál „D“ a „V“ bylo zjištěno, že průběhy deformací mají podobný charakter, ale jsou u materiálu „D“ posunuty výše. Největší rozchod naměřených hodnot byl pozorován v krajních oblastech jednoosého a dvouosého namáhání. Materiál „D“ vykazoval schopnost dosáhnout vyššího stupně přetvoření vzhledem k danému stavu napjatosti. Tento ukazatel dále potvrzoval vhodnější tvařitelnost materiálu „D“ pro karosářské výlisky.

V následné části experimentálních měření byla pozornost zaměřena na rozvoj plastické deformace a její velikosti vzhledem k hloubce tahu. Oba materiály byly plasticky deformovány s kritériem ukončení zkoušky v okamžiku vzniku trhliny. Následně byly sestaveny diagramy popisující závislost velikost deformace φ_1 na hloubce tahu L_k . Cílem tohoto experimentu bylo sledování rozvoje plastické deformace a dále určení oblasti mezních přetvoření. Na základě vyhodnocení těchto diagramů bylo možné konstatovat rozdílné chování rozvoje plastické deformace mezi materiály „D“ a „V“. Bylo vyzorováno, že u materiálu s označením „V“ dochází při nižších hodnotách hloubky tahu a velikosti deformace ke vzniku trhliny neboli je dosaženo kritéria ukončení zkoušky dříve než u materiálu „D“. Tento trend byl pozorován pro všechny zkušební tělesa s proměnou šířkou přístřihu.

V závislosti na dosažení kritéria ukončení zkoušky (vzniku trhliny) byly dále určeny oblasti mezních deformací, které jsou vzhledem ke kvalitě karosářského dílce přípustné. Dosažení těchto oblastí bylo definováno za pomoci hodnoty L_{km} , která určovala limitní hloubku tahu, ke které byly vztaženy hodnoty mezních deformací φ_{km} . Tyto hodnoty byly dále konfrontovány mezi sebou pro materiál „D“ a „V“ a byl zjištěn shodný trend dosažení limitních deformací dříve u materiálu „V“ oproti materiálu „D“. Tento efekt poukazuje na vyšší tvařitelnost materiálu „D“ v mezních oblastech tažení.

Doposud dosažená zjištění poukazují na vhodnost materiálů „D“ a „V“ k výrobě karosářských dílců neboť i přes rozdílné mechanické vlastnosti a rozdílného chování v oblastech rozvoje plastické deformace nebyla zjištěna příčina popsanych nuancí mezi materiály „D“ a „V“. Oba materiály odpovídají uvedeným normativům a vzhledem k použití těchto materiálů k výrobě karosářských dílců, dosažené výsledky neprokazují nárok na reklamaci použitých materiálů.

Jelikož série technologických testů potvrdila schopnost vyšší tvařitelnosti u materiálu „D“ oproti materiálu „V“, ale neobjasnila příčinu rozdílu mechanických a technologických parametrů, bylo přistoupeno k materiálovým rozborům s cílem prohloubení znalostí v oblastech chování materiálu vzhledem k rozvoji plastické deformace.

Na základě materiálových rozborů dílčích vzorků, které byly sestaveny pro materiál „D“ a „V“ byly shrnuty následující poznatky. Nejprve byla pozornost zaměřena na určení chemického složení a geometrii zrn. Vzhledem výsledným hodnotám chemického složení u obou zkoušených materiálů nebyla zjištěna žádná výrazná diference mezi vzorky „D“ a „V“. Oba materiály vykazovaly shodně vyšší obsah Ti, který je dán chemickým složením ocele. Tento prvek zde má za úkol stabilizaci zrna a tvorbu intersticiálních tuhých roztoků s atomy nečistot (C, N..). Následovalo porovnání rozvoje geometrie zrna v různém stavu napjatosti a dále v oblastech bez plastického přetvoření. Výsledné hodnoty byly mezi sebou porovnány a v poměrných číslech nebyly zaznamenány žádné významnější geometrické odchylky rozvoje jednotlivých hranic zrn mezi vzorky z materiálu „D“ a „V“.

Následně byla pozornost zaměřena na vliv strukturních fází a detekování jednotlivých částic vzhledem k vlivu na rozvoj plastické deformace. Na základě fraktografických analýz byla za pomoci metody EDX detekována řada jemných částic různého charakteru a sortimentu v oblastech zrn. Tyto částice byly detekovány jak na hranicích zrn, tak v interiéru zrna. Na základě výskytu a analýzy těchto částic byly stanoveny skupiny jemných a hrubých precipitátů, které by vysvětlovaly přítomnost těchto dílčích fází v dané oceli. Prvním faktorem neboli příčinou vzniku těchto částic je samotné tepelné zpracování oceli a následné tepelné operace daného svitku (žíhání). Vzhledem k vlivu na rozvoj plastické deformace a to zejména v mezních oblastech přetvoření, bylo prokázáno, že jemné (sekundární precipitáty), které se u daných materiálů vyskytují, mají svým charakterem významný vliv na rozvoj plastické deformace. Tyto jemné částice typu TiS, TiN jsou významnými retardéry rozvoje plastické deformace a působí tak dále na vznik a rozvoj trhlin materiálu. Jelikož tyto částice byly potvrzeny u daného typu oceli pro materiál „D“ a „V“ nemohli býtí přímou příčinou vzniku trhlin u materiálu „V“.

Zásadní rozdíl, který byl, zaznamenám v distribuci a charakteru výskytu jemných částic byl analyzován u materiálu s označením „V“, a to v podpovrchovém pásmu cca. 80 µm od povrchové vrstvy. V této hloubce byla identifikována souměrně z obou stran vrstva jemných částic. Na základě EDX identifikace byla stanoveno složení ze zastoupení většinového obsahu Zn a Fe. Podle uspořádání jednotlivých fází bylo konstatováno, že se jedná o intermetalika typu Fe-Zn. Tato intermetalika mohou působit svým charakterem a rozložením jako významné retardéry plastické deformace u materiálu „V“. Tento poznatek poukazuje na rozdílný faktor v distribuci jemných částic u zkoušeného materiálu „V“.

Na základě informací o povrchové úpravě tohoto materiálu, kdy se jedná o elektrolyticky pozinkovaný plech, bylo možné přisuzovat výskyt těchto intermetalik opakovanému procesu pozinkování u výrobce oceli. Výrobce byl o tomto zjištění zpětně informován a potvrdil, tak skutečnost, že daný materiál s označením „V“, byl opakovaně pozinkován z důvodu dosažení kvality povrchové vrstvy. Dále bylo dodavatelem upozorněno, na fakt, že daný materiál dosahuje předepsaných materiálových hodnot podle požadavků zákazníka, které odpovídají EN 10 152.

