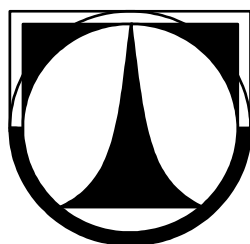


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ



DISERTAČNÍ PRÁCE

**Vliv rychlosti přetvoření na mezní deformace
pevnostních plechů**

2008

Ing. Jan Boček

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Obor 2303V002 Strojírenská technologie

zaměření
Tváření kovů

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

Vliv rychlosti přetvoření na mezní deformace pevnostních plechů

The Effect of the Strain Rate on the Forming Limits of High-strength Steel Sheets

Ing. Jan Boček

Vedoucí katedry: prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld

Školitel: doc. Ing. Mirko Král, CSc.

Rozsah práce a příloh:

Počet stran práce: 161

Počet stran příloh: 21

Počet příloh: 7

Počet obrázků: 109

Počet tabulek: 25

Počet vzorců: 74

Anotace

Téma práce: **Vliv rychlosti přetvoření na mezní deformace pevnostních plechů.**

Klíčová slova: Rychlost deformace, tahová zkouška, DMP.

Cílem disertační práce je vyhodnotit vlastnosti a chování pevnostního materiálu Docol 1200M za různých rychlostních podmínek. Tato ocel je využívána v automobilovém průmyslu pro výztuže karosérií (například práh vozu Škoda Roomster), a proto je velmi důležitý výzkum jejího chování při rychlostech simulujících náraz vozidla na překážku. Experiment je rozdělen do dvou hlavních částí. V první je provedeno ověření základních mechanických hodnot tahovou zkouškou (tři rychlosti $v = 10, 600$ a $24000 \text{ mm.min}^{-1}$). Součástí je také vyhodnocení změn vnitřní struktury v závislosti na zátěžných rychlostech. Druhá část spočívá ve zjištění mezní deformace vzorků opatřených deformační sítí a tažených do okamžiku vzniku trhliny, to při různých stavech napjatosti (různá šíře vzorků) a různých testovacích rychlostech ($v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$, $v_2 = 17,78 \text{ m.s}^{-1}$ a $v_3 = 22,5 \text{ m.s}^{-1}$). Toho je docíleno na hydraulickém lisu CBA300/63 a rychlostním pneumatickém přípravku. Vizualizace zjištěných hodnot je realizována pomocí diagramů mezních přetvoření, získaných při různých deformačních rychlostech.

Summary

Theme of thesis: **The Effect of the Strain Rate on the Forming Limits of High-strength Steel Sheets.**

Keywords: Strain Rate, Tensile Test, FLD.

The aim of the Doctoral Thesis is to evaluate the properties and behaviour of a high-strength material Docol 1200M at different strain rates. This steel is used in the car industry for car-body reinforcements (for example the doorsill in Škoda Roomster car), and therefore the research of its behaviour at velocities simulating the crash of the car against a barrier is important. Experiments are divided into two main parts. In the first one a tensile test is used to establish basic mechanical properties at different velocities (10, 600 and $24000 \text{ mm.min}^{-1}$). The evaluation of changes of internal structure due to the respective strain rates is also included. In the second part the forming limits of specimens provided by a strain grid are found. The specimens were deep drawn at different stress states (specimens with a different width) and by different testing velocities ($2.08 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$, 17.78 m.s^{-1} and 22.5 m.s^{-1}) until a crack became visible. A hydraulic press CBA300/63 and a high speed pneumatic experimental stand were used. Forming Limit Diagrams received at different strain rates are used to present the results.

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval lidem, kteří mě podporovali při zpracování této disertační práce.

Zejména mému školiteli doc. Ing. Mirko Královi, CSc. za velmi cenné rady a připomínky, Ing. Janu Slámovi z firmy Škoda Auto a.s., Ing. Marii Válové z Ústavu strojírenské technologie ČVUT v Praze, Ing. Jiřímu Sobotkovi a ostatním pracovníkům z Katedry strojírenské technologie Oddělení tváření kovů a plastů za poskytnutou pomoc, rady a materiály. Bez jejich dohledu a vedení by tato práce nevznikla.

Nakonec bych také chtěl poděkovat svým rodičům za podporu a trpělivost v průběhu celého mého studia.

OBSAH

SEZNAM DŮLEŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	7
1. ÚVOD	10
2. AUTOMOBILOVÁ KAROSÉRIE	13
2.1. Konvenční metody stavby automobilové karosérie	14
2.2. Nové trendy výroby automobilové karosérie	15
2.2.1. Svařované přístřihy	16
2.2.2. Vývalky proměnné tloušťky	17
2.2.3. Sendvičové materiály	18
2.2.4. Tváření kapalinou	19
2.2.5. Tváření vnitřním přetlakem	20
3. PŘEHLED MATERIÁLŮ POUŽÍVANÝCH PRO VÝROBU KAROSÉRIE	21
3.1. Stručná charakteristika jednotlivých materiálů	21
3.1.1. Hlubokotažné plechy z ocelí uklidněných hliníkem	22
3.1.2. Plechy z IF ocelí	23
3.1.3. Plechy z IF ocelí s BH efektem	23
3.1.4. Plechy z DP ocelí	24
3.1.5. Plechy z TRIP ocelí	25
3.1.6. Plechy z TWIP ocelí	26
3.1.7. Plechy z CP ocelí	27
3.1.8. Plechy z martenzitických ocelí	27
3.2. Mechanizmy zpevnění plechů	28
3.2.1. Zpevnění tuhého roztoku	29
3.2.2. Zpevnění jemnozrnnou strukturou	29
3.2.3. Precipitační zpevnění	29
3.2.4. Zpevnění dvoufázovou a vícefázovou strukturou	29
4. ZKOUŠKY HODNOCENÍ PEVNOSTNÍCH PLECHŮ	30
4.1. Statická zkouška tahem	30
4.1.1. Stručný popis zkoušky	30
4.1.2. Vyhodnocení zkoušky	31
4.2. Zkouška vrubové houževnatosti	36
4.3. Bariérová zkouška	38
4.4. Diagram mezních přetvoření	40



4.4.1. Definování mezních stavů	41
4.4.2. Metody určování mezních stavů	42
4.4.3. Experimentální metody určování DMP	44
4.4.4. Vyhodnocení deformačních sítí	45
4.4.5. Statistické vyhodnocení KMP	52
5. FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ PROCES TAŽENÍ	54
5.1. Rychlost deformace	55
5.1.1. Definice rychlosti deformace	56
5.1.2. Zjištění rychlosti deformace	57
5.1.3. Vliv rychlosti deformace na vlastnosti materiálu	58
5.2. Teplota	59
5.3. Stav přetvoření	60
5.4. Tření	61
6. ANALÝZA NAPJATOSTI PŘI TAŽENÍ RONDELŮ	64
6.1. Rozdělení desek	64
6.1.1. Desky tlusté	65
6.1.2. Desky střední tloušťky	65
6.1.3. Desky tenké	66
6.1.4. Membrány	66
6.2. Výpočet desek	66
6.2.1. Desky tlusté	67
6.2.2. Desky střední tloušťky	67
6.2.3. Desky tenké	68
6.2.4. Membrány	78
6.3. Oblast použitelnosti jednotlivých modelů	79
6.4. Obecné případy kruhových desek	80
6.5. Výsledné zhodnocení	80
7. CÍLE EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI	81
8. CHARAKTERISTIKA ZKOUŠENÉHO MATERIÁLU	82
8.1. Údaje výrobce	82
8.1.1. Obecná charakteristika materiálů typu Docol	82
8.1.2. Zvolený materiál Docol 1200M	83
8.2. Experimentálně zjištěné hodnoty	85



8.2.1. Hodnocení struktury materiálu	86
8.2.2. Základní mechanické vlastnosti	90
8.2.3. Zkouška tahem - $t = 2 \text{ mm}$	91
8.2.4. Zkouška tahem - $t = 0,7 \text{ mm}$	107
8.2.5. Dílčí zhodnocení	115
9. DIAGRAMY MEZNÍCH PŘETVOŘENÍ	119
9.1. Postup experimentu	119
9.1.1. Příprava zkušebních vzorků	119
9.1.2. Nanesení deformační sítě	121
9.1.3. Tažení vzorků	122
9.1.4. Měření deformovaných elementů	130
9.2. DMP materiálu Docol 1200M	132
9.2.1. DMP1 - $v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$	133
9.2.2. DMP2 - $v_2 = 17,78 \text{ m.s}^{-1}$	134
9.2.3. DMP3 - $v_3 = 22,5 \text{ m.s}^{-1}$	135
9.2.4. Dílčí zhodnocení	136
9.3. Rozložení deformace v okolí trhliny	139
9.4. Modelový výpočet sil a napětí při průhybu rondelu	142
10. DISKUZE VÝSLEDKŮ DISERTAČNÍ PRÁCE	148
11. DOPORUČENÍ PRO DALŠÍ VÝZKUM	153
12. ZÁVĚR	154
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	156
PUBLIKAČNÍ ČINNOST K TÉMATU PRÁCE	159
SEZNAM PŘÍLOH	161

SEZNAM DŮLEŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

<u>Označení:</u>	<u>Rozměr:</u>	<u>Význam:</u>
a, b, c	-	regresní koeficienty
$A_{50\text{ mm}}$	%	tažnost, prodloužení počáteční měřené délky (50 mm) v %
A_g	%	homogenní tažnost, prodloužení při největším zatížení v %
A_x	%	tažnost
b_o	mm	počáteční šířka zkušební tyče
b_u	mm	nejmenší šířka zkušební tyče po lomu
C	MPa	modul monotónního zpevnění
c_d	s^{-1}	rychlost deformace
c_i	s^{-1}	intenzita rychlosti deformace
CP		vícefázová ocel
DMP (FLD)		diagram mezních přetvoření
DP		dvoufázová ocel
E	MPa	modul pružnosti v tahu
F	N	zkušební síla
f	-	koeficient tření
$F_{\max}, F_m$	N	maximální síla, síla na mezi pevnosti
h	mm	tloušťka tenké desky nebo membrány
IF		ocel bez intersticií
KMP (FLC)		křivka mezních přetvoření
k_o	MPa	přetvárný odpor
k_{os}	MPa	střední přetvárný odpor
k_p	MPa	přetvárná pevnost
KUT	-	komplexní ukazatel tvárnosti
L_o	mm	počáteční délka měřeného úseku zkušební tyče
L_u	mm	délka měřeného úseku zkušební tyče po lomu
M	MPa	závislost mechanické vlastnosti kovu na teplotě
m_φ	-	ukazatel stavu deformace
m_σ	-	ukazatel stavu napjatosti
MS		martenzitická ocel
N	N	normálová síla

n	-	exponent deformačního zpevnění
p_2, p_3	kPa	zkušební tlaky příslušných diagramů mezních přetvoření
q	MPa	přídavné napětí
r	mm	poloměr tenké kruhové desky nebo membrány
r_a	-	součinitel normálové anizotropie
$ R , S, K, L$	-	výpočtové konstanty teorie tenkých desek
R	MPa	smluvní napětí
R_e	MPa	výrazná mez kluzu
R_m	MPa	mez pevnosti v tahu
$R_{p0,2}$	MPa	nevýrazná mez kluzu
R^2	-	spolehlivostní hodnota matematické aproximace
s	-	směrodatná odchylka
S_o	mm ²	počáteční plocha příčného průřezu zkušební tyče
S_u	mm ²	nejmenší plocha příčného průřezu zkušební tyče po lomu
T	N	tečná třecí síla
t	mm	tloušťka plechu
t_o	mm	počáteční tloušťka zkušební tyče
TRIP		ocel s transformačně indukovanou plasticitou
TWIP		ocel s plasticitou indukovanou dvojčatěním
u	mm	posuv
UH	-	ukazatel hlubokotažnosti
v	mm.min ⁻¹	testovací rychlost tahové zkoušky
v_1, v_2, v_3	m.s ⁻¹	zkušební rychlosti diagramů mezních přetvoření
w	mm	průhyb
x_s	-	směrově střední hodnota
X_S	-	plošná anizotropie
Z	%	kontrakce
ZP	MPa	zásoba plasticity
γ	-	zkos
ε	-	poměrné prodloužení (smluvní deformace)
$\varepsilon_{\text{celkové}}$	-	deformace celkové části tyče mezi čelistmi trhačického stroje
$\varepsilon_r, \varepsilon_t$	-	radiální a tečné poměrné prodloužení (smluvní deformace)

τ	MPa	tečné smykové napětí
μ	-	Poissonova konstanta (pro kovy $\mu = 0,3$)
μ_P	-	součinitel tření při plastické deformaci
σ	MPa	skutečné normálové napětí
$\sigma(0)$	MPa	normálové napětí ve středu membrány
σ_i	MPa	intenzita napětí
σ_m	MPa	skutečné normálové napětí na mezi pevnosti
σ_r, σ_t	MPa	normálové napětí radiální a tečné
σ_r', σ_t'	MPa	normálové membránové napětí radiální a tečné
σ_r'', σ_t''	MPa	normálové ohybové napětí radiální a tečné
$\Delta\varphi_P$	-	rozdíl průměrných hlavních deformací
$\Delta\varphi_{P\%}$	%	rozdíl průměrných hlavních deformací v %
$\Delta\varphi_P$	-	rozdíl průměrných intenzit hlavních deformací
$\Delta\varphi_{P\%}$	%	rozdíl průměrných intenzit hlavních deformací v %
φ	-	logaritmická deformace (skutečná deformace)
φ_1, φ_2	-	hlavní a vedlejší logaritmická deformace
φ_{1K}	-	mezní deformace interpolačního polynomu
φ_{1kj}	-	deformace regresní polynomické křivky druhého stupně
$\varphi_{1\max}, \varphi_{1\min}$	-	maximální a minimální hlavní deformace měřeného souboru
φ_{1P}	-	průměrná hlavní deformace měřeného souboru
$\varphi_{1PH}, \varphi_{1PO}$	-	průměrná hlavní deformace elementů na hrotu a okraji trhliny
φ_i	-	intenzita deformace
φ_{1P}	-	průměrná intenzita hlavní deformace měřeného souboru
φ_{K1kj}	-	konfidenční interval
φ_{T1kj}	-	toleranční interval

1. ÚVOD

Automobilový průmysl, zejména odvětví osobních automobilů, je velmi dynamicky se vyvíjející obor, který čelí stálému tlaku okolí po zdokonalování svých výrobních konstrukcí. Tyto požadavky jsou z mnoha různých oborů a často jsou velmi náročné a tedy vyžadují jistý čas na své splnění. Přestože automobil jako dopravní prostředek prošel již od doby svého vzniku obrovským vývojem, stále zde vystávají přibližně dva nejpálčivější problémy. Prvním problémem je bezpečnost pasažérů a přepravovaného nákladu. Zadruhé je to spotřeba paliva (která, kromě jiného, úzce souvisí s hmotností vozu) a množství emisí výfukových zplodin. Starší metody konstrukce automobilu, a zejména jeho karosérie, neumožňovaly uspokojivé splnění obou požadavků, neboť pro zvýšení bezpečnosti bylo zapotřebí zvýšit mohutnost konstrukce karosérie, pro splnění druhého požadavku byl postup opačný. Jak je zřejmé bylo zapotřebí vyvinout nové způsoby konstrukce karosérie osobního automobilu, které by byly schopny splnit oba požadavky současně.

Pro řešení této problematiky se nabízí hned několik logických cest. Buď dosud používané ocelové hlubokotažné materiály nahradit jinými vhodnějšími (například slitinami hořčíku, hliníku a kompozitními materiály) nebo nahradit hlubokotažné oceli pevnostními a vysokopevnostními ocelovými plechy za současného využití nových technologií konstrukce karosérie. Ve výsledku se patrně jako nejlepší varianta konstrukce karosérie jeví kombinace obou zmíněných způsobů.

Vývojem zmíněných nových materiálů a technologií se zabývá řada firem. Již v roce 1991 se spojilo 33 největších světových výrobců oceli a vytvořilo projekt nazvaný ULSAB (Ultra Light Steel Auto Body). Do roku 1994 se poté k tomuto projektu přidaly další dva výrobci. Hlavním nositelem projektu byla firma Porsche Engineering Services. Cílem bylo vyrobit karoserii automobilu s použitím pevnostních materiálů a tím tak výrazně snížit jeho výslednou hmotnost a současně i náklady na její výrobu. Celý projekt dopadl úspěšně, novou karoserii tvořily z 80% pevnostní plechy vyrobené nově vyvinutou technologií Tailored Blanks (přístřihy vyráběné na míru) a také technologií hydroform (tváření kapalinou). Principy těchto metod jsou blíže popsány v kapitolách 2.2.1 a 2.2.4 [5, 23, 25, 28, 31, 35].

Pro velký úspěch a dosud nevyčerpaný inovační potenciál projektu ULSAB byly spuštěny další navazující projekty. Prvním byl ULSAC (Ultra Light Steel Auto Closure) určený pro odnímatelné části karosérie. Druhým byl projekt ULSAS (Ultra Light Steel Auto Structure), zaměřený na podvozkové díly automobilu. Nakonec byl v roce 2004 spuštěn třetí program nazvaný ULSAB-AVC (Advanced Vehicle Concept), který je pokračováním

projektu ULSAB a zahrnuje komplexní vývoj vozidel založených na výsledcích zmíněných projektů. Skelet karosérie má být tvořen z 90 % vysokopevnostními oceli nejrozličnějších druhů, které při srovnatelné tuhosti umožní menší tloušťky použitých plechů. Výsledným přínosem jsou, kromě vlastní nízkohmotnostní karosérie, samozřejmě i nově vyvinuté technologie, jako je zmiňovaná metoda Tailored Blanks nebo například tváření sendvičových plechů s polypropylénovou fólií (blíže viz. kapitola 2.2.3) [5, 24, 25, 28, 36, 37, 38].

Jak již bylo zmíněno, alternativou pevnostních plechů jsou dnes převážně lehké kovy, tedy slitiny například hliníku, hořčíku a titanu. Díly z hliníku a jeho slitin mohou být vakuově tlakově odlévány nebo provedeny ve formě pásů, plechů, výkovků a výlisků. Úspěšnou novou technologií, zvláště vhodnou pro stavbu automobilové karosérie, je v této oblasti výroba sendvičových dílů s vypěněným hliníkem (bližší popis je uveden v kapitole 2.2.3) [33].

Vývoj, zejména v automobilovém průmyslu, nezadržitelně spěje dále, a tak i vysokopevnostní ocelové karosérie a celohliníkové karosérie nejsou již nyní tím posledním ve vývoji tohoto odvětví techniky. V rámci německého programu Matech probíhá v koncernu Thyssen Krupp Stahl AG vývoj hliníkových ocelí s obsahem 5 až 9 % hliníku. Tyto nové materiály by měly přinést další snížení hmotnosti karosérie až o 10 %. Nakonec je tu i velmi zajímavý projekt, usilující o spojování některých částí karosérie laserovým pájením natvrdo. Pájení svou podstatou nezpůsobuje teplotní deformace spojovaných částí jako technologie svařování a přitom vykazuje dostatečnou pevnost pro méně náročné spoje. Současně pájení natvrdo snižuje složitost výroby a počet následných operací. Tato technologie, pokud dosáhne od laboratorních pokusů k praktické realizaci ve velkosériové výrobě, bude pravděpodobně hojně využívána, neboť lze pájením natvrdo laserem spojovat nejen ocelové díly, ale i hliník nebo nespojitelné materiály typu ocel-hliník [28].

Nyní bych se rád vrátil z technické budoucnosti zpět do současné automobilové produkce a blíže se zmíním o škále materiálů dnes běžně používaných pro výrobu karosérie osobního automobilu. Jak je zřejmé z předchozích vět, bude se tato specifikace týkat materiálů ocelových, neboť právě ty se v současnosti největší měrou využívají pro stavbu automobilové konstrukce.

Ocelové materiály můžeme rozdělit na hlubokotažné a vysokopevnostní plechy. Jejich základní charakteristiky jsou blíže uvedeny v kapitole 3.1. Klasickými materiály jsou hlubokotažné plechy a IF (Interstitials Free) oceli, které dnes již nedostačují svými parametry a jsou postupně nahrazovány plechy se zvýšenými mechanickými vlastnostmi (pevnostními a vysokopevnostními). K základním typům těchto materiálů patří DP (Dual Phase), TRIP

(Transformation Induced Plasticity), TWIP (Twinning Induced Plasticity), CP (Complex Phase) a MS (Martensite Steel) oceli. Mechanické hodnoty vysokopevnostních plechů jsou diametrálně odlišné od klasických hlubokotažných materiálů. Meze pevnosti se zde pohybují od 700 MPa až po extrémních 1500 MPa. Z toho vyplývá, že přednostně byly tyto materiály tvářeny za tepla, což je ovšem velice nákladné. Současný výzkum v oblasti pevnostních materiálů je proto zaměřen na zlepšení jejich lisovatelnosti za studena [2, 5, 26].

Proto si tato práce vzala za svůj hlavní cíl poznat a následně popsat vlastnosti a chování zvoleného vysokopevnostního materiálu při zkouškách tváření za studena, a tím tak přispět k hlubšímu poznání této problematiky. Materiál je hodnocen zejména ve vztahu k rychlosti deformace zkušebního dílu. Rozmezí hodnot zkoušených rychlostí je velké a umožňuje tak co nejkomplexnější pohled na chování zkoušeného materiálu za různých podmínek zatěžování.

Tato disertační práce je zpracována za podpory firmy Škoda Auto a.s., a tak jejím největším přínosem je uplatnění experimentálně zjištěných hodnot a poznatků, jako směrnic pro konstrukci a simulaci dynamicky namáhaných dílů karosérie, přímo v průmyslové výrobě osobních automobilů.

Předkládaná disertační práce je, v souladu s předchozím textem, zaměřena zejména na zkoumání těchto hlavních oblastí.

- Současný vývoj konstrukce automobilové karosérie, používané materiály a nové trendy.
- Zkoušky hodnocení tváritelnosti plechů a faktory, které je ovlivňují.
- Analýza napjatosti při procesu tažení vzorků.
- Metalografický rozbor vysokopevnostního materiálu a zjištění možných změn v jeho struktuře během experimentálního zatěžování.
- Výzkum vlivu rychlosti zatěžování na průběh a výsledek zkoušky tahem.
- Zjištění diagramů mezních přetvoření při různých rychlostech deformace.
- Komplexní pohled na problematiku lisovatelnosti vysokopevnostního materiálu za studena.

2. AUTOMOBILOVÁ KAROSÉRIE

Karosérie je část automobilu, která definuje jeho tvar a nabízí užité prostory pro přepravu nákladu a cestujících. Obecně můžeme celek karosérie rozdělit na díly nosné, které zaručují její dostatečnou tuhost a tedy i bezpečnost, a pohledové díly, které převážně určují výsledný designérský vzhled vozu, ale také se samozřejmě podílí svou měrou na pasivní bezpečnosti [5, 29, 34].

Vzájemné konstrukční uspořádání podvozku a karosérie lze rozdělit na tři základní varianty. První možností je karosérie upevněná na podvozku automobilu tak, že vytvoří samostatný nosný celek. Díky své velké tuhosti je pak podvozek schopen samostatné jízdy bez karosérie. Tuto kombinaci nazýváme podvozková karosérie. Druhou možností jsou karosérie polonosné. Ty přejímají část nosné funkce rámu vozidla, který tak může být méně dimenzován. V tomto případě již ovšem podvozek není schopen, vlivem jeho menší tuhosti, samostatné jízdy bez karosérie. Posledním typem uspořádání, který má v současné době dominantní využití mezi osobními automobily, je samonosná karosérie, která je znázorněna na obrázku Obr. 2.1 [29, 34].



Obr. 2.1: Automobilová karosérie

Samonosná karosérie plně přejímá nosnou funkci vozidla, a tím nahrazuje jak rám, tak i tuhý podvozek. Ostatní části automobilu se pak připevňují k této samonosné karosérii, čímž je dosaženo poměrně nízké hmotnosti vozidla, a tím i dobrých jízdních vlastností [29, 34].

Dle typu konstrukce můžeme obecně rozdělit i samonosné karosérie, a to opět do tří kategorií, které se odlišují způsobem výroby a zajištěním odpovídající tuhosti karosérie. Do první kategorie patří rámová samonosná karosérie, která obsahuje vestavěný neoddělitelný rám. Díky němu dosahuje požadovanou vysokou tuhost. Druhým typem jsou samonosné karosérie skořepinové, které jsou tvořeny tuhým celkem s vlastnostmi nosníku. Poslední skupinou jsou potom samonosné karosérie panelové [29, 34].

2.1. Konvenční metody stavby automobilové karosérie

Jak již bylo řečeno, v současnosti je v automobilovém průmyslu nejrozšířenější koncepcí pro výrobu osobního automobilu tzv. samonosná karosérie. Ta obsahuje velké množství různých dílů, jak je patrné z obrázku Obr. 2.2, z nichž jedny tvoří samonosný skelet, jenž je základní částí karosérie a druhé pak tvoří povrchové části karosérie [5, 34].



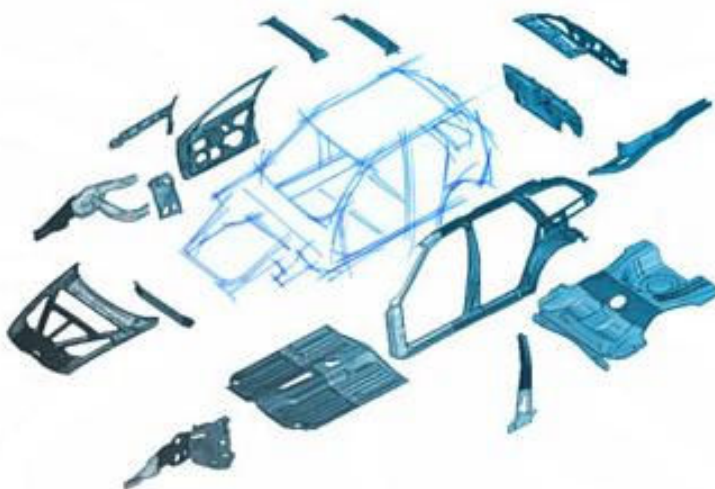
Obr. 2.2: Konvenční automobilová karosérie

Tyto prvky se dají lehce odnímat, což usnadňuje karosářské práce při opravách. Nosný skelet je nejčastěji bodově svařen nebo lepen a spolu s pohledovými díly povrchově upraven proti působení koroze nebo je použito materiálů, které korozi odolávají. Hlavní části konstrukce, jako například sloupky a prahy dveří nebo rámy oken se skly, tvoří tuhý homogenní celek [34].

Mezi základní bezpečnostní požadavky na karosérie patří tuhost přední a zadní deformační zóny (plánovaná tuhost musí při srážce co nejúčinněji ztlumit energii nárazu a zmenšit tak deformaci kabiny) a odolnost proti bočnímu nárazu, kterému čelí podélné nosníky s vylišovanými vruby nebo prohnuté tak, aby se deformsovaly vhodným způsobem a směrem. Tato celková koncepce dobře chrání posádku osobního automobilu před následkem případné havárie. Motor je obvykle v osobním automobilu uložen na pomocné nosníky vestavěné do karosérie, které jsou příčně propojeny a tvoří tzv. rámové lože. Aby nedocházelo k velkému přenosu motorových vibrací do vlastní karosérie, je použita sada tlumících bloků (tzv. silentbloků). Tento způsob uspořádání je vhodný pokud je motor s převodovkou a hnací nápravou v jednom celku. Samonosná karosérie ve svém důsledku umožňuje snížení hmotnosti vozidla o 10 a více procent oproti ostatním typům karosérie [34].

2.2. Nové trendy výroby automobilové karosérie

V současné době je vyvíjen stále větší tlak na automobilový průmysl, aby nově vyráběná vozidla splňovala přísné bezpečnostní předpisy a současně i předpisy ekologické. To konkrétně znamená, že automobily by měly mít co nejkompaktnější karosérii pro maximální pasivní bezpečnost pasažérů a současně co nejnižší hmotnost pro snížení spotřeby paliva. Těchto požadavků lze dosáhnout několika způsoby. Buď volbou vhodného materiálu nebo použitím nové výrobní technologie nebo nejlépe kombinací obou možností, jak je znázorněno na obrázku Obr. 2.3 [5, 28, 31].

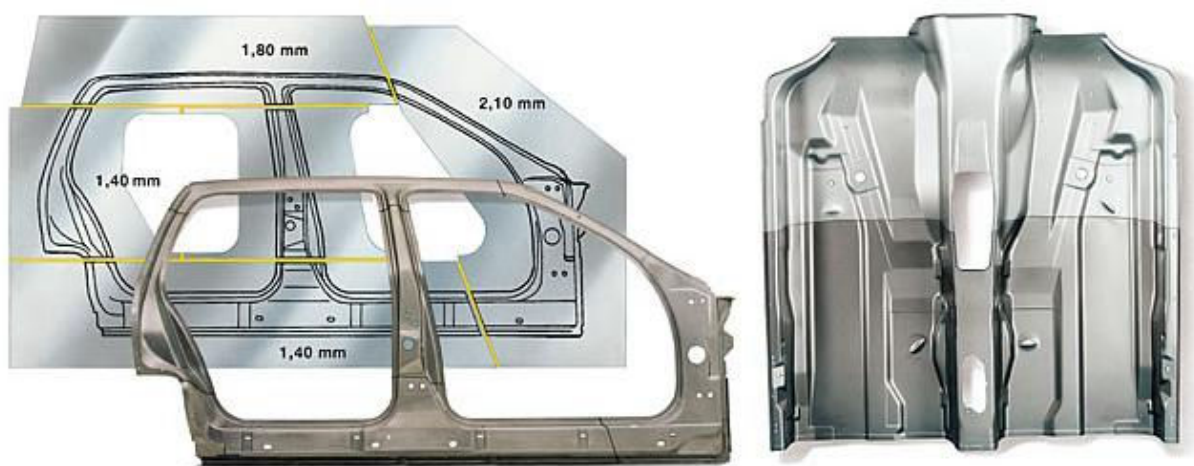


Obr. 2.3: Nové pojetí automobilové karosérie

Zlepšení vlastností konstrukce karosérie z pohledu použitého materiálu můžeme provést několika způsoby. Buď uplatněním materiálů dosud ne zcela běžných pro konstrukci karosérie osobního automobilu (například slitin lehkých kovů, plastů, kompozitů atd.). Nebo použitím nových ocelových materiálů s vyšší pevností a přesto dostatečnou tvárností pro zhotovení požadovaných dílů. Výsledného efektu může být docíleno samozřejmě i kombinací obou předchozích způsobů. Podrobnějším popisem ocelových materiálů, používaných v současné době pro konstrukci karosérie osobních automobilů, se zabývá kapitola 3. Nových výrobních technologií pro tvorbu karosérií existuje několik, k těm hlavním patří produkce svařovaných přístřihů (tzv. Tailored Blanks = přístřihů vyráběných na míru), výroba vývalků proměnné tloušťky, tváření sendvičových materiálů, hydromechanické tváření a tváření vnitřním přetlakem [5, 23, 24, 26, 31, 33].

2.2.1. Svařované přístřihy

Metoda tváření svařovaných přístřihů (Tailored Blanks) byla vyvinuta, jak bylo uvedeno v úvodu disertační práce, v rámci projektu ULSAB (Ultra Light Steel Auto Body). Tato nová technologie využívá lisování polotovarů svařených ze dvou a více materiálů rozdílných vlastností (jak je dobře vidět na obrázku Obr. 2.4), například materiálů s rozdílnou pevností, rozdílnou tloušťkou nebo rozdílnou povrchovou úpravou [5, 25, 28, 31, 35].