Jelikož problematický díl (Rám Combi Pravý) se řadí svým nepravidelným tvarem mezi extrémně náročné dílce, bylo prokázáno, že výskyt podpovrchových intermetalik typu Fe-Zn v tomto případě působí jako retardéry plastické deformace a je příčinou vzniku trhlin.

Na základě popsaného rozboru a výsledných hodnot *není možné doporučit* takto opakovaně pozinkované materiály k výrobě extrémně složitých karosářských výlisků jako je např. rám vozů, blatník, střecha, kapota.

17. Seznam Příloh

- 1. Protokoly ze statické zkoušky tahem: Materiál „D“**
- 2. Protokoly ze statické zkoušky tahem: Materiál „V“**
- 3. Kmenová karta pro analyzované materiály „D“ a „V“**
- 4. Rozbor částic TiN**
- 5. Rozbor částic TiS**
- 6. Vliv inkluzí na průběh tvárného lomu**
- 7. Morfologie lomové plochy**

LISOVNA – Škoda Auto a.s.
Mechanické hodnoty materiálu



Svitek: „D“

Vypracoval: Tomáš Jíra

Název dílu: Rám Fabia Com.

Jakost materiálu: DC 06 ZE 50/50 BPO

Norma:ISO 6892-1

Naměřené hodnoty:

Číslo vzorku	Úhel odběru	Rp 0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A80 [%]	r-prům. [-]	def. exp. n [-]
1	90°	136	278	48,6	2,59	0,242
2		138	278	48,1	2,67	0,240
3		137	275	49,8	2,62	0,240
4	45°	144	283	46,5	2,28	0,235
5		141	281	49,3	2,19	0,236
6		140	281	48,6	2,23	0,236
7	0°	134	282	48,0	2,02	0,247
8		135	282	49,0	2,08	0,245
9		136	281	50,1	2,06	0,247

Statistika: úhel odběru 90°

90° n = 5	Rp 0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A80 [%]	Ag %	r-prům. [-]	def. exp. n [-]
x	137	277	48,8	25,6	2,63	0,240
min.	136	275	48,1	25,5	2,59	0,240
max.	138	278	49,8	25,7	2,67	0,242
s	1	2	0,9	0,1	0,04	0,001



Statistika: úhel odběru 45°

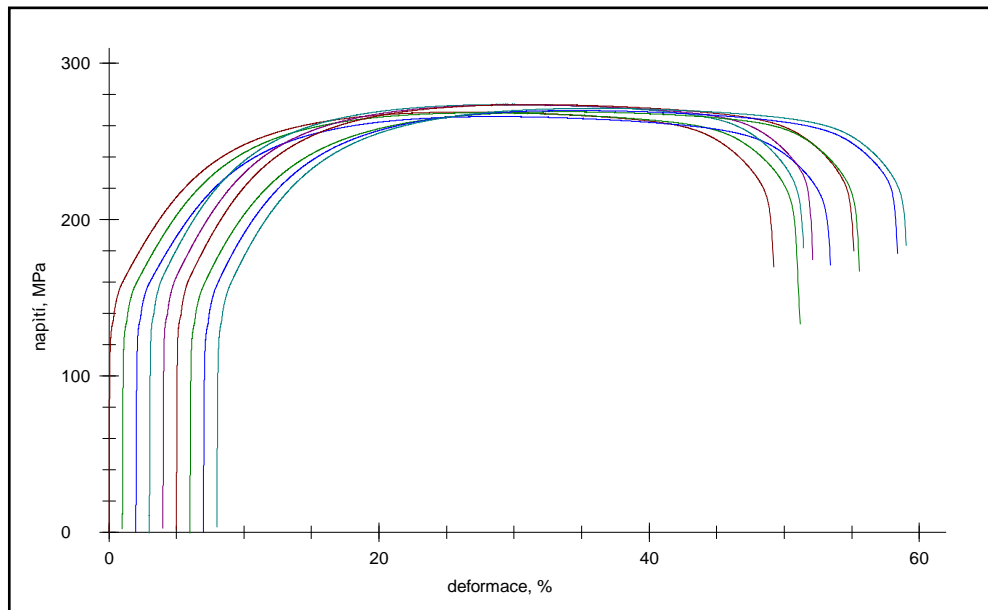
45° n = 5	Rp 0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A80 [%]	Ag %	r-prům. [-]	def. exp. n [-]
x	141	282	48,1	25,7	2,23	2,23
min.	140	281	46,5	25,3	2,19	0,235
max.	144	283	49,3	26,0	2,28	0,236
s	2	1	1,5	0,000	0,4	0,04

Statistika: úhel odběru 0°

0° n = 5	Rp 0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A80 [%]	Ag %	r-prům. [-]	def. exp. n [-]
x	135	282	49,0	26,9	2,05	0,246
min.	134	281	48,0	26,6	2,02	0,245
max.	136	282	50,1	27,1	2,08	0,247
s	1	0	1,0	0,2	0,03	0,001



Průběh jednotlivých zkoušek:



LISOVNA – Škoda Auto a.s.
Mechanické hodnoty materiálu



Svítek: „V“

Vypracoval: Tomáš Jíra

Název dílu: Rám Fabia Com.

Jakost materiálu: DC 06 ZE 50/50 BPO

Norma:ISO 6892-1

Naměřené hodnoty:

Číslo vzorku	Úhel odběru	Rp 0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A80 [%]	r-prům. [-]	def. exp. n [-]
1	90°	144	295	46,5	2,53	0,229
2		144	295	46,5	2,52	0,228
3		148	296	45,5	2,44	0,225
4	45°	148	300	45,7	2,00	0,226
5		149	299	45,1	2,07	0,226
6		147	299	46,5	2,02	0,226
7	0°	143	299	46,6	1,95	0,236
8		144	300	46,9	1,94	0,235
9		143	298	48,8	1,92	0,235

Statistika: úhel odběru 90°

90° n = 5	Rp 0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A80 [%]	Ag %	r-prům. [-]	def. exp. n [-]
x	145	295	46,1	24,3	2,50	0,227
min.	144	295	45,5	24,1	2,44	0,225
max.	148	296	46,5	24,5	2,53	0,229
s	2	0	0,6	0,2	0,05	0,002