Obr. 2.4: Svařované přístřihy

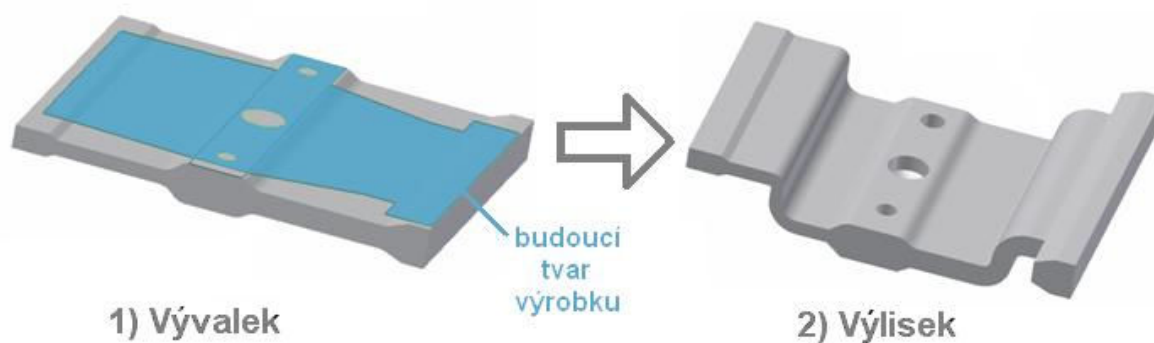
Při užití svařovaných přístřihů dochází ke snížení výsledné hmotnosti a ceny karosérie, což je ale bohužel částečně vyváženo dražšími a složitějšími nástroji. Spojení jednotlivých

dílů může být provedeno švovým svařováním nebo častěji svařováním laserovým paprskem. Výhody laseru jsou evidentní, jednak svarová housenka nepřesahuje základní materiál, čímž velmi usnadňuje následné lisování, a současně tato technologie vytváří velmi malou tepelně ovlivněnou oblast v okolí svaru. Při použití stávajících lisovacích nástrojů je nutné upravit přidržovače pro případné různé tloušťky svařovaných polotovarů, proto je výhodnější vytvořit nástroje nové, například s elastickými nebo dělenými přidržovači [5, 25, 28, 31, 35].

Jak vyplývá z uvedených poznatků, tato technologie je velmi perspektivní a nabízí široké možnosti využití zejména pro velké série výrobků, kdy vložené náklady do technologie budou rentabilní. Proto se tato nová technologie začíná stále více uplatňovat právě v automobilovém průmyslu. Kvalita hotových dílů je poté zkoumána klasickými zkouškami hodnocení plechů (například tahová zkouška nebo diagramy mezních přetvoření).

2.2.2. Vývalky proměnné tloušťky

Tato technologie, jak již napovídá její název, používá jako polotovar pro lisování dílů plechy o proměnné tloušťce. Zjednodušený princip celé technologie je naznačen na obrázku Obr. 2.5 [5].

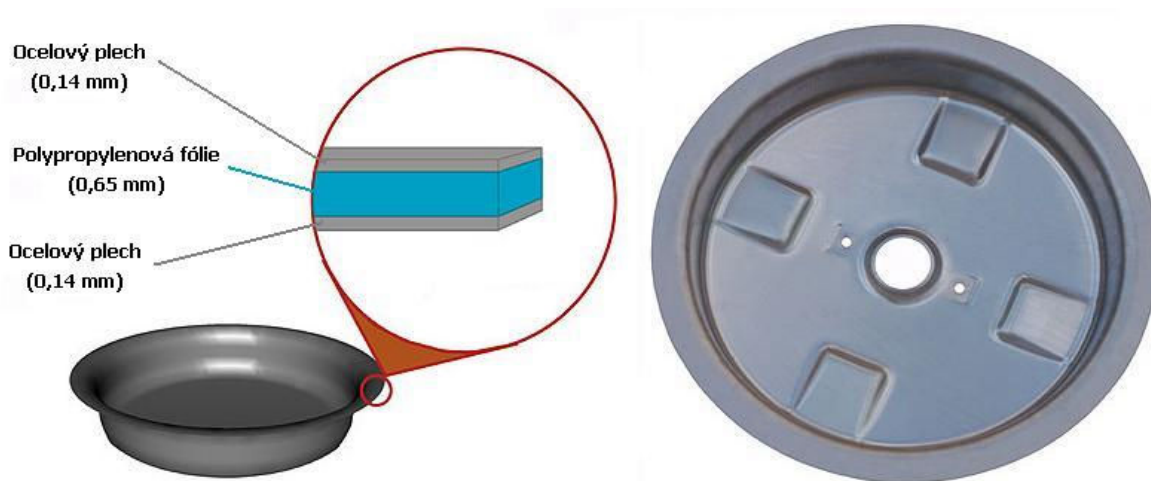


Obr. 2.5: Schéma výroby výlisku proměnné tloušťky

Takovéto přístřihy zaručují hladší průběh vlastního procesu tváření, neboť mají pozvolnější přechody v tloušťce materiálu než svařované přístřihy. Vlastní plech o nestejně tloušťce v jednom pásu je zhotoven řízenou redukcí na speciální válcovací trati. Pro potřeby každého budoucího výlisku lze tímto procesem vyrobit vhodný odpovídající polotovar, a tím můžeme dosáhnout poměrně velké úspory materiálu [5].

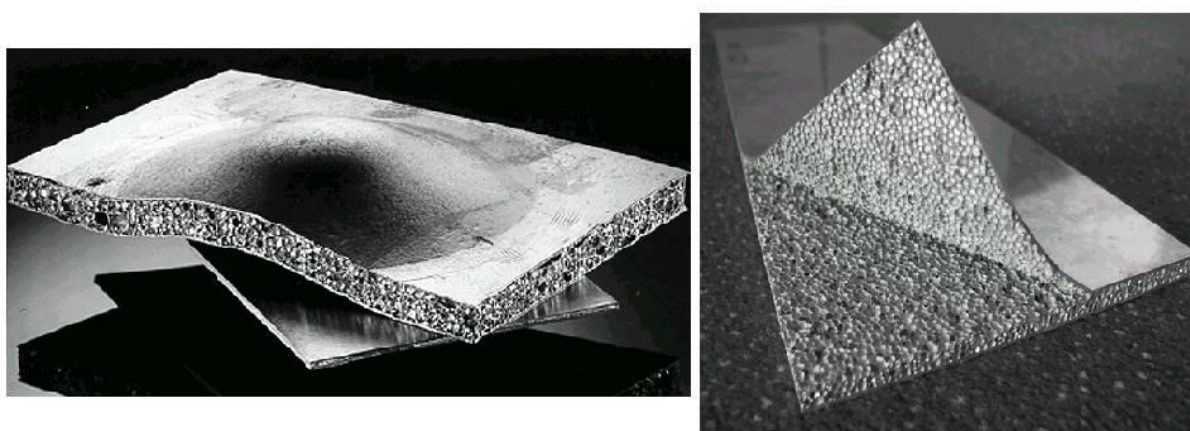
2.2.3. Sendvičové materiály

Sendvičové plechy jsou složeny z různých materiálů odlišného charakteru vzájemně pevně spojených. Struktura sendviče je nejčastěji tvořena dvěma plechovými povrchy a jádrem přenášejícím smyková napětí mezi těmito plechy [5, 24, 33].



Obr. 2.6: Příklad výrobku ze sendvičového materiálu s PP fólií

Jádro bývá nejčastěji dvou provedení, v prvním případě je tvořeno polymerní fólií (nejčastěji polypropylenovou), v druhém případě je mezera mezi plechy vyplněna kovovou pěnou (nejčastěji z hliníku nebo jeho slitin). Řez sendvičovým materiálem s polypropylenovou fólií je naznačen na obrázku Obr. 2.6, sendvičové materiály s hliníkovou pěnou jsou poté znázorněny na obrázku Obr. 2.7 [33].



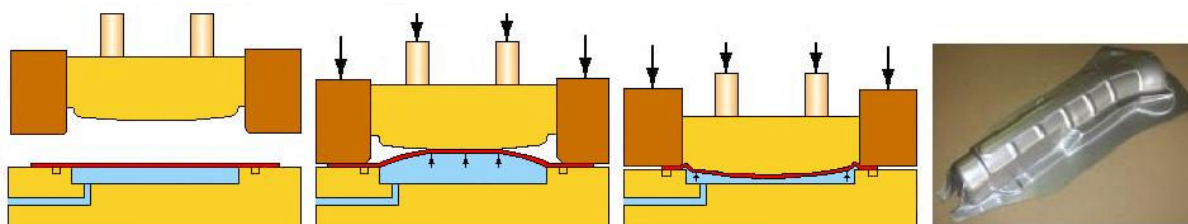
Obr. 2.7: Sendvičové materiály s hliníkovou pěnou

Tyto progresivní sendvičové materiály mají vysokou ohybovou pevnost a tuhost při nízké hmotnosti, a proto nachází vhodné uplatnění zejména v letecké a automobilové technice. Dalšími výhodami, oproti klasickým plechům, je například jejich únavová odolnost, odolnost proti šíření trhlin, odolnost proti rázům a dobrá akustická izolační schopnost. Všechny tyto vlastnosti zejména ovlivňuje použitý materiál jádra [5, 24, 33].

Sendvičové plechy se dají zpracovávat všemi klasickými technologiemi tváření, jejich svařování je však problematické. Materiály s PP fólií svařovat nelze a komplikace nastávají i v okamžiku kdy požadujeme, aby takový plech prošel spolu s karosérií pecí pro vypálení povrchového laku (teplota pece cca. 170°C) [5, 24, 33].

2.2.4. Tváření kapalinou

Tváření kapalinou lze rozdělit na dva základní způsoby, které se dále člení na několik dílčích technologií. Prvním způsobem je využití vnějšího tlaku kapaliny jako přetvárné síly při hlubokém tažení plechového polotovaru za studena (tlakovým médiem bývá nejčastěji voda) a druhým je kombinace klasického tažení a tváření tlakovou kapalinou, jak je naznačeno na obrázku Obr. 2.8. Tento druhý způsob se také někdy nazývá hydromechanické tváření, zkráceně HMT. Celý proces technologie HMT lze realizovat i na běžném lisu (s drobnými úpravami řízeného přívodu vodního přetlaku) s použitím relativně levných a jednoduchých nástrojů bez účasti mazadel, což je velmi ekologické [23].



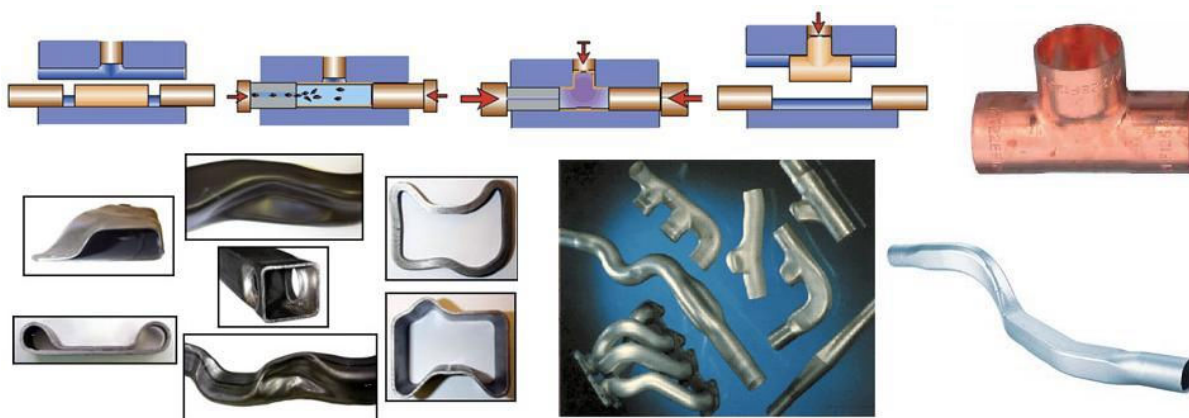
Obr. 2.8: Princip hydromechanického tažení plechů

Pro tuto technologii, zabývající se tváření plošných polotovarů, lze použít tenké plechy z plastických ušlechtilých materiálů, jako jsou například nerezavějící oceli, žárovevné slitiny, slitiny mědi, titanu, hliníku, oceli pro hluboké tažení, pozinkované a pohlínkované plechy, plátované oceli nebo molybdenové slitiny. Používaná tloušťka plechů bývá nejčastěji mezi 0,4 a 1 mm, u zvláště plastických materiálů a nehlubokých tahů 4 až 12 mm [23].

Výhody tváření kapalinou oproti klasickému hlubokému tažení jsou zjevné. Za prvé je dosaženo lepšího stupně přetvoření, za druhé je na výrobu stejné součásti zapotřebí menší počet tahů (často lze vyrobit požadovaný tvar výrobku pouze na jeden tah), a to bez mezioperačního žíhání. Za třetí s menším počtem tahů souvisí samozřejmě i menší počet použitých nástrojů a za čtvrté nedochází, při tažení přes vodní vrstvu, k téměř žádnému tření mezi tažnicí a plechem, a tudíž nedojde k poškození vnějšího povrchu polotovaru [23].

2.2.5. Tváření vnitřním přetlakem

Princip technologie tváření vnitřním přetlakem je dobře patrný z obrázku Obr. 2.9. Postup vlastního tvarování probíhá přibližně takto. Polotovar (nejčastěji trubka) je vložen do nástroje, v kterém dojde po utěsnění obou konců vzorku k přívodu tlakové kapaliny a následnému vytvarování polotovaru vnitřním přetlakem do požadovaného tvaru daného dutinou nástroje. Typickými představiteli výrobků této technologie, aplikované pro potřeby automobilového průmyslu, jsou například části karosérií a katalyzátorů, nádoby, vany, olejové filtry, přechody a koncovky výfukových potrubí (například u automobilů firmy Porsche, VW, BMW), reflektory světlometů a výfuková potrubí s koncovkami pro motocykly (například firmy KTM, BMW) [23].



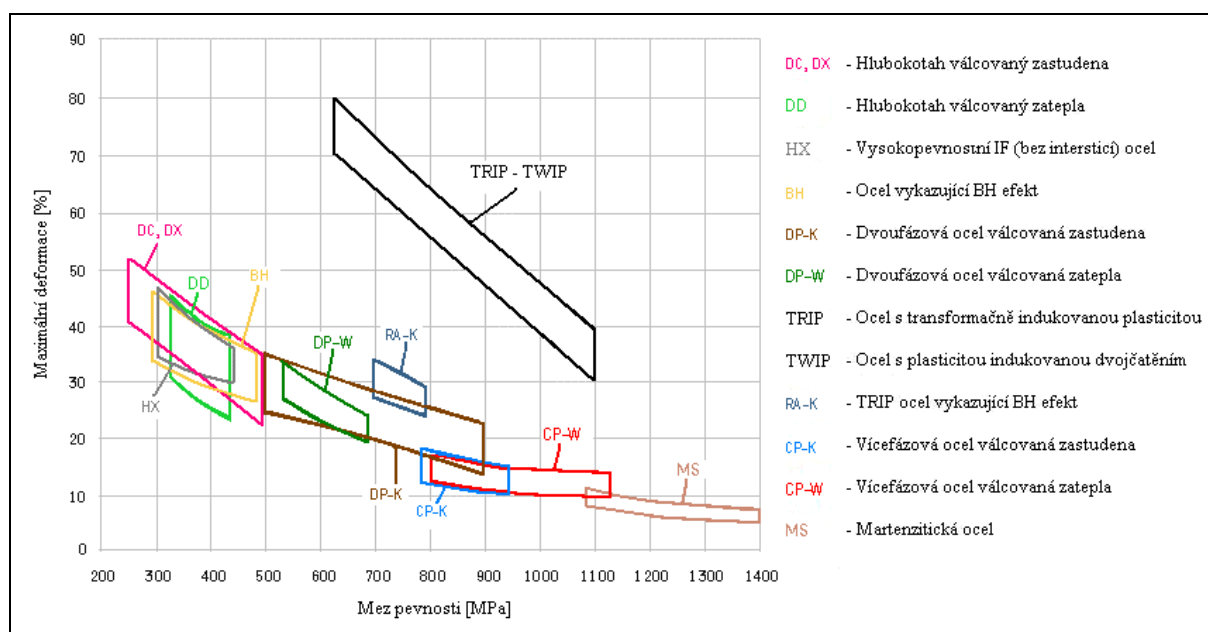
Obr. 2.9: Tváření vnitřním přetlakem

3. PŘEHLED MATERIÁLŮ POUŽÍVANÝCH PRO VÝROBU KAROSÉRIE

V předchozí kapitole byly stručně charakterizovány základní koncepce stavby automobilových karosérií. Nyní je proto důležité blíže specifikovat jednotlivé používané materiály. Pro stavbu automobilové karosérie dnes existuje celá škála různých vhodných druhů materiálů (ať kovových či nekovových), přesto se zde zaměřím pouze na materiály ocelové, neboť právě ony mají největší podíl na světové produkci karosérií osobních automobilů.