**Statistika: úhel odběru 45°**

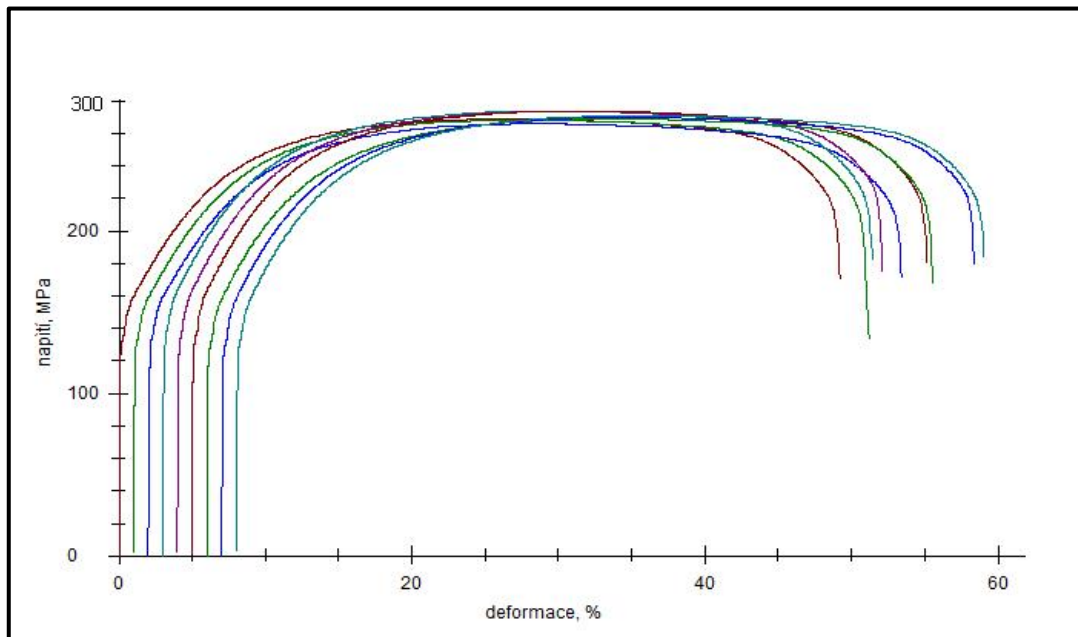
45°	Rp 0,2	Rm	A80	Ag	r-prům.	def. exp. n
n = 5	[MPa]	[MPa]	[%]	%	[-]	[-]
x	148	299	45,8	25,0	2,03	0,226
min.	147	299	45,1	24,8	2,00	0,226
max.	149	300	46,5	25,3	2,07	0,226
s	1	0	0,7	0,2	0,03	0,000

Statistika: úhel odběru 0°



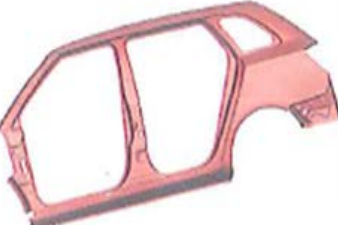
0°	Rp 0,2	Rm	A80	Ag	r-prům.	def. exp. n
n = 5	[MPa]	[MPa]	[%]	%	[-]	[-]
x	143	299	47,3	25,9	1,94	0,235
min.	143	298	46,6	25,4	1,92	0,235
max.	144	300	48,4	26,7	1,95	0,236
s	0	1	1,0	0,7	0,01	0,001



Průběh jednotlivých zkoušek:



Kmenová karta pro analyzované materiály „D“ a „V“

	Kmenová karta č.: 740- A05	Název dílu / Benennung: Rám dveří L/P			
	Blechkennkarte Nr.: Svitok/Coll	1	GRS	Tver	Číslo materiálu/Material-Nummer: ECE 15 081120
Předpis materiálu/Werkstoffvorschrift EN 10 152 QP A 012 DC 06 ZE 50/50 BPO	Tloušťka/Dicke[mm] 0,80	Šířka/Breite[mm] 1600	Krok/Schnitt [mm] 3160 1. 3160 2.	Tolerance/Toleran EN 10 131	
Omezení/Begrenzung: Směrné hodnoty Richtwerte	-0,11/+0,01 Mez kluzu Rp0,2 Streckgrenze	1600S Pevnost v tahu Rm Zugfestigkeit	Tažnost A 80 Dehnung	Poměr Rp02/Rm Streckgrenzenverh.	Erichsen Tiefung
typ povrchu / drsnost Oberfläche / Rauheit cut off: 2,5 mm	EDT Ra 1,0 + 1,5 μm PC >=60 1/cm	PRETEX Ra 1,0 + 1,5 μm EBT-pseudostoch. PC >=60 1/cm	měř. délka/Gesamtmeßstrecke: 12,5 mm		
Hmotnost svitku min / max kg Coilgewicht min / max kg	23 000 / 28 000				
strana/Seite	Vnější / Außenseite	Vnitřní / Innenseite			
razítko / Stempl kontrol.strana / Gutseite povlak/Bezug	x x x	x			
konzervace / Beölung povolené oleje/zuläßige Öle	Anticorit PL 3802S - 39; 1,2-1,7g/m2 Ensic PL 1608; 1,2-1,7g/m2	Multidraw PL 61; 1,2-1,7g/m2 Wedolit N22-3; 1,2-1,7g/m2			
Schema/Bild	Balicí předpis č. : / Verpackungsvorschrift VZT1-0001/07				
 	Použití Verwendzweck	Tváření Verformung	povrch - požadavky Oberflächeanforderung	Svařování Schweißen	
	Vnější díl Aussenteil	x nejtěžší schwierigste	x zvláště vysoké besondersstreng	x tavné Schmelz-	
	Vnitř. díl-viditel. Innent.-sichtbar	těžké schwierige	vysoké streng	odporové Widerstand-	
	Vnitřní díl Innenteil	složité starke	zvýšené erhöht	odpor. švové Rollenschweis.	
		normální normale	normální üblich	jiné andere	
	Zpracovatelnos *1) 1% Die Verarbeitbarkeit				
	Datum	Druh změny/Art der Veränderung		Změnu požaduje Änderung fordert	

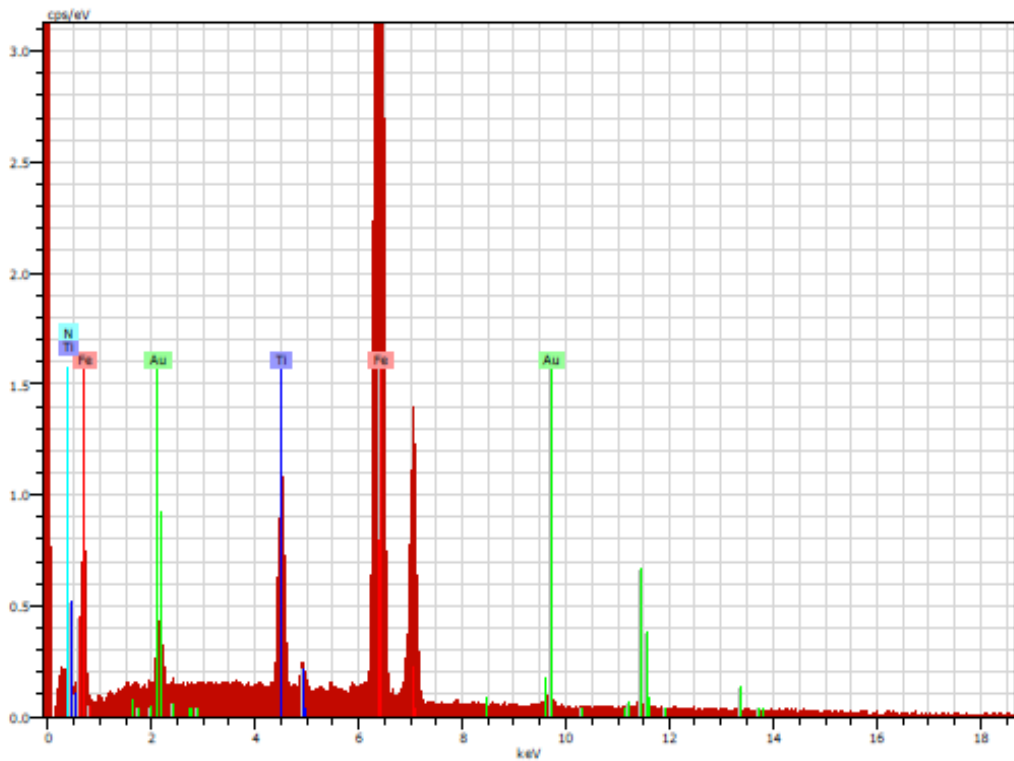
Precipitáty: TiN

datum měření : 06/09/2009
 číslo vzorku: 1 / 3-L-09/09
 číslo/typ analýzy : 01 / bodová

fáze: precipitáty TiN
 oblast anal.: výbrus
 eV/PC/WD:

Spectrum: Acquisition

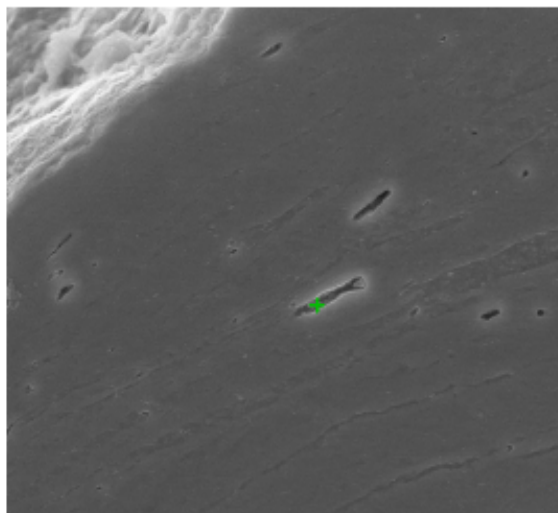
El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
N	7	K-series	12,00	11,62	35,00	18,0
Ti	22	K-series	4,97	4,82	4,24	0,2
Fe	26	K-series	81,82	79,24	59,84	2,1
Au	79	L-series	4,45	4,31	0,92	0,2
Total:			103,25	100,00	100,00	



Precipitáty: TiS

datum měření : 06/09/2009
 číslo vzorku: 3-P-09/09
 číslo/typ analýzy : 01 / bodová

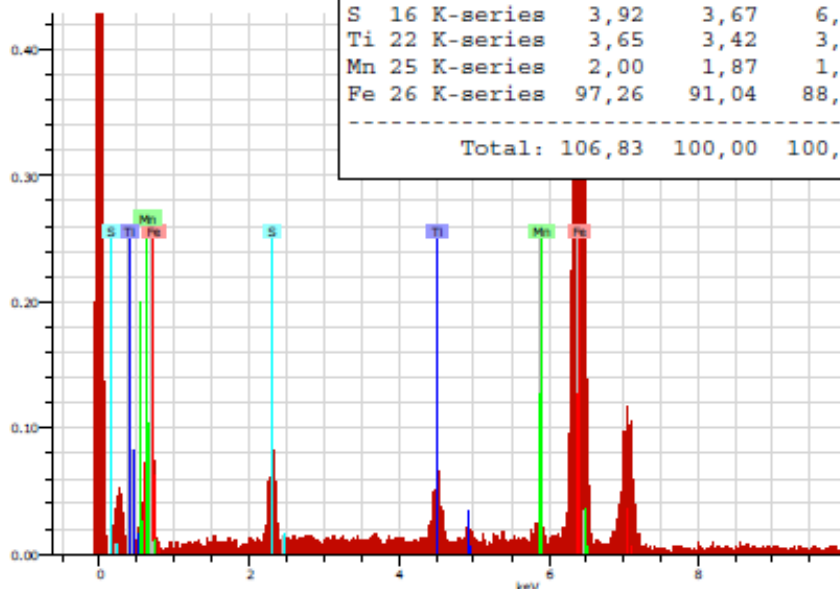
fáze: sulfid
 oblast anal.: výbrus
 eV/PC/WD:



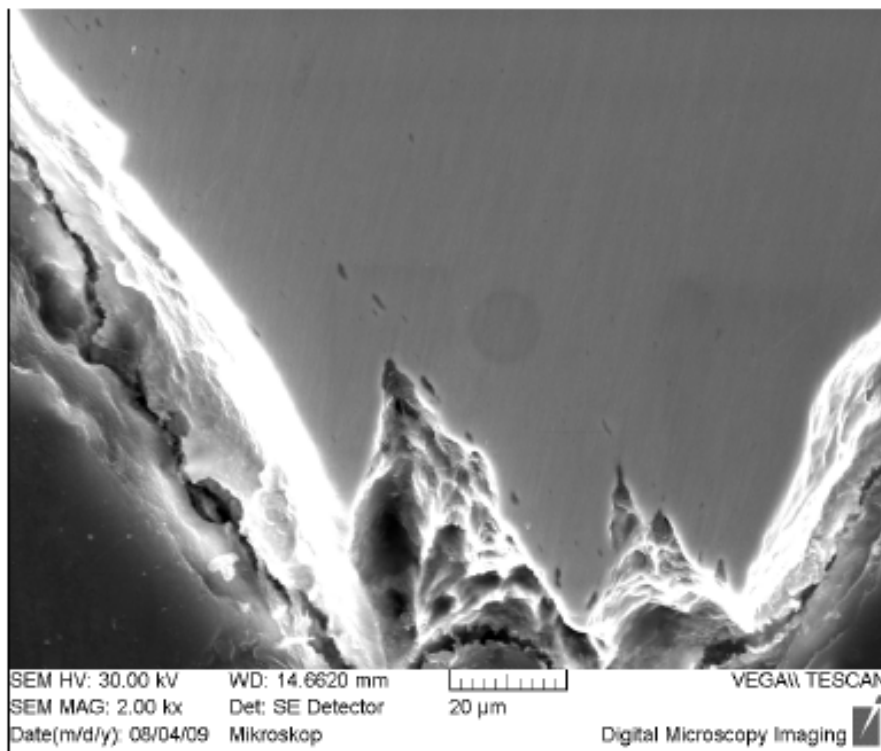
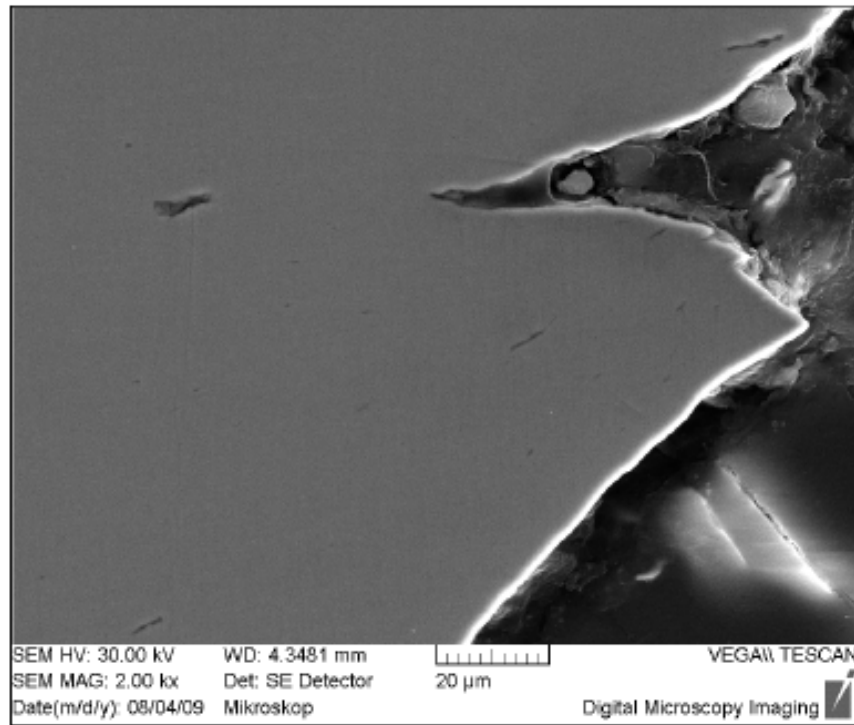
46
 05-MAG-1000-10kV-00000

Spectrum: Acquisition

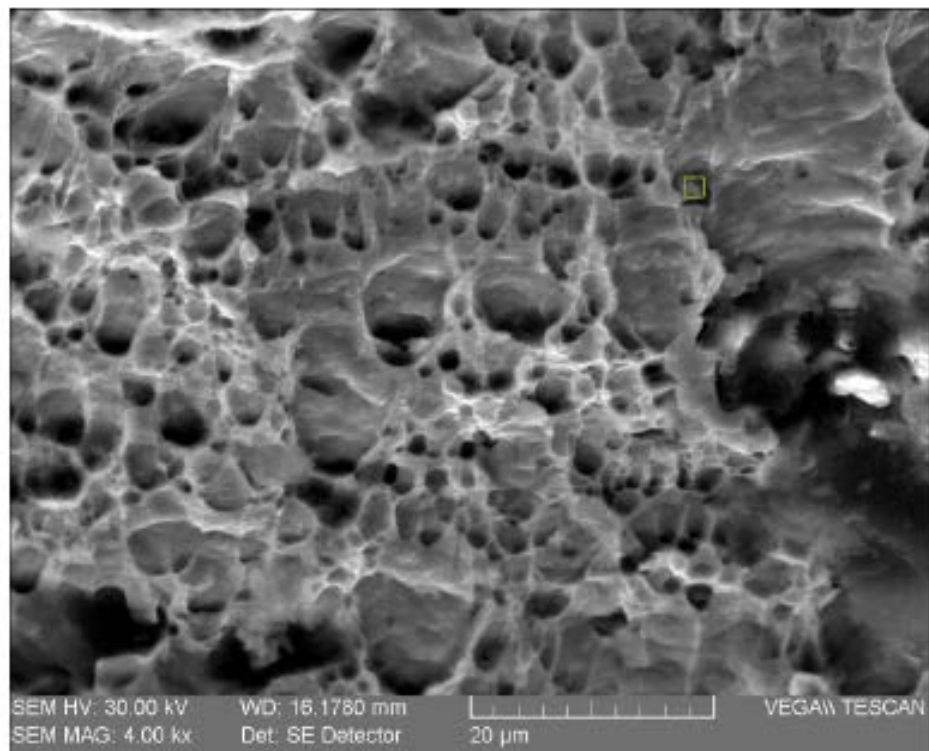
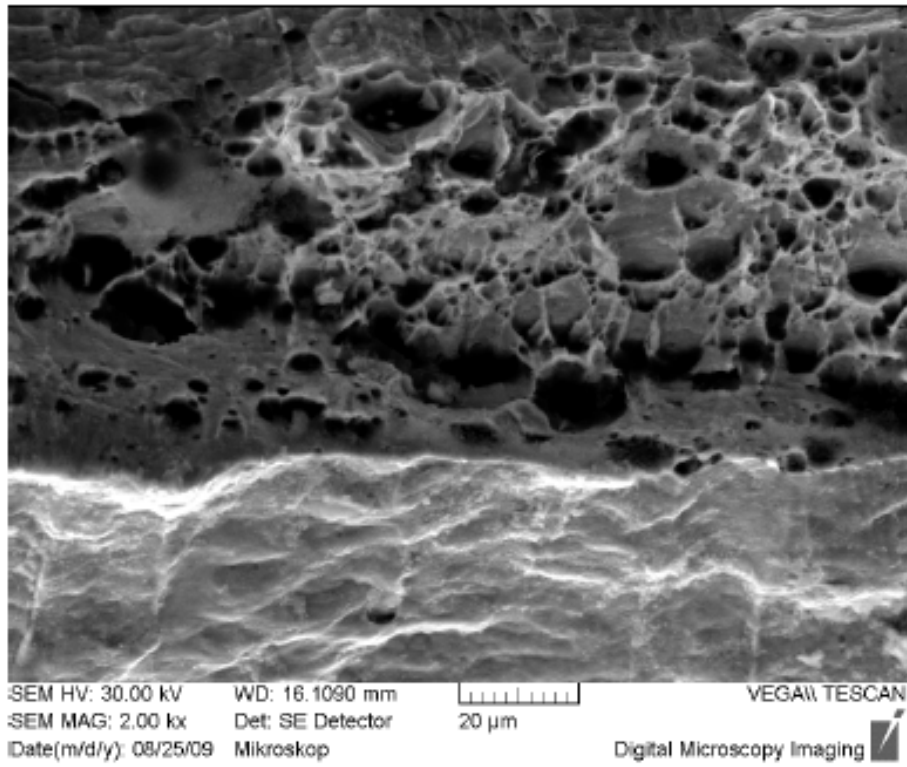
El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
S	16	K-series	3,92	3,67	6,19	0,3
Ti	22	K-series	3,65	3,42	3,86	0,2
Mn	25	K-series	2,00	1,87	1,84	0,3
Fe	26	K-series	97,26	91,04	88,12	2,7
Total:			106,83	100,00	100,00	