3.1. Stručná charakteristika jednotlivých materiálů

Ocelové materiály pro stavbu automobilových karosérií můžeme rozdělit na hlubokotažné a vysokopevnostní plechy, které zajišťují bezpečnost celé karosérie. Tyto oceli prozatím dostatečně pokryjí poptávku po materiálech s vysokou tvářitelností a současně s co nejvyšší mezí kluzu, respektive pevností. Grafický přehled těchto materiálů je znázorněn na obrázku Obr. 3.1 [2, 5, 26, 30, 32].



Obr. 3.1: Diagram základních materiálů používaných pro stavbu automobilové karosérie
s přibližnými oblastmi použitelnosti

Jedním z možných způsobů snížení hmotnosti karosérie automobilu je redukce tloušťky plechu pohledových dílů. Pro tento případ je ovšem nutné nahradit takovéto díly vyrobené z IF ocelí plechy se zvýšenými mechanickými vlastnostmi. Proto byly vyvinuty plechy z vysokopevnostních ocelí. Tyto materiály vykazují vyšší exponent deformačního zpevnění n než IF oceli a IF oceli s BH efektem. K základním typům těchto materiálů patří například DP (dvoufázové oceli), TRIP (oceli s transformačně indukovanou plasticitou), TWIP (oceli s plasticitou indukovanou dvojčatěním), CP (vícefázové oceli) a MS (oceli martenzitické). Mezi vysokopevnostní oceli můžeme zařadit i IZ oceli (izotropní), vyznačující se vyšší hodnotou exponentu deformačního zpevnění n a nízkou hodnotou plošné anizotropie X_S (blíže viz kapitola 4.1.2). Posledními ze zde jmenovaných jsou mikrolegované oceli, u kterých jsou požadované vlastnosti závislé na mikrostruktuře materiálu. Optimálních vlastností je u nich dosaženo vhodnou kombinací stopového množství několika různých legujících prvků [2, 5, 26, 30, 32].

3.1.1. Hlubokotažné plechy z ocelí uklidněných hliníkem

Hlubokotažné plechy z ocelí uklidněných hliníkem (označené DC, DX - válcované za studena nebo DD - válcované za tepla) mají zaručeny mechanické vlastnosti a svojí vysokou tvárností jsou předurčeny pro tvarově složité výlisky (například pohledové díly karosérie, na které jsou kladeny i nároky na povrchové vlastnosti). V závislosti na chemickém složení, mechanických vlastnostech a způsobu výroby byly hlubokotažné plechy rozděleny do několika skupin podle kvality [2, 5, 32].

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

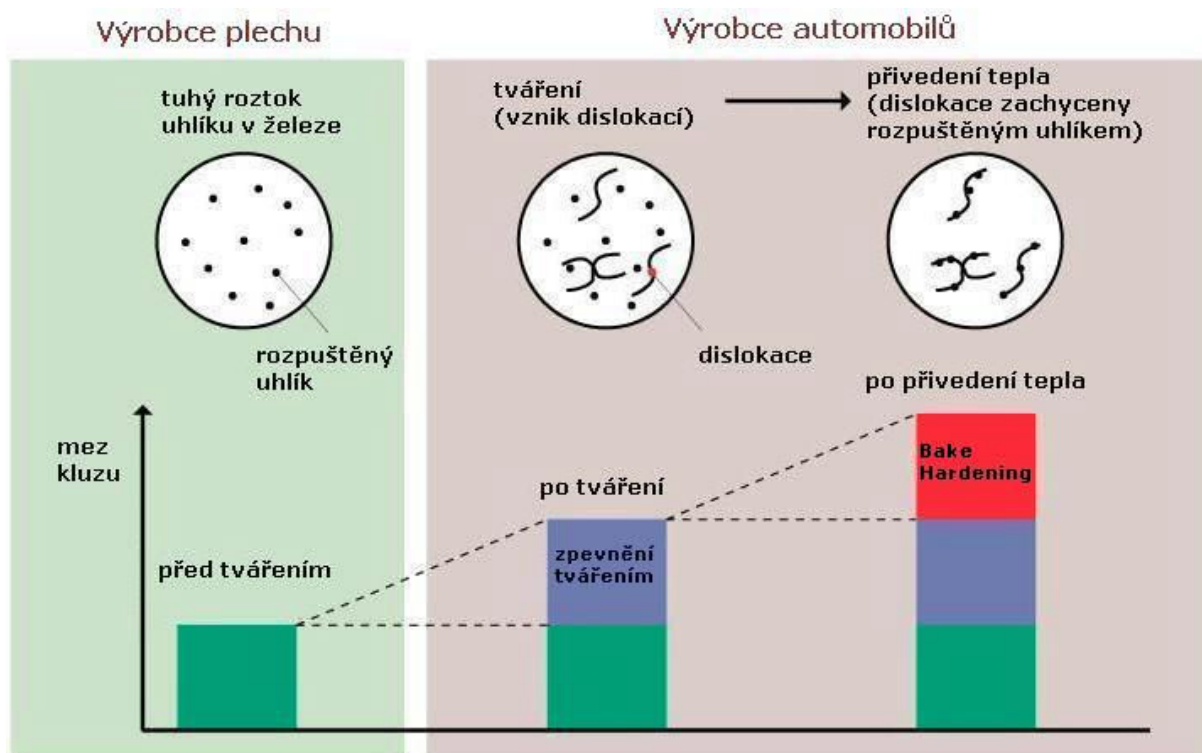
Tyto oceli jsou pro zvýšení pevnosti legovány fosforem nebo jsou mikrolegovány například manganem, křemíkem, hliníkem, vanadem a titanem. Protože především žárově pozinkované hlubokotažné plechy z ocelí uklidněných hliníkem podléhají stárnutí (vlivem teplotních procesů probíhajících v pozinkovací lince), byly vyvinuty oceli IF, které tento problém eliminují [2, 5, 32].

3.1.2. Plechy z IF ocelí

IF (Interstitials Free Steels) oceli bez intersticií jsou dnes běžně používány pro stavbu automobilové karosérie. Interstiticky rozpustné atomy uhlíku a dusíku jsou vázané ve formě stabilních karbonitridů (TiCN , NbCN). Toho je docíleno mikrolegováním titanem nebo niobem či kombinací obou prvků. Snížením obsahu uhlíku a dusíku ve formě tuhého roztoku dosáhneme výrazného zlepšení plastických vlastností oceli. Výsledné mechanické vlastnosti těchto ocelí jsou také závislé na obsahu dalších legujících prvků způsobujících roztokové zpevnění, jako jsou například mangan a fosfor, dále pak na množství a rozptýlení precipitátů, velikosti feritického zrna a na úběru při hladícím válcování. Tyto oceli jsou vytvrditelné způsoby popsány v kapitole 3.2 [2, 5, 26].

3.1.3. Plechy z IF ocelí s BH efektem

Tyto oceli odstraňují nevýhodu klasických IF ocelí, kterou je, z hlediska odporu proti porušení, jejich malá mez kluzu. Eliminací tohoto nežádoucího jevu bylo vyvinutí IF ocelí vykazujících BH efekt (Bake Hardening). Princip tohoto BH efektu je naznačen na následujícím obrázku Obr. 3.2 [2, 5, 32].



Obr. 3.2: Princip BH efektu

BH efekt spočívá ve zvýšení meze kluzu přivedením tepla. Velikost BH efektu závisí na chemickém složení (obsah uhlíku, manganu, síry), na historii tváření za studena (válcování) a na rekrystalizačním žíhání. Dle intenzity působení jednotlivých vlivů lze docílit zvýšení meze kluzu až o 30 až 80 MPa. Z hlediska BH efektu můžeme rozdělit IF oceli pro výrobu plechů na dva základní typy, a to na oceli se zvýšeným obsahem uhlíku a oceli se zvýšeným obsahem titanu, respektive niobu [2, 5, 32].

a) Oceli se zvýšeným obsahem uhlíku

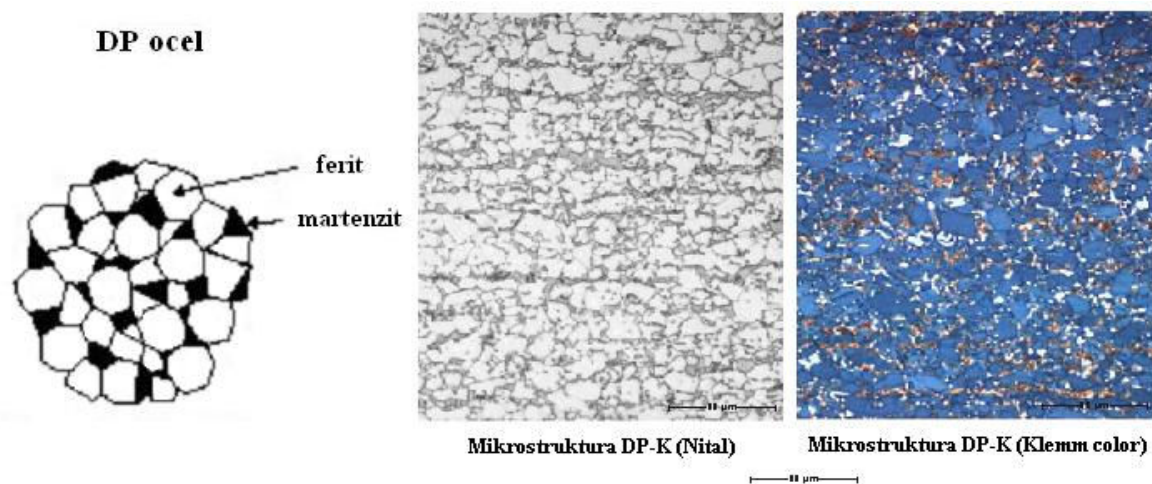
Množství legujících prvků titanu a niobu je pouze na takové úrovni, aby část intersticiálně rozpuštěného uhlíku ve feritové mřížce zůstala i po válcování za tepla nevázaná na vzniklé karbidy legur. BH efekt probíhá při vypalování laku karoserie (tj. 170 °C, čas 20 min), čímž se dosáhne zvýšení meze kluzu [2, 5, 26].

b) Oceli se zvýšeným obsahem titanu respektive niobu

Intersticiální uhlík se při tváření těchto plechů prakticky nevyskytuje ve formě tuhého roztoku, proto je zaručena jejich vynikající hlubokotažnost. Vytvrzení se docílí rozpuštěním karbonitridických precipitátů při vysokoteplotním žíhání na kontinuální žíhací lince s okamžitým rychlým ochlazením. Výroba těchto ocelí je tedy více energeticky náročná než u ocelí se zvýšeným obsahem uhlíku [2, 5, 26].

3.1.4. Plechy z DP ocelí

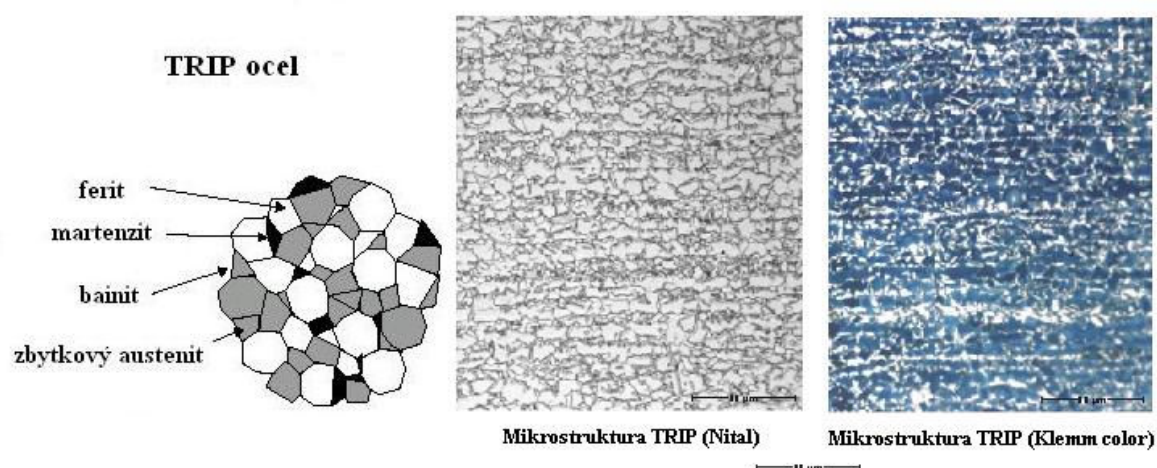
DP (Dual Phase) dvoufázové oceli mají feritickou matici obsahující 20% až 70% malých ostrůvků martenzitu nebo bainitu. V materiálu je ponecháno větší množství uhlíku pro lepší kalitelnost a jsou do něj přidány legury manganu, chromu, vanadu a niklu. Uhlík podporuje tvorbu martenzitu a současně zpevňuje ferit ve formě tuhého roztoku nebo jej lze použít pro BH efekt. U těchto ocelí mez kluzu nedosahuje ani 70% meze pevnosti (R_m až 900 MPa), což je výhodné pro tváření. Feriticko-martenzitická struktura DP ocelí je znázorněna na obrázku Obr. 3.3 [2, 5, 26, 32].



Obr. 3.3: Struktura DP ocelí

3.1.5. Plechy z TRIP ocelí

TRIP (Transformation Induced Plasticity), oceli s transformačně indukovanou plasticitou. Někdy se tyto TRIP materiály také nazývají oceli se zbytkovým austenitem (RA-K). Jsou tvořeny feritem, bainitem a malým množstvím nepřeměněného zbytkového austenitu, jak ukazuje obrázek Obr. 3.4 [2, 5, 32].