Vliv inkluzí na průběh lomu



Morfologie lomové plochy



18. Literatura

- [1] BŘEZINA, Richard; PETRUŽELKA, Jiří. *Úvod do tváření II*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2002. ISBN 80-248-0068-3.
- [2] DAVIS, Joseph R.. *ASM Metals Handbook: Vol. 14: Forming and Forging*. 9. ASM International. 1988. ISBN 978-0871700209.
- [3] Internetový článek *Tools for troubleshooting*[online].[cit. 2016-17- 03]. Dostupné z: www.thefabricator.com/article/stamping/tools-for-troubleshooting
- [4] LENFELD, Petr.. *Technologie II: Tváření kovů*. Liberec: Technická univerzita v Liberci. 2009. ISBN 978-80-7372-466-5.
- [5] Internetový článek *Stamping die design*[online].[cit. 2016-02- 001].

Dostupné z: www.plm.automation.siemens.com/en_us/products

[/nx/for-manufacturing/tooling-fixture-design/stamping-die-design.shtml](http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/nx/for-manufacturing/tooling-fixture-design/stamping-die-design.shtml)

- [6] FOREJT, Milan. *Teorie tváření*. 2. vyd. Brno: CERM, 2004. ISBN 80-214-2764-7.
- [7] Internetový článek *Akademie tváření: Odpružení v plošném tváření*[online].[cit. 2001-05- 11]. Dostupné z: [http://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-odpruzeni -v-plosnem-tvareni.html](http://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-odpruzeni-v-plosnem-tvareni.html)
- [8] PETRUŽELKA, Jiří. ŠARMAN, Arnošt. *Plastic anisotropy of cold sheets*. VŠB-TU Ostrava, 1999, s. 35-44, ISSN 1213-0471
- [9] Internetový článek *Is the new Aluminum the Death of Automotive Steel?*[online].[cit. 2015-08- 18]. Dostupné z: www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/10540/Is-the-New-Aluminum-the-Death-of-Automotive-Steel.aspx
- [10] MICHNA, Š. *Encyklopedie hliníku*. Prešov, 2005. ISBN 80- 89041-88-4
- [11] MM Průmyslové spektrum: *Technologie pro lehké automobilové konstrukce*, [online]. 2012 [cit. 2012-06-27] Dostupné z <http://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-pro-lehke-automobilove-konstrukce.html>

- [12] Zadpoor, A., ABBAS, S., and BENEDICTUS, R., *Formability prediction of high strength aluminum sheets*, International Journal of Plasticity, Vol. 25, 2009, pp. 2269-2297
- [13] Internetový článek *Magnesium: Scores heavily in auto sector due to light weight* [online]. [cit. 2016-03-18].
Dostupné z: <http://content.icidirect.com/mailimages/magnesium.htm>
- [14] MORDIKE, L., EBERT, T. *Magnesium – Properties – Application – Potention*, Materials science and engineering, 2001, roč. 1, č. 302, s.37-45
- [15] MKAI, T., YAMANOI, M., WATANABLE, H., HIGASHI, K. *Ductility enhancement in AZ31 magnesium alloys by controlling its grain structure*, Scripta Materialia, 2001 s. 89-94.
- [16] MM Průmyslové spektrum: *Výrobní procesy ve stavbě lehkých karosérií*, [online]. 2016 [cit. 2016-09-01]
Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/tvareci-a-vyrobni-procesy-ve-stavbe-lehkych-karoserii.html>
- [17] TIŠNOVSKÝ, M.; MÁDLE, L. *Hluboké tažení plechu na lisech*. 1. vyd. Praha : SNTL, 1990. ISBN 80-03-00221-4.
- [18] Škoda Auto a.s.: Firemní prezentace: *Koncepce karoserie VW*, [online]. 2016
Dostupné pro Š-A: [www.skoda-auto.cz/PUBLIC/Koncepce karoserie](http://www.skoda-auto.cz/PUBLIC/Koncepce_karoserie)
- [19] SOLFRONK, Pavel. 2013. *Teorie a technologie zpracování plechů: Materiály pro stavbu karoserie* [online]. Liberec [cit. 2015-09-21].
Dostupné z: www.techno-mat.cz/data/katedry/ksp/KSP_TZP_PR_01_CZE_Solfronk_Materialy_pro_stavbu_karoserie_automobilu.pdf
- [20] LUŇÁČEK, Martin. 2009. *Stabilita procesu tváření v závislosti na technologii přípravy polotovaru*. Liberec. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci.
- [21] Škoda Auto a.s.: Interní dokumenty: *DIN EN 10 152*, [online]. 2015
Dostupné pro Š-A: www.skoda-auto.cz/nolis
- [22] GIRMAN, Vladimír a Valentina HRABČÁKOVÁ. 2012. *Kovové materiály automobilových konstrukcí: II.- Karoséria a karosárske plechy* [online]. Košice [cit. 2015-09-21]. ISSN 1337 – 8953. Dostupné z: <http://www.materialing.com/sites/default/files/Kovov%C3%A9%20materi%C3%A1ly%20automobilov%C3%BDch%20kon%C5%A1trukcii%20II-%20-%20Karos%C3%A9ria%20a%20karos%C3%A1rske%20plechy.pdf>