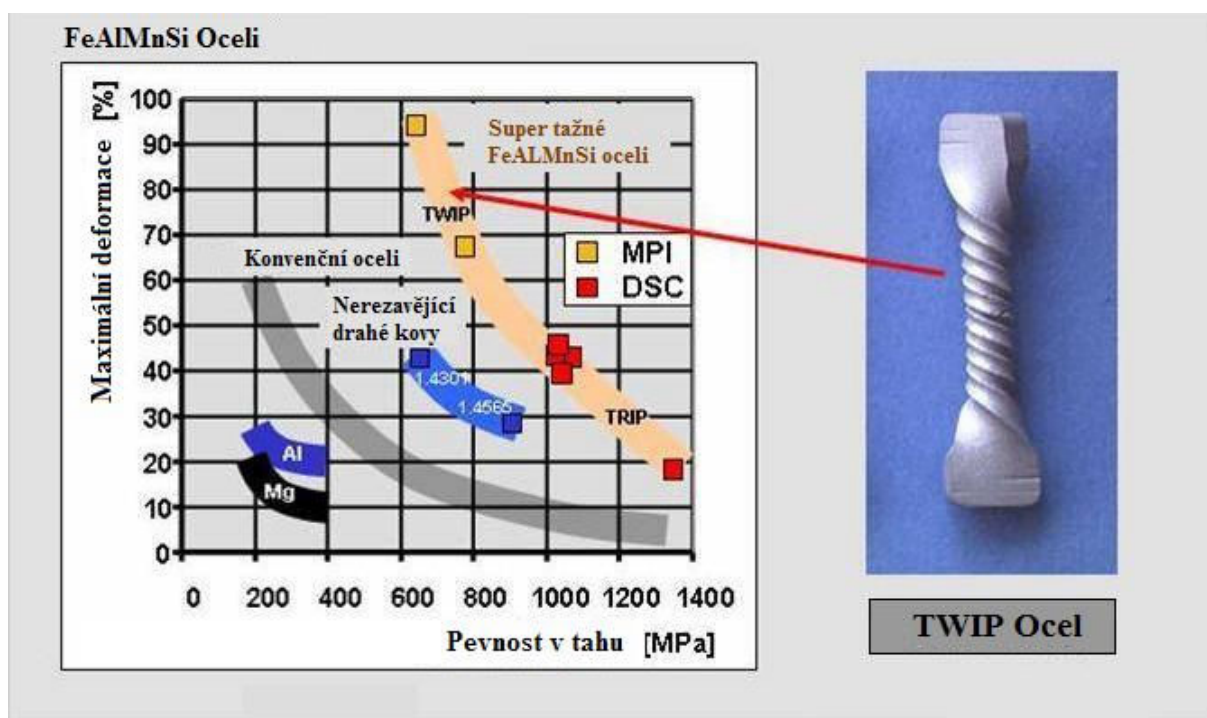
Obr. 3.4: Struktura TRIP ocelí

Zbytkový austenit se během tváření přemění na tvrdý martenzit nebo se stabilizuje. Tyto oceli obsahují větší množství uhlíku, křemíku případně hliníku než DP oceli, a tím se sníží teplota M_f (martenzit finish) pod teplotu okolí, čímž se vytvoří zbytkový austenit. Při nižším obsahu uhlíku v materiálu může dojít k vysokému zpevnění oceli již v průběhu tváření

vlivem předčasného přetvoření austenitu. Při vyšším obsahu uhlíku zůstává austenit nepřetvořen i po tvářecím procesu. Tím se zvyšuje schopnost materiálu pohltit deformační energii, například při nárazu automobilu na překážku [2, 5, 32].

3.1.6. Plechy z TWIP ocelí

TWIP (Twinning Induced Plasticity), oceli s plasticitou indukovanou dvojčatěním obsahují v austenitické matici 15-25% manganu a dostačující množství hliníku a křemíku. Jsou velmi vhodnými materiály pro nosné díly konstrukce karosérie, které jsou vystaveny nadměrnému zatížení. TWIP oceli mají velmi vysokou pevnost (až 800 MPa) a extrémní kujnost (při nízké teplotě a vysoké rychlosti deformace), jak je ukázáno na obrázku Obr. 3.5 [2, 5].

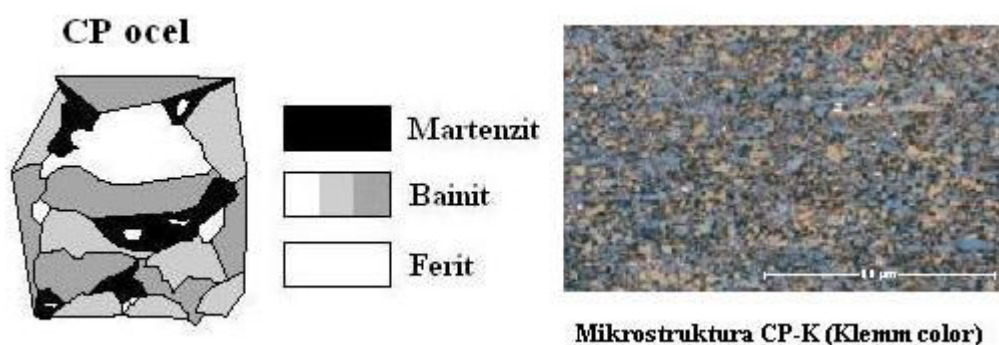


Obr. 3.5: TWIP oceli

Mechanické zdvojování austenitu se uskutečňuje během deformace. Pro dosažení TWIP účinku je nutné zajistit přesné složení slitiny takovým způsobem, že transformační energie nedovolí napětově indukovanému austenitu přeměnit se na martenzit, a tak dojde k mechanickému dvojčatění. Také je nutné zajistit dodržení předepsaných technologických postupů, jinak se vytvrzení těchto ocelí neuskuteční [2, 5].

3.1.7. Plechy z CP ocelí

CP (Complex Phase) vícefázové oceli s jemnou strukturou, která je tvořena feritem, bainitem (horním i dolním), martenzitem a austenitem, jak je patrné z obrázku Obr. 3.6. Výroba a složení legur jsou podobné jako u DP a TRIP ocelí. Tyto oceli jsou mikrolegovány niobem, titanem či vanadem pro vytvoření jemného precipitátu. CP oceli vykazují vysoký stupeň deformačního zpevnění, mají velmi dobrou rozměrovou stálost výlisků a také mají dobrou schopnost absorbovat deformační energii při nárazu [2, 5, 32].

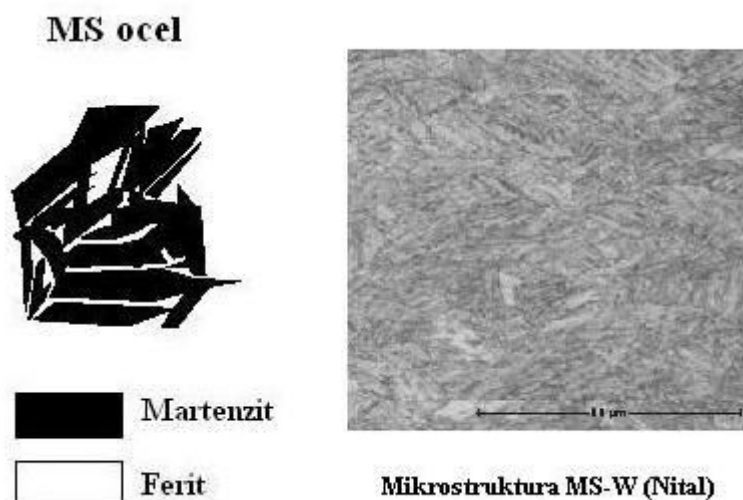


Obr. 3.6: Struktura CP ocelí

3.1.8. Plechy z martenzitických ocelí

Martenzitické oceli jsou při své výrobě kalitelné a patří k nim i bórové oceli. V těchto ocelích je téměř všechno austenit transformován (během ochlazování na válcovací trati nebo následným ochlazováním ze žíhacích teplot) na martenzit. Jsou to materiály s mezí pevnosti, která může dosahovat i hodnot větších než 1500 MPa. Bývají popuštěny pro zlepšení jejich tažnosti, ale i tak se příliš nehodí pro tváření složitých dílů. Pro lepší kalitelnost je v těchto ocelích ponechán uhlík a jsou i legovány manganem, křemíkem, chromem, molybdenem, bórem, vanadem a niklem. Struktura martenzitické oceli je znázorněna na obrázku Obr. 3.7 [2, 5, 26, 30, 32].

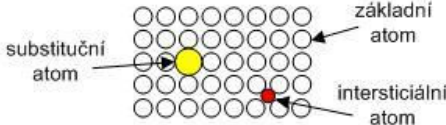
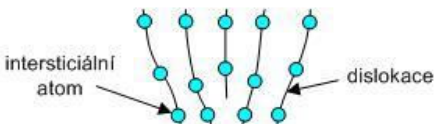
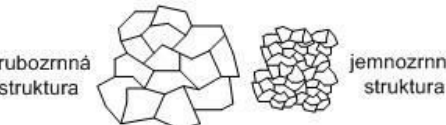
Další informace o martenzitických ocelích jsou dále uvedeny v experimentální části disertační práce, neboť právě na jednom z těchto materiálů byly provedeny laboratorní zkoušky. Bližšímu popisu získaných údajů se věnují kapitoly 8. (charakteristika zkoušeného materiálu, 9. (diagramy mezních přetvoření) a 10. (diskuze výsledků disertační práce).



Obr. 3.7: Struktura MS ocelí

3.2. Mechanizmy zpevnění plechů

Jak již bylo uvedeno v kapitole 3.1., existují dnes pro potřeby automobilového průmyslu speciální plechy se zcela specifickými vlastnostmi. Kombinací dobrých plastických vlastností a vysoké pevnosti je dosaženo vhodnou formou zpevnění materiálu. Podle druhu materiálu plechu lze aplikovat jemu příslušný způsob zpevnění. Některé z těchto mechanismů jsou znázorněny na Obr. 3.8 [2, 5].

Mechanismus vytvrzení	Schéma
Zpevnění tuhého roztoku	 substituční atom základní atom intersticiální atom
BH efekt	 intersticiální atom dislokace
Strukturní zpevnění	 hrubozrnná struktura jemnozrnná struktura
Precipitační zpevnění	 hrubé jemné

Obr. 3.8: Příklady mechanismů vytvrzení

3.2.1. Zpevnění tuhého roztoku

Prvky obsažené v oceli tvoří s železem dva typy tuhého roztoku, a to intersticiální a substituční. Vlivem rozdílných velikostí atomů vložených prvků a atomů železa dochází k narušení krystalické mřížky za vzniku pružných sil. Díky tomu je bráněno volnému pohybu dislokací, a tím dochází k následnému zpevnění [2, 5].

3.2.2. Zpevnění jemnozrnnou strukturou

Volnému pohybu dislokací v materiálu brání nejen strukturní vady, ale i hranice jednotlivých zrn. Princip tohoto zpevnění spočívá ve zjemnění zrn, čímž se zvýší počet překážek pro pohyb dislokací. Následkem toho vzroste odpor materiálu a mez kluzu [2, 5].

3.2.3. Precipitační zpevnění

Precipitační vytvrzení ve svém principu spočívá v rozpadu přesyceného tuhého roztoku za vzniku nové fáze při vhodných podmínkách (tzv. precipitace nové fáze z přesyceného roztoku). Vzniklé precipitáty narušují krystalovou strukturu matrice a vedou ke vzniku vnitřních sil. V důsledku toho dojde k zabránění pohybu dislokací a ke zpevnění materiálu [2, 5].

3.2.4. Zpevnění dvoufázovou a vícefázovou strukturou

Vícefázové struktury vznikají nejčastěji při kontinuálním žíhání. Okolí matrice se při rekrytalizaci obohacuje uhlíkem vzniklým rozpouštěním karbidů železa přítomných nejčastěji na okrajích zrn. Současně vzniklá austenitická fáze se částečně přeměňuje při prudkém ochlazení proudem vody na martenzit popřípadě bainit. Nositel pevnosti v tomto materiálu je martenzit (bainit). Změna objemu způsobí deformaci okolí feritické matrice. Dojde ke zvýšení vnitřního pnutí a současně i k nárůstu hustoty dislokací [2, 5].

4. ZKOUŠKY HODNOCENÍ PEVNOSTNÍCH PLECHŮ

V automobilovém průmyslu je důležité znát hodnoty mechanických vlastností používaných plechů, a tím i jejich možnosti při různých technologických operacích. Zkoušky těchto polotovarů vychází ve své podstatě ze zkoumání přetvoření na zkušební tělese a lze je rozdělit na základní a napodobující [2, 5, 10].

- Základní zkoušky jsou normalizované a patří k nim například zkouška tahová, zkoušky drsnosti povrchu, tvrdosti, struktury a chemického složení.
- K napodobujícím například patří zkouška hloubením dle Erichsena, kalíškovací nebo klínová.

4.1. Statická zkouška tahem

Zkouška tahem je nejrozšířenější základní mechanickou zkouškou a je předepsaná normou ČSN EN 10002-1. Zkouška spočívá v deformaci zkušební tyče tahovým zatížením do lomu, za účelem stanovení mechanických vlastností. Zkušební tyče mohou být poměrné nebo nepoměrné. U poměrných je počáteční měřená délka vztažena k počáteční ploše příčného, nejčastěji kruhového, průřezu tyče S_0 . Nepoměrné jsou takové, u nichž není počáteční měřená délka L_0 vázána na počáteční průměr tyče, který je nyní obdélníkový. Příklad provedení některých tvarů a velikostí zkušebních poměrných (kruhových) a nepoměrných (plochých) tyčí je znázorněn na obrázku Obr. 4.1 [2, 5, 10, 17, 19].

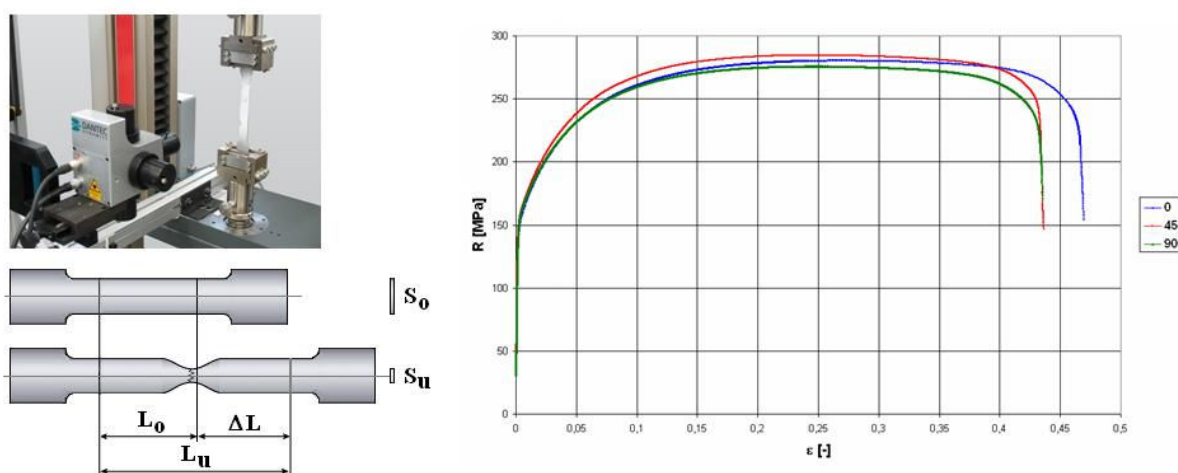


Obr. 4.1: Zkušební tyče pro statickou zkoušku tahem

4.1.1. Stručný popis zkoušky

Tahová zkouška je pro plechy prováděna na normalizovaných nepoměrných zkušebních tyčích, které se upínají do čelistí zkušebního stroje tak, aby osa zkušební tyče ležela v ose čelistí [2, 5, 10, 17, 19].

Podmínky zkoušky, zejména teplota a rychlost zatěžování (přírůstek napětí za čas - nejčastěji použita hodnota $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$), jsou taktéž dány zmiňovanou normou. Při zkoušce se registruje zátěžná síla F a jí odpovídající deformace. Zkušební tyč zatěžovaná silou se prodlužuje z počáteční měřené délky L_0 (která činí nejčastěji 50, 80, 100, 120 nebo 200 mm) na konečnou měřenou délku po lomu L_u . Počáteční plocha příčného průřezu zkoušené délky zkušební tyče S_0 se přitom mění na konečnou plochu S_u , tedy nejmenší plochu příčného průřezu po lomu. V průběhu zkoušky je možno stanovit normálové napětí (smluvní, resp. jmenovité značené R) jako podíl zatěžující síly F a počáteční plochy příčného průřezu zkoušené délky S_0 . Z délkové deformace měřeného úseku zkušební tyče, vztažené na původní rozměr tohoto úseku, lze stanovit hodnotu tzv. poměrného prodloužení ε (smluvní deformace). Výsledkem měření je smluvní tahový diagram o souřadnicích smluvní napětí R vynesené na ose y a poměrné prodloužení ε vynesené na ose x, jak je znázorněno na obrázku Obr. 4.2 [2, 5, 10, 17, 19].



Obr. 4.2: Prodloužení zkušební tyče a smluvní tahový diagram

4.1.2. Vyhodnocení zkoušky

Ze zkoušky tahem lze určit důležité charakteristiky materiálů, jako je výrazná mez kluzu R_e , nevýrazná mez kluzu $R_{p0,2}$, mez pevnosti v tahu R_m , poměrná deformace (poměrné prodloužení) ε , kontrakce Z nebo tažnost A_x (kde index x u nepoměrné zkušební tyče značí použitou počáteční měřenou délku L_0 a nabývá tedy hodnot 50 mm, 80 mm, 100 mm, 120 mm nebo 200 mm). Zjištěné smluvní hodnoty napětí a deformací lze, dle vztahů (4.1), přepočítat na hodnoty skutečných napětí (σ_e , $\sigma_{p0,2}$ a σ_m) a skutečných deformací (φ_e , $\varphi_{p0,2}$ a φ_m) [17, 19].

$$\begin{aligned}\sigma &= R \cdot (\varepsilon + 1) [\text{MPa}] \\ \varphi &= \ln(\varepsilon + 1) [-]\end{aligned}\tag{4.1}$$

a) Definice základních veličin

Výrazná mez kluzu R_e je definována, u materiálů vykazujících plastický kluz, jako napětí, při jehož dosažení dochází k plastické deformaci bez přírůstku zatížení. Lze ji také snadno určit ze vztahu (4.2). Výraznou mez kluzu můžeme dále rozdělit na horní mez kluzu R_{eH} a dolní mez kluzu R_{eD} [17, 19].

$$R_e = \frac{F_e}{S_o} [\text{MPa}]\tag{4.2}$$

kde je:

F_e ... síla odpovídající výrazné mezi kluzu [N]

S_o ... počáteční plocha příčného průřezu zkoušené délky [mm^2]

Nevýrazná mez kluzu $R_{p0,2}$ se určuje ze síly odpovídající trvalé absolutní deformaci $\Delta L = 0,2\% \cdot L_o$ a je dána vztahem (4.3) [17, 19].

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_o} [\text{MPa}]\tag{4.3}$$

kde je:

$F_{p0,2}$... síla odpovídající nevýrazné mezi kluzu [N]

Mez pevnosti R_m je napětí, definované vzorcem (4.4) jako poměr maximální síly zjištěné při zkoušce tahem a počáteční plochy příčného průřezu zkoušené délky [17, 19].

$$R_m = \frac{F_m}{S_o} [\text{MPa}]\tag{4.4}$$

kde je:

F_m ... největší zatížení [N]

Kontrakce Z , neboli zúžení, vyjadřuje procentuální poměr největší změny plochy příčného průřezu přetržené zkušební tyče k jejímu původnímu průřezu. Tato veličina se však v technické praxi určuje pouze u tyčí kruhových a to dle vztahu (4.5) [17, 19].

$$Z = \frac{\Delta S}{S_o} \cdot 100 [\%] \quad (4.5)$$

kde je:

ΔS ... největší změna plochy příčného průřezu [mm^2] $\Delta S = S_o - S_u$

S_u ... nejmenší plocha příčného průřezu po lomu [mm^2]

Poměrné prodloužení je definováno dle vztahu (4.6) jako přírůstek počáteční měřené délky vztažený na počáteční měřenou délku zkušební tyčky [17, 19].

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_o} [-] \quad (4.6)$$

kde je:

ΔL ... přírůstek počáteční měřené délky po přetržení [mm] $\Delta L = L_u - L_o$

L_u ... konečná měřená délka po lomu [mm]

L_o ... počáteční měřená délka [mm]

Tažnost lze poté definovat, s použitím vzorce (4.7), jako poměrné prodloužení ε vyjádřené v procentech [17, 19].

$$A_x = \frac{\Delta L}{L_o} \cdot 100 = \varepsilon \cdot 100 [\%] \quad (4.7)$$

b) Ukazatele tvářitelnosti

Pro upřesnění názoru, zda je materiál vhodný pro zvolenou tvářecí operaci, je dobré zjistit další zpřesňující technologické parametry a ukazatele. Ty lze většinou snadno dopočítat s využitím již zjištěných údajů z tahové zkoušky.

Pro potřeby hlubokého tažení je důležitý vysoký podíl hodnot meze kluzu a meze pevnosti, který dobře zohledňuje zásoba plasticity ZP , daná vztahem (4.8) [2, 5].

$$ZP = k \cdot (R_m - R_{p0,2}) \cdot \varepsilon [\text{MPa}] \quad (4.8)$$

kde je:

k ... koeficient zaplnění plochy (0,6 - 0,9) [-]

Dalšími často používanými ukazateli jsou ukazatel hlubokotažnosti UH a komplexní ukazatel tváritelnosti KUT , dané vztahy (4.9) a (4.10) [5].

$$UH = \frac{R_{p0,2}}{R_m} [-] \quad (4.9)$$

$$KUT = \frac{R_{p0,2}}{R_m} \cdot A_x = UH \cdot A_x [-] \quad (4.10)$$

Při rovinných stavech napjatosti se často určuje součinitel normálové anizotropie r_α , daný vztahem (4.11). Je to poměr skutečné deformace šířky φ_b ke skutečné deformaci tloušťky φ_t zkušebního tělesa při jednoosém zatížení. Čím vyšší je hodnota r_α , tím vyšší je schopnost plechu odolat místnímu ztenčení tloušťky. Index α značí směr ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ na směr válcování), ve kterém je hodnota počítána [1, 2, 3, 5, 11, 18].

$$r_\alpha = \frac{\varphi_b}{\varphi_t} [-] \quad (4.11)$$

Důležitou charakteristikou tváritelnosti plechů je exponent deformačního zpevnění n , který můžeme stanovit dvěma základními způsoby. Buď ho získáme aproximací tahového diagramu dle jedné z rovnic (4.12) a (4.13), vyjadřujících závislost skutečného napětí σ na skutečné deformaci φ . Nebo ho můžeme také ztotožnit s hodnotou maximálního rovnoměrného přetvoření φ_m . Potom tedy platí $n = \varphi_m$ [1, 2, 3, 4, 5, 18].

$$\sigma = C \cdot \varphi^n [\text{MPa}] \quad (4.12)$$

$$\sigma = C \cdot (\varphi_o + \varphi)^n [\text{MPa}] \quad (4.13)$$

kde je:

C ... modul monotónního zpevnění [MPa]

n ... exponent deformačního zpevnění [-]

φ ... skutečná deformace [-]

φ_o ... posunutí křivky zpevnění po ose x pro dosažení meze kluzu při $\varphi = 0$ [-]

Vysoká hodnota součinitele n ukazuje na rovnoměrnější rozložení přetvoření při tahové zkoušce, a tím k dosažení větší hodnoty celkového přetvoření. Obě konstanty, C i n , patří k významným hodnotám potřebným, zejména v dnešní době, pro numerické simulace plošného tváření. Zjištění přesné hodnoty exponentu n je nejnáze možné (viz předchozí text) linearizací rovnice (4.12) tzv. nepřímá metoda. Nahrazením napětí a přetvoření za příslušné hodnoty intenzit získáme výslednou rovnici ve tvaru (4.14). Výslednou hodnotu exponentu deformačního zpevnění tedy získáme vynesem křivky zpevnění v logaritmických souřadnicích σ_i , φ a následnou grafickou interpolací [2, 3, 5, 11, 18].

$$\log \sigma_i = \log C + n \cdot \log \varphi_i \quad (4.14)$$

kde je:

σ_i ... intenzita napětí [MPa]

φ ... intenzita deformace [-]

Dnes se již grafické interpolace neužívá a celý výpočet provádí sofistikovaný software. Problémem je správné nastavení parametrů výpočtu. Existuje řada norem popisujících vhodný výpočtový interval, bohužel se jejich doporučení vzájemně liší. Uvedu zde nyní některé příklady [4, 5].

- Norma ČSN ISO 10272 ohraničuje na jedné straně výpočtový interval hodnotou $\varphi = 5\%$ a na straně druhé hodnotou maximálního rovnoměrného přetvoření.
- Interval ohraničený hodnotami $\varphi = 10 \div 15(20)\%$ nedosahuje-li hodnota maximálního rovnoměrného přetvoření $\varphi = 20\%$ doporučuje evropská norma EN 10 130+A1: 2000.
- Poslední ze zde jmenovaných je norma ASTM E 646-78. Ta umožňuje volit jakýkoliv interval v rozmezí minimum = mez kluzu a maximum = mez pevnosti.

Jak je zřejmé, použitím každé z norem můžeme získat jinou hodnotu exponentu deformačního zpevnění n . Pro vyhodnocení tahových zkoušek pevnostních materiálů je nejvýhodnější použití poslední normy (ASTM E 646-78) s optimálním výpočtovým intervalem, který vždy volíme vzhledem k tažnosti daného materiálu. V některých případech nedostačuje použitá aproximační křivka a je nutné použít například polynom druhého nebo třetího stupně.

Jelikož zkoušku tahem ovlivňuje řada faktorů, je důležité je také zohlednit. Mezi ty nejvýznamnější patří rychlost zatěžování. Možným ukazatelem, zjistitelným ze zkoušky tahem při měnících se rychlostech deformací ($c_d = \dot{\varphi}$ blíže viz kapitola 5.1.1), je součinitel

zpevnění vlivem rychlosti přetvoření m , který udává citlivost materiálu na rychlost přetvoření. S růstem této hodnoty se zlepšuje plastická stabilita při tváření za studena. Koeficient m se určí ze vztahu (4.15) [1, 2, 3, 5].

$$\sigma = C \cdot \dot{\varphi}^n \cdot \dot{\varphi}^m \text{ [MPa]} \quad (4.15)$$

Význam charakteristik n a r_α spočívá ve stejnoměrnějším rozdělení plastických přetvoření v nejvíce namáhaných místech výlisku v důsledku přemístění deformací z míst s vysokým počátečním napětím do míst s nižším. Tyto charakteristiky vykazují i značnou plošnou anizotropii. Zjištění její velikosti je možné s použitím vztahu pro směrově střední hodnotu X_S (4.16) [2, 3, 5].

$$X_S = \frac{1}{2} \cdot (x_0 + x_{90} - 2 \cdot x_{45}) [-] \quad (4.16)$$

kde je:

x ... představuje r nebo n [-]

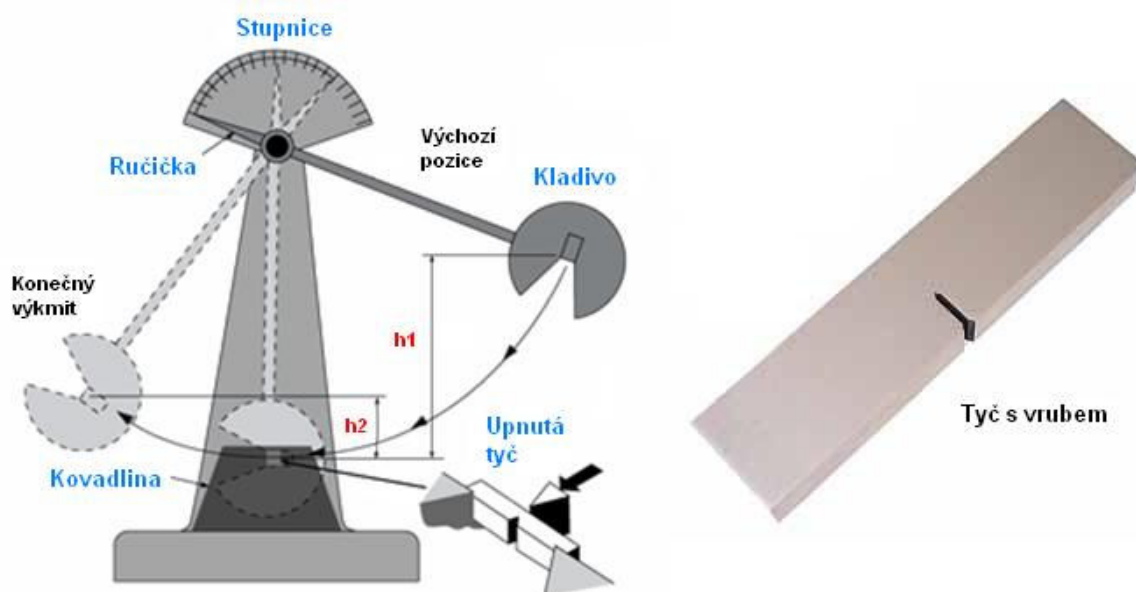
Podrobnějším popisem tahové zkoušky, prováděné na zvoleném pevnostním materiálu, a vyhodnocením všech důležitých parametrů se dále zabývá kapitola 8.2.2 v experimentální části této disertační práce.

Tahová zkouška je snadno proveditelná a často užívaná, ale neodráží reálné podmínky přetvoření při tváření plechových výlisků. Z tohoto důvodu byla vyvinuta celá řada jiných zkoušek napodobujících skutečné podmínky tažení, tzv. napodobující zkoušky.

4.2. Zkouška vrubové houževnatosti

Náchylnost materiálů na vrubovou houževnatost je důležitým parametrem, který lze zjistit pomocí dynamických technologických zkoušek. Rychlosti zatěžování zkušebních těles jsou zde nesrovnatelně vyšší než u zkoušky tahem, neboť rychlost dopadového zařízení činí 5 až 7 m.s⁻¹. S rostoucí rychlostí vzrůstá i odpor materiálu proti přetvoření. Materiál, který se při statickém zatěžování chová jako houževnatý, se může při dynamickém zatížení porušit křehkým lomem. Základní a nejpoužívanější zkouškou pro zjištění vrubové houževnatosti materiálů je zkouška rázem v ohybu podle Charpyho [5, 10, 20].

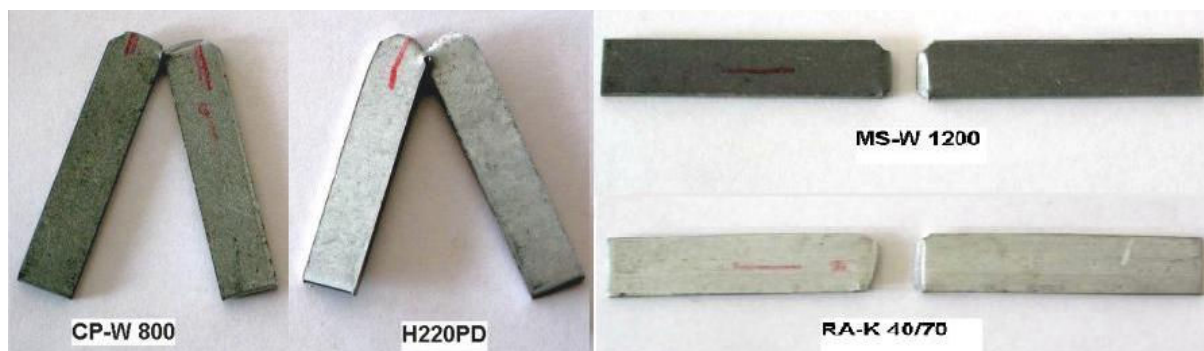
Tato zkouška je dána normou ČSN EN 10045-1, která definuje základní podmínky zkoušky (zejména rychlost), rozměry zkušebních vzorků a také způsob vyhodnocení naměřených hodnot. Princip zkoušky (Obr. 4.3) je velice jednoduchý a spočívá v přerážení normalizovaných tyček kyvadlovým kladivem. Zkušební tyč má rozměry 10x10x55 mm (vyjíměčně 7,5x10x55 mm nebo 5x10x55 mm) a je uprostřed své délky opatřena vrubem. Vrub může mít tvar U nebo V a jeho přesné rozměry jsou opět dány normou. Mírou odolnosti materiálu proti rázu je nárazová práce spotřebovaná na přerážení tyče (dle vrubu označovaná *KU* nebo *KV*). Krom této hodnoty bývá zkoumána i vzniklá lomová plocha na zkušební tyči. Národní norma České republiky umožňuje také hodnotit vrubovou houževnatost (dle vrubu označovanou *KCU* nebo *KCV*), která se získá jako poměr nárazové práce a plochy průřezu pod vrubem zkušební tyče. Zkouška rázem v ohybu podle Charpyho je empirickou zkouškou a její výsledky slouží k vzájemnému porovnání jednotlivých materiálů zkoušených za stejných technologických podmínek [5, 10, 20].