- [23] ŘÁDA, Aleš. 2010. *Návrh nástroje pro výrobu tvarových přístřihů* Brno
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [24] ArcelorMittal[online]. 2016 [cit. 2016-09-01]. Dostupné z.:
<http://luxembourg.arcelormittal.com/icc/arcelor-lux-fr/med/d41/d4123c97-4854-e314-706c-0507d7b2f25d,11111111-1111-1111-1111-111111111111.pdf>
- [25] EMMERICH, Thomas. ThyssenKrupp [online]. 2015 [cit. 2015-09-21].
Dostupné z.: www.ika.rwth-aachen.de/veranstaltung/emmerich.pdf
- [26] Internetový článek: [online].[cit. 2016-09-01]. Dostupné z:
<http://www.vwvortex.com/features/technical-features/golf-7-technicalpreview/attachment/tailor-rolled-blank/>
- [27] MM Průmyslové spektrum: *Sendvičové konstrukce*, [online]. 2014 [cit. 2014-12-06] Dostupné z:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/sendvicove-konstrukce>
- [28] DOUBEK, Pavel.: *Výzkum deformačního chování vysokopevnostních plechů při vyšších rychlostech deformace*, Disertační práce, TUL, Liberec, 2004, 166 stran.
- [29] ZIMOVČÁK, P., HRABČÁKOVÁ, L., ČERNÍK, M.: *Mikrostructural Properties of High Strength IF Steels*, Metal 2008, Hradec nad Moravicí
- [30] Ústav materiálových věd a inženýrství, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, [online] [cit. 2015-10-15]
Dostupné z: www.ipm.cz/group/fracture/vyuka/doc/P02.ppt
- [31] KVACKAJ, T.
Výzkum ocelových materiálů pro ultraláhkové osobní automobily.
Acta Metallurgica Slovaca, 11, 2005, 4(389-403)
- [32] *Carbon Fiber Cello from Luis and Clark*. [online].[cit. 2015-10-05].
Dostupné z: <http://www.bornrich.com/entry/carbon-fiber-cello-from-luis-and-clark/>
- [33] Internetový článek: *Lamborghini: Karbonová přítomnost supersportů* [online].[cit. 2015-10-05].
Dostupné z: www.auto.cz/lamborghini-karbonova-pritomnost-supersportu-54837
- [34] Internetový článek: *Audi Collision Frame Technology Guide* [online].[cit. 2016-10-03].

Dostupné z: <http://app.audi-presskit.de>

- [35] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
- [36] Internetový článek *ARAMIS – 3D motion and deformation* [online]. [cit. 2014- 02- 11].
Dostupné z: <http://www.gom.com/metrology-systems/aramis.html>
- [37] DVOŘÁK, M. a kol. *Technologie II*. 3. dopl., vyd., Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. 238 s. ISBN 80-214-2683-7.
- [38] JÍRA, T.: *Využití optického systému ARGUS 4M pro analýzu deformace v kritických oblastech karosářského výlisku*, Diplomová práce, TU Liberec 2007
- [39] ČSN EN ISO 6892-1 (42 0310) *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za okolní teploty*. 2009
- [40] KLIBER, J. *Základy tváření kovů*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2008. 278 s. ISBN 978-80-248-1794-1
- [41] KRATOCHVÍL, P. LUKÁČ, P. SPRUŠIL, B. *Úvod do fyziky kovů I*, SNTL, Praha 1984
- [42] DVOŘÁK, M.: *Vliv mikrostruktury materiálu a morfologie povrchu na tvařitelnost při plošném tváření*, Diplomová práce, ČVUT Praha, 2009
- [43] MEETHAM, G. W. VAN DE VOORDE, M. H. *Materials for high temperature engineering applications*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2000, ISBN 3-540-66861-6
- [44] CEJP, J. MACEK, K. – PLUPHRACH, G. : *Grain Size and Mechanical Properties of Cast Steels 19MnTi5 a 20MnNbV5*. In: 20. National Conference on Heat Treatment with International Participation, Jihlava, 2004, pp.39-43.
- [45] BOČEK, Jan.: 2008. *Vliv rychlosti přetvoření na mezní deformace pevnostních plechů*. Liberec. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci.
- [46] SOBOTKA, Jan. 2008. *Hodnocení mechanických vlastností nových vysokopevnostních materiálů*. Liberec. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci.

- [47] BAREŠ, K. *Lisování* In KOLEKTIV AUTORŮ.. Praha: SNTL, 1971.
- [48] ČADA, R. *Technologie I: objemové a plošné tváření zastudena: (návody do cvičení)*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009. 89 s. ISBN 978-80-248-2126-9.
- [49] DVOŘÁK, M.; GAJDOŠ, F.; NOVOTNÝ, K. *Technologie tváření. Plošné a objemové tváření*. 4. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. 169 s. ISBN 978-80-214-3425-7.
- [50] KRÍŽ, R.; VÁVRA, P. *Strojírenská příručka*. 1. vyd. Praha: Pedagogické nakladatelství SCIENTIA, 1998. 80 s. ISBN 80-7183-054-2.
- [51] BUCHAR, Z.: Diagramy mezních přetvoření tenkých hlubokotažných plechů, Kandidátská disertační práce, TUL, Liberec, 1987, str. 16-120.
- [52] JOSHI, M. *StrainStudies In Sheet Metal Stampings*. [online]. [cit. 2016-01-15]. Dostupné z: www.metalwebnews.com/howto/sheetmetal/sheetmetal-study.pdf
- [53] MIELNIK, M. *Metalworking science and engineering*. New York: McGrawHill, 1991, ISBN 00-704-1904-3.
- [54] VLK, M.; FLORIAN, Z. *Mezní stavy a spolehlivost*. Brno: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, 2007.
- [55] KOUTSKÝ, J.; JANDOŠ, F.; KAREL, V. *Lomy ocelových částí*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1976.
- [56] ANDERSON T.L.: *Fracturemechanics, Fundamentals and Applications*, CRCPress, 6, 1995
- [57] KUNZ, J.: *Aplikovaná lomová mechanika*. 4. přeprac. vyd. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005, 1991. 272 s. ISBN: 80-01-03306-6
- [58] Internetový článek *Křehký a tvárný lom, lineární a elastoplastická lomová mechanika* [online]. [cit. 2012-05-11]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/3075432/>
- [59] ALAXIN, J: *Fyzikální metalurgie II.*, Liberec: Vysoká škola strojní a textilní, 1986. 175s. ISBN 55-820-86
- [60] Internetový článek *Marsurf PS 1 Mobile Roughness Measuring Instrument* [online]. [cit. 2014-07-15]. Dostupné z: <https://www.mahr.com/en/Services/Production-metrology/>
- [61] GULT, M.: *Hodnocení tvařitelnosti tenkých plechů při vysokých rychlostech deformace*, Bakalářská práce, TU Liberec 2012