Obr. 4.3: Princip rázové zkoušky v ohybu podle Charpyho

Pro zkoušky vrubové houževnatosti tenkých plechů (0,5 až 2,5 mm) bohužel nelze použít zmiňovanou normu ČSN EN 10045-1, neboť jsou rozměry zkušebních tyčí pro náš případ nevyhovující ($t_{\min} = 5$ mm). To ovšem nebrání v porovnávání citlivosti jednotlivých plechů, vyrobených z různých materiálů, na vrubovou houževnatost měřenou za rovnocenných technologických podmínek. Takovéto experimenty byly již provedeny a jejich výsledky byly více než uspokojivé [13, 20].

Příklady vzorků užitých při těchto testech jsou na obrázku Obr. 4.4. Jednotlivé materiály měly různou tloušťku (1,5 až 2,1 mm), a proto byla i různá výška zkušebních tyček (12 až 9,14 mm), aby bylo dosaženo stejné plochy řezu tyčky v místě vrubu a to $S = 15 \text{ mm}^2$ při konstantní délce 80 mm. Vruby byly tvaru V o hloubce 2 mm [13].

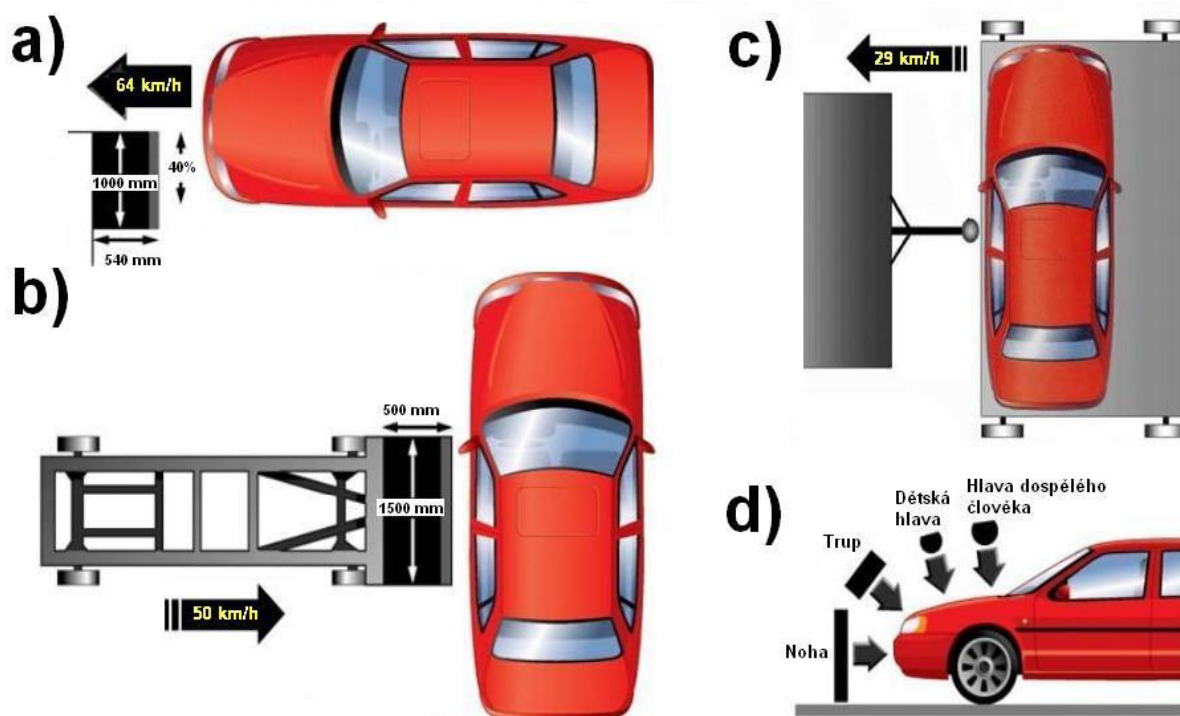


Obr. 4.4: Zkouška vrubové houževnatosti plechů

4.3. Bariérová zkouška

Bariérová zkouška, jinak také nazývaná CRASH test, je souhrnný název pro několik dílčích zkoušek prováděných buď na jednotlivých částech automobilu nebo častěji na celém kompletním automobilu. V průběhu zkoušky dochází k nárazu zkoušeného dílu či automobilu na překážku, dle předem definovaných podmínek, a současně probíhá monitorizace velikosti deformací jednotlivých vytypovaných částí konstrukce. Při zkouškách automobilů bývá navíc prostor pro cestující osazen jednou či více zkušebními figurínami, u kterých se v průběhu zkoušky hodnotí jejich chování a případné deformace. Všechny tyto experimentální zkoušky mají za svůj cíl zjistit chování daného dílu či automobilu při srážce s překážkou či jiným dopravním prostředkem a můžeme je rozdělit na několik základních testů [5].

- Prvním testem je čelní náraz automobilu rychlostí 64 km.h^{-1} na pevnou deformovatelnou překážku umístěnou ve 40% šířky vozu (viz Obr. 4.5 a).
- Druhým testem je boční náraz kovové bariéry rychlostí 50 km.h^{-1} do boku vozidla a to na straně řidiče (viz Obr. 4.5 b).
- Třetím testem je náraz vozidla, upevněného na katapultovacím vozíku, rychlostí 29 km.h^{-1} na pevný sloup o průměru 25,4 cm (viz Obr. 4.5 c).
- Na obrázku Obr. 4.5 část d) je též znázorněn test, při kterém automobil nenaráží na pevnou deformovatelnou překážku, ale na testovací figurínu. Tato zkouška má za cíl stanovit poškození figuríny (chodce) a automobilu při jejich vzájemném střetu.



Obr. 4.5: Základní typy provedení bariérové zkoušky

Hodnoty zmíněných testů dávají ve výsledku, kdy jsou vyhodnoceny vzniklé deformace a posuny jednotlivých měřených částí, komplexní obrázek o bezpečnosti daného automobilu, a to jak pro vlastní posádku, tak i pro ostatní účastníky provozu. Grafický výstup měření může být například zjednodušeně proveden dle obrázku Obr. 4.6.



Obr. 4.6: Zjištěné hodnoty bezpečnosti po bariérové zkoušce

Obecně lze říci, že CRASH testy jsou neekonomické zkoušky, neboť při nich většinou dochází k destrukci kompletních vozů. Proto je velká snaha nahradit experimentální testování počítačovými simulacemi, které jsou levnější a při správnosti vstupních hodnot velmi rychlé a spolehlivé. Na obrázku Obr. 4.7 je znázorněna čelní bariérová zkouška osobního automobilu, provedená jednak pomocí simulačního programu (levá část obrázku) a jednak experimentálně

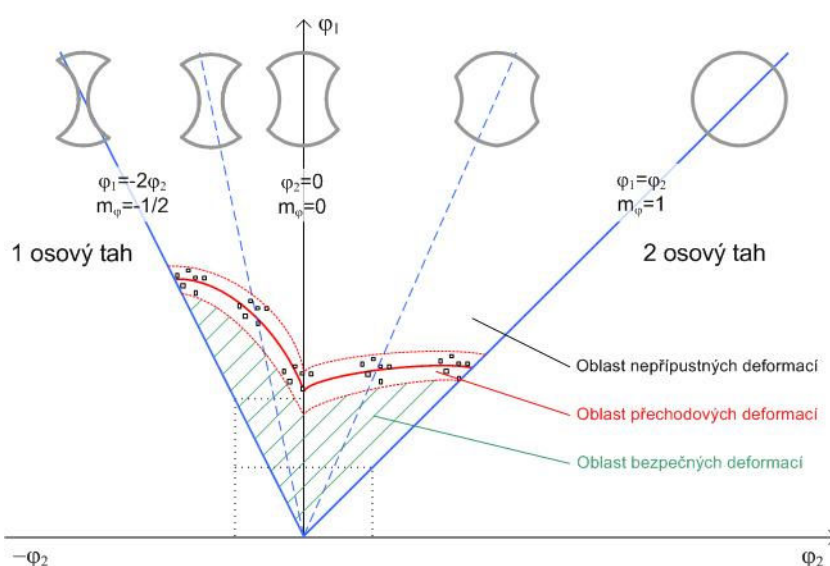
na hotovém automobilu (pravá část obrázku). Nové moderní simulační programy bariérových zkoušek pracují nejčastěji s metodou konečných prvků. Pro správný výpočet je nutné znát řadu materiálových hodnot a konstant, které se nejčastěji získávají normalizovanou zkouškou tahem nebo pomocí diagramů mezních přetvoření.



Obr. 4.7: Porovnání simulace a experimentu čelní bariérové zkoušky

4.4. Diagram mezních přetvoření

Tato kapitola si bere za svůj cíl podrobněji popsat způsoby zjištění diagramů mezních přetvoření (dále jen DMP) a jejich vyhodnocení. Jak již bylo řečeno (kapitola 4.1.), zkouška tahem patří mezi základní zkoušky (veškeré parametry jsou předem nastaveny normou), a tudíž nepostihuje problematiku skutečného tváření (například dosahované hodnoty rychlostí a deformací). Proto byla vždy snaha sestavit komplexně pojatý diagram, který by lépe zohlednil faktory ovlivňující proces tváření. Právě pro tento účel byl sestaven DMP, který můžeme chápat jako užitečné mapy plastičnosti daného plechu [2, 3, 5].



Obr. 4.8: Diagram mezních přetvoření

Základní formou DMP je pásmo bodů, které představují hodnoty mezních přetvoření. Problematikou DMP se zabývalo několik autorů, a proto bylo vypracováno i několik způsobů jejich určení [2, 3, 5].

- Prvním z možných typů je diagram Tomlenovův zakreslený v souřadnicích ukazatel stavu napjatosti m_σ – intenzita přetvoření φ_i .
- Druhým typem DMP je Keeler-Goodwinův (Obr. 4.8), sestrojený jako závislost hlavního přetvoření φ_1 na vedlejším φ_2 .

Logaritmické přetvoření užitý v diagramu je obecně dáno vztahem (4.17). Poměrem obou přetvoření (φ_2 a φ_1) získáme hodnotu tzv. ukazatele stavu přetvoření m_φ jak je ukázáno ve vztahu (4.18) [2, 3, 5, 18].

$$\varphi = \ln \frac{L_u}{L_o} [-] \quad (4.17)$$

kde je:

L_u ... konečná měřená délka po lomu [mm]

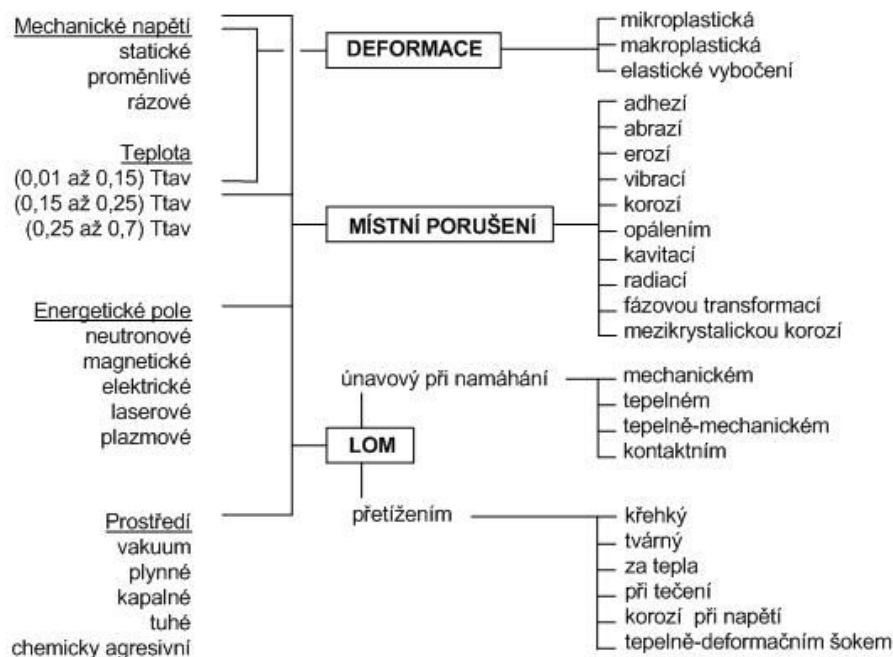
L_o ... počáteční měřená délka [mm]

$$m_\varphi = \frac{\varphi_2}{\varphi_1} [-] \quad (4.18)$$

V diagramu tvoří m_φ tak zvané lineární deformační stopy. Jsou to přímky vycházející z počátku souřadného systému a m_φ je na nich rovno konstantě. Tento druhý typ DMP se ukázal jako názornější a výstižnější, proto je také častěji používán [2, 3, 5].

4.4.1. Definování mezních stavů

Při technologiích plošného tváření plechů, např. tažení nebo lisování, se jako jeden z nejdůležitějších parametrů daného materiálu ukazuje hodnota jeho mezního přetvoření, tj. okamžiku prvního možného vzniku porušení celistvosti materiálu vlivem vzniku trhlin. Problematika tvorby lomů a trhlin je velmi obsáhlá a tato práce svým rozsahem nemůže dostatečně podrobně probrat všechny její aspekty. Na vznik mezního stavu v materiálu má vliv množství ukazatelů, které lze rozdělit na několik skupin, stejně jako i samotné mezní stavy (deformaci, místní porušení, lom), což je znázorněno na obrázku Obr. 4.9 [2, 3, 5, 10].



Obr. 4.9: Příčiny vzniku mezních stavů, mezní stavy a jejich rozdělení

Problém však nastává již při definování pojmu mezního stavu. Při dosažení velkých plastických přetvoření můžeme za mezní stav považovat interval mez pevnosti–vznik tvárného lomu, avšak, jak je zřejmé, může mezi těmito hranicemi existovat řada různě definovaných mezních stavů. Tento problém odstraní varianta ztotožňující mezní stav s okamžikem vzniku trhliny. Je zřejmé, že tato metoda neumožňuje takový rozptyl hodnot jako první, avšak trhlina v materiálu znamená každopádně zmetek. Poslední teorie tvrdí, že mezního přetvoření je dosaženo v okamžiku vzniku lokálního ztenčení [2, 3, 5].

4.4.2. Metody určování mezních stavů

Potom, co jsme nadefinovali mezní stav, můžeme přistoupit ke způsobům jeho zjištění. Mezní stav lze určit množstvím metod, ty nejznámější jsou zde uvedeny [2, 3, 5].

- Je to například metoda ekvivalentního bodu. Její princip spočívá v tom, že se na měřeném tělese vyberou dvě velikosti přetvoření si odpovídající oblasti a pokud v jedné z nich vznikne lom, pak, dle přijaté definice, můžeme pokládat přetvoření v druhé oblasti za mezní. Tento postup může být subjektivně posouzen různě, a proto vykazuje poměrně zavádějící a mnohdy i scestné hodnoty. S přihlédnutím k těmto okolnostem byly vypracovány nové metody snažící se odstranit nedostatky této metody. První dvě z nich vytvořil Veerman a jsou to metody grafická a interpolační.

- Grafická metoda se zabývá zjišťováním gradientu přetvoření, přičemž bere v úvahu tři sousední přetvořené elementy deformační sítě se středním elementem umístěným tak, aby jím procházel budoucí lom. Ve výsledném grafu se pak znázorní závislost přetvoření středního elementu na přetvoření obou sousedních.
- Interpolační metoda dává shodné výsledky jako metoda grafická, je však jednodušší, neboť určuje mezní přetvoření z interpolačního polynomu daného vztahem (4.19). K výpočtu je třeba proměřit vždy tři sousedící elementy po obou stranách lomu.