- [62] ISO/DIS 12004-2. *Metallic materials -Sheet and strip - Determination of forming limit curves - Part 2: Determination of forming limit curves in laboratory.*
- [63] SCHMIDOVA EVA: *Analýza jakosti hlubokotažných ocelí*, Univerzita Pardubice, 2009, 21s
- [64] PTÁČEK, L, V. *Nauka o materiálu I,II*. Brno: CERN, 2002. ISBN 80-7204-248-3

19. Publikace autora

- [1] JÍRA, T. - SOLFRONK, P. - BÍLEK, D.: Presence of structural pieces of areal local thinning in deep drawing steel. In: 20 Mezinárodní konference METAL 2011, 18 – 20.5.2011, Brno, ČR, s. 44-47 CD, ISBN 978-80-87294-22-2
- [2] JÍRA, T. - SOLFRONK, P. - VOBORNÍK, P.: Monitoring of deformation area of body stamping by using of non-contact optical system. In: Hutnické listy LXIV, 2011, ČR, s. 72-74 Časopis, ISSN 0018-8069
- [3] JÍRA, T. - SOLFRONK, P. - BÍLEK, D.: Problematics of forming of irregular bodywork stampings from deep-drawing steels and determination of critical deformation size In: Mezinárodní Baťova konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky, 2011, Zlín, ČR, CD, ISBN 978-80-7454-013-4
- [4] JÍRA, T. - SOLFRONK, P. - BÍLEK, D.: Forming Technology of Irregular Bodywork Stampings from Deep-drawing Steels In: Mezinárodní Baťova konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky, 2011, Zlín, ČR, CD, ISBN 978-80-7454-013-4
- [5] BÍLEK, D., – SKRBEK, B. – JÍRA, T.: Application of nondestructive ultrasound structuroscopy for strength determination of composite with geopolymer matrix. In: 20 Mezinárodní konference METAL 2011, 18 – 20. 5. 2011, Brno, ČR, CD, ISBN 978-80-87294-22-2
- [6] BÍLEK, D., – SKRBEK, B. – JÍRA, T.: Description and application of modern ultrasound necking Phased Array for internal defects diagnostics In: Mezinárodní Baťova konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky, 2011, Zlín, ČR, CD, ISBN 978-80-7454-013-4
- [7] SKRBEK, B., – BÍLEK, D. – SOLFRONK, P., - JÍRA, T.: Application of non-destructive ultrasound structuroscopy to strength determination of deep-drawing steels In: 19th International Conference transMOT&AUTO 2011, Varna, Bulharsko, 2011, Bulharsko, s. 74-76, ISBN 1310-3946
- [8] JÍRA, T., – SOLFRONK, P. – BÍLEK, D.: The optimization of the manufacture bodywork stamping for agricultural machines by the help of ultrasonic method XIII mezinárodní konference mladých vědců, Praha, 29.6.-1.7.2011, Praha, ČR, CD, ISBN 978-80-213-2194-6

- [9] JÍRA, T., – SOLFRONK, P.: Iniciale vzniku tvárného lomu u karosářských výlisků z hlubokotažných ocelí In: Manufacturing Technology-Journal for science, research and production, Ústí nad Labem, 12/2011, ČR, s. 61-64 Časopis, ISSN 1213-2489
- [10] JÍRA, T., –BĚLKOVÁ, M., – SOLFRONK, P.: MEASUREMENT OF DEFORMATION SIZE AND ITS COURSE REGARDING TO TENSIO NDEPTH In: Mezinárodní Bařova konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky, 2012, Zlín, ČR, CD, ISBN 978-80-7454-138-4
- [11] JÍRA, T., –BĚLKOVÁ, M., – SOLFRONK, P.: STANOVENÍ VELIKOSTÍ HLAVNÍCH A VEDLEJŠÍCH DEFORMACÍ U KAROSÁŘSKÝCH VÝLISKŮ In: Strojírenská technologie, 01.06.2012, Ústí nad Labem, ČR, s. 19. časopis, ISSN 1211-4162
- [12] JÍRA, T., –SOLFRONK, P., – BÍLEK, D.: DETERMINATION OF LIMIT STATE OF BODYWORK STAMPING USING FORMING LIMIT DIAGRAMS In: Mezinárodní Bařova konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky, 2012, Zlín, ČR, CD, ISBN 978-80-7454-138-4
- [13] JÍRA, T., –BĚLKOVÁ, M., – SOLFRONK, P.: THE USING OF THE OPTICAL SYSTÉM ARGUS 4M IN THE CRITICAL AREA In: 2nd International conference, 2012, Plzeň, ČR, CD, ISBN: 978-80-87294-34-5
- [14] JÍRA, T., –SOLFRONK, P., – BÍLEK, D.: THEPROCESS OF PRODUCING METAL PARTS In: Mezinárodní konference mladých vědeckých pracovníků, 19.04.2012, Praha, ČR, CD, ISBN 978-80-7454-138-4

20. Profesní kariéra

Škoda Auto a.s., Mladá Boleslav, Česká Republika

Projektový Koordinátor výroby metalurgického nářadí 03/2016 –

- Řízení a koordinace výroby metalurgického nářadí u externích partnerů
- Spolupráce a kooperace s externími partnery
- Řízení a koordinace odborného týmu
- Zodpovědnost za kvalitu výsledného produktu
- Zodpovědnost za dodání nářadí zákazníkovi

Volkswagen Group China, Changchun, Čína

Projektový vedoucí výroby lisovacího nářadí 09/2014 – 02/2016

- Řízení a koordinace výroby lisovacího nářadí
- Dodržení termínů a finančních cílů projektů
- Řízení a koordinace odborného týmu
- Zodpovědnost za kvalitu produktu v rámci koncernových projektů
- Předání finálního produktu zákazníkovi

Škoda Auto a.s., Mladá Boleslav, Česká Republika

Koordinátor výroby lisovacího nářadí 05/2012 – 09/2014

- Řízení a koordinace výroby lisovacího nářadí ve Škoda
- Spolupráce a kooperace se zahraničními dodavateli
- Řízení a koordinace odborného týmu
- Zodpovědnost za kvalitu produktu
- Zodpovědnost za dodání lisovacího nářadí zákazníkovi

Impromat, GmbH, České Budějovice, Česká Republika

Projektový Inženýr

03/2008 – 04/2012

- Plánování a realizace zahraničních projektů (Indie_SAIPL, Rusko_GAZ)
- Vedení mezinárodního týmu (dlouhodobé služební cesty)
- Předání produktu cílovému zákazníkovi do trvalého užívání
- Technická péče o produkt
- Řízení a náběh technických změn v zahraničí