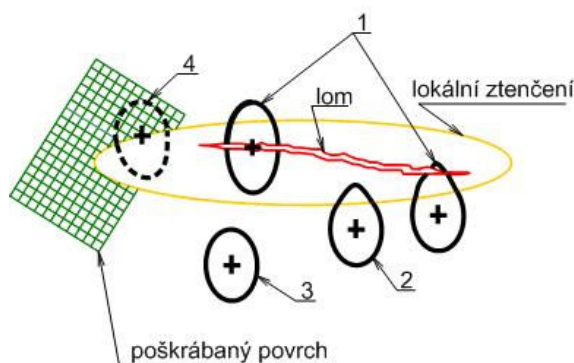
$$\varphi_{1K} = \frac{3}{4} \cdot (\varphi_1^{1L} + \varphi_1^{1P}) - \frac{3}{10} \cdot (\varphi_1^{2L} + \varphi_1^{2P}) + \frac{1}{20} \cdot (\varphi_1^{3L} + \varphi_1^{3P}) \quad [-] \quad (4.19)$$

kde je:

φ^L, φ^P ... přetvoření levého a pravého elementu [-]

- Jako ještě jednodušší se jeví sestavit křivku mezních přetvoření (dále jen KMP), nebo také DMP pro okamžik vzniku lomu, kdy měřený element je pouze jeden, ovšem musí být umístěn v počátku vzniku lomu a lom samotný musí procházet jeho středem.
- Poslední ze zde uveřejněných metod je metoda použitá Heckerem, jejíž výběr zahrnuje elementy zasažené lomem, lokálním ztenčením nebo sousedící s místem porušení, ale které nejsou zasaženy ani lomem ani lokálním ztenčením.

Obrázek Obr. 4.10 ukazuje elementy vyskytující se na tvářeném vzorku a možnosti jejich výběru a členění pro potřeby měření viz. předchozí metody.



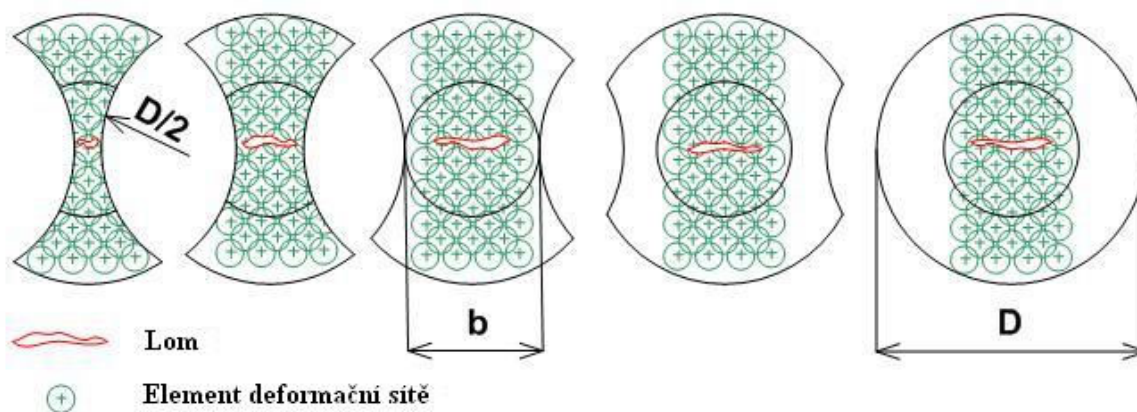
- 1 – elementy zasažené lomem
- 2 – elementy zasažené lokálním ztenčením
- 3 – nezasažené elementy sousedící s lomem
- 4 – elementy v počátku vzniku lomu

Obr. 4.10: Elementy na tvářeném vzorku

4.4.3. Experimentální metody určování DMP

Bylo řečeno, že DMP jsou diagramy komplexní. Vezmeme v úvahu pouze DMP druhého typu, avšak i při tomto omezení existuje několik postupů jejich získání [2, 3, 5].

- Prvním možným řešením je použití zkoušky tahem, kdy různých stavů přetvoření docílíme různými tvary vrubů na zkušební tyčce. Problémem ovšem je, že tyč se deformuje v místě vrubu převážně lineárně a i při použití hustší deformační sítě je velmi obtížné stanovit správné elementy pro zjištění mezního přetvoření. Tento způsob se hodí pro stanovení levé regresní křivky v DMP, zatímco pro konstrukci pravé je prakticky nepoužitelný.
- Druhou možností je vypínání plechu tlakem kapaliny (hydraulická zkouška). U této metody docílíme různých stavů přetvoření různými tvary tažnic, a to od kruhové po eliptickou s různými velikostmi os elips. Nevýhodou této metody je vysoká cena sady tažnic a celého pomocného zařízení. Tento způsob je pravým opakem první metody, neboť se spíše hodí pro konstrukci pravé KMP.
- Třetí možností je hloubení plechu tažníky různých poloměrů. Nevýhodou je vysoká cena sady tažnic a tažníků.
- Čtvrtá a zároveň poslední ze zde citovaných metod je vypínání zkušebních těles různé šíře polokulovým tažníkem. Metodou třetí a čtvrtou lze sestavit jak levou tak i pravou KMP. Tato metoda lze ještě dále rozdělit na tři způsoby provedení.
 - a) Prvním je vypínání přístřihů ve tvaru různě širokých pásů (tzv. Nakazimova metoda). Pro tuto variantu je snadné vytvořit přístřih, ovšem přesné vystředění pásů v tažném nástroji je obtížné a navíc u tenkých přístřihů dochází k porušení jejich okrajové části v blízkosti tažné hrany.
 - b) Druhým je vypínání kruhových přístřihů s odstřiženými kruhovými úsečemi různě velkých poloměrů. Tento tvar přístřihů je obtížnější na přípravu, ovšem eliminuje nevýhody prvního způsobu. Různě velké poloměry úsečí z obou stran nástřihu mění jeho šířku ve střední části, a tím je dosaženo různých stavů přetvoření. Při vhodném způsobu namáhání nastává lom na vrcholu kulového vrchlíku a je umožněno snadné měření elementů deformační sítě.
 - c) Posledním způsobem je vypínání kruhových přístřihů s odstřiženými kruhovými úsečemi stejně velkých poloměrů (Obr. 4.11). Výhody této metody jsou stejné jako u metody b), s tím rozdílem, že pro zhotovení zkušebních těles postačí pouze jeden nástroj. Proto se tato metoda jeví jako nejvhodnější.



Obr. 4.11: Kruhové přístřihy s odstřiženými úsečmi stejného poloměru

Předpokladem pro zhotovení co nejpresnějších diagramů mezních přetvoření je nutné zvládnutí metod vyhodnocení deformovaných vzorků. K tomuto účelů nejčastěji slouží tzv. deformační sítě nanášené na zkušební vzorky před samotným experimentem. Po zkoušce jsou následně, z geometrických změn jednotlivých síťových elementů, stanoveny výsledné dosažené hodnoty deformací. Deformační sítě mohou mít elementy různých velikostí a tvarů (například čtvercové, bodové nebo kruhové viz Obr. 4.11) a současně s tím existuje i řada způsobů jejich zhotovení. Při výběru jednotlivé metody existují určité omezující faktory jako jsou například přesnost sítě, složitost jejího vytvoření, dostupnost potřebného zařízení nebo spolehlivost získaných údajů o velikosti zkoumaného přetvoření. Z celé řady dnes existujících způsobů vytváření povrchových deformačních sítí zde uvádím ty nejběžnější [2, 3, 5]:

- sítotisk, ofsetový tisk,
- gumostereotypie,
- rytí,
- fotografická metoda (pozitivní a negativní),
- vyjiskřování,
- síť vypálená laserem,
- chemické leptání, elektrochemické (elektrolytické) leptání.

4.4.4. Vyhodnocení deformačních sítí

Tato část měření je nejdelší a nejpracnější z celého průběhu DMP. Na začátku měření jsou na jednotlivých vzorcích vybrány vhodné elementy deformační sítě. S přihlédnutím ke způsobům definování mezního přetvoření jsou nejčastěji vybrány ty elementy, které těsně

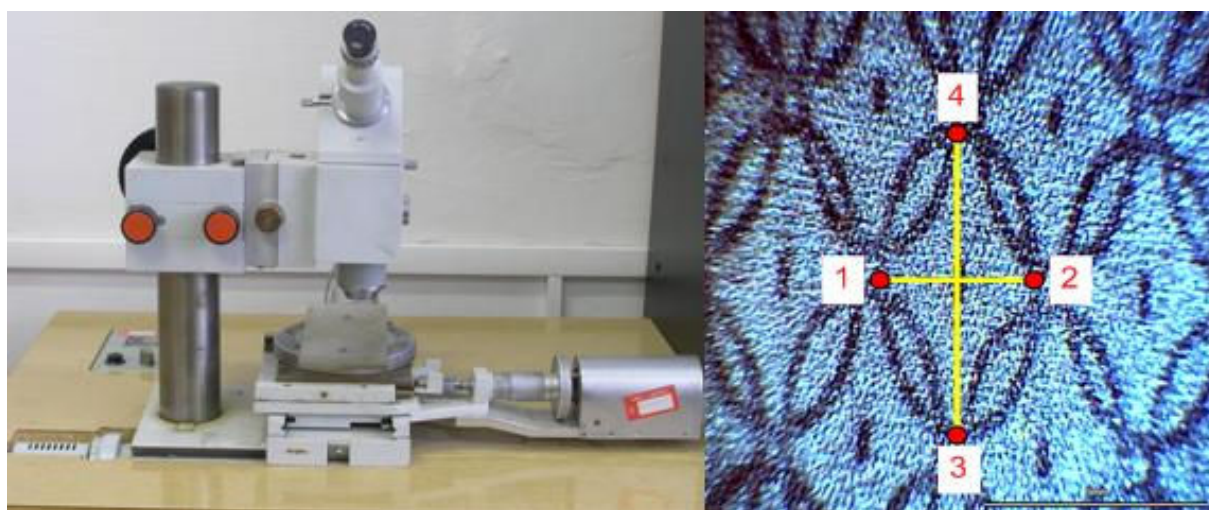
sousedí se vzniklým lomem, ale nejsou jím zasaženy. Pro změření přetvoření kruhových (nejčastěji) elementů deformační sítě, nanesené na zkušební vzorku, můžeme použít jednu z níže jmenovaných metod. Každá z nich představuje vzorového reprezentanta ze skupiny metod odlišujících se od ostatních způsobem vyhodnocení dat [2, 3, 5, 9, 21, 22, 27]:

- dílenský mikroskop,
- systém ARGUS,
- snímání digitální CCD kamerou.

Při použití jakékoliv ze zde uvedených metod dostaneme soubor dat, která můžeme následně použít pro další statistické vyhodnocení či grafické zpracování, velmi často právě pro zhotovení diagramu mezních přetvoření.

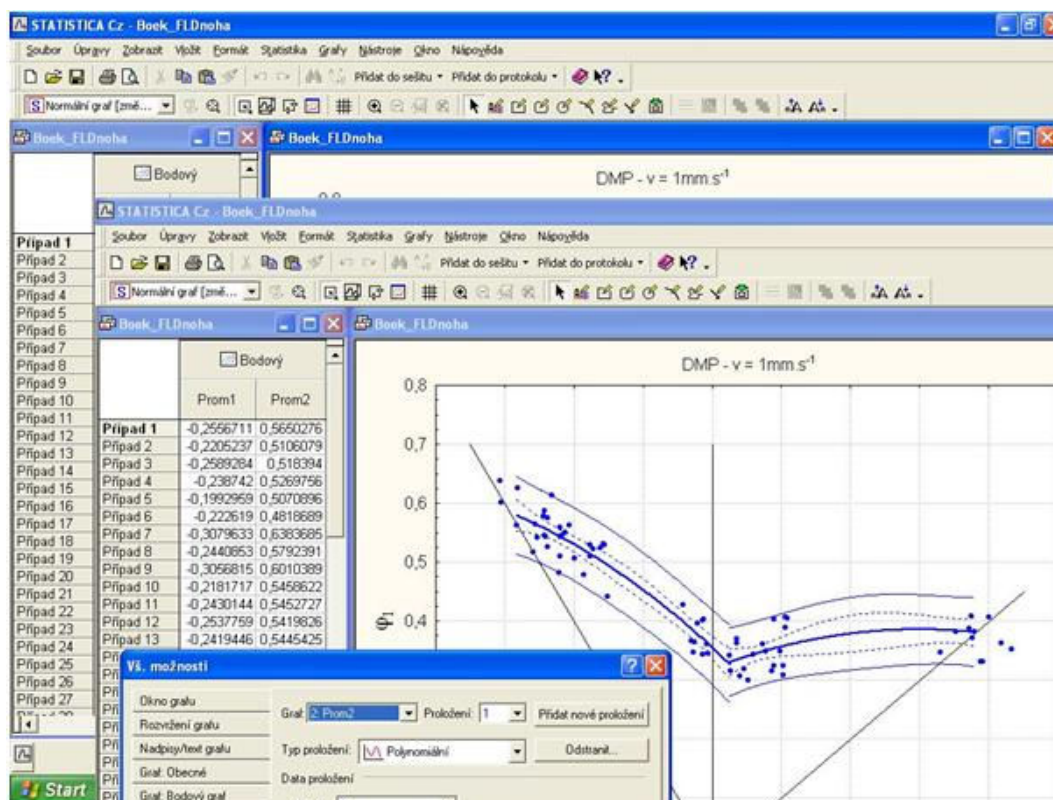
a) Dílenský mikroskop

Metoda měření deformačních sítí dílenským mikroskopem je jednou z nejběžnějších metod zjištění výsledných deformací zkušebních vzorků. Jejím principem je zjištění rozměrů deformovaného elementu (s přihlédnutím ke způsobům definování mezního přetvoření viz kapitola 4.4.1). V případě použití sítě s elementy kruhového tvaru, jak je ukázáno v pravé části obrázku Obr. 4.12, měříme po deformaci u zvolených prvků délku hlavních a vedlejších os vzniklých elips (hlavní osa 3-4, vedlejší osa 1-2). Takto zjištěná data je nutno průběžně zapisovat a nakonec přepočítat na požadované hodnoty deformací v hlavním (podélném) φ_1 a vedlejším (příčném) směru φ_2 a sestavit z nich diagramy mezních přetvoření [2, 3, 5].



Obr. 4.12: Dílenský mikroskop a způsob měření deformovaného elementu

V laboratořích Katedry strojírenské technologie (Technické univerzity v Liberci) je měření deformačních sítí prováděno právě tímto způsobem za pomoci dílenského mikroskopu firmy Zeiss, znázorněném taktéž na obrázku Obr. 4.12 v jeho levé části. Tento mikroskop je propojen se stolním PC a umožňuje přímou digitalizaci a záznam naměřených dat. Takto získané hodnoty jsou nejčastěji nahrány do programu Microsoft Excel pro zjištění logaritmických přetvoření [2, 5].



Obr. 4.13: Grafické rozhraní programu Statistica 6.0

Výsledné hodnoty jsou nakonec importovány do programu Statistica 6.0 pro sestavení diagramů mezních přetvoření. Grafické rozhraní tohoto programu spolu s hotovým DMP je ukázáno na obrázku Obr. 4.13. Tento program umožňuje zobrazit nejen pásma bodů s regresními křivkami (křivkami mezních přetvoření KMP) a rovnicemi regresí, ale i toleranční a konfidenční intervaly [2, 5].

Pro přehlednost jsou zde nyní uvedeny v tabulce Tab. 4.1 základní parametry dílenského mikroskopu Zeiss.

Tab. 4.1: Vybrané parametry dílenského mikroskopu Zeiss

Dílenský mikroskop		Zeiss R15U/6
Měřicí rozsah	Posuv XYZ	30x40x50 mm
	Úhel	360°
Přesnost	Posuv XY	0,01 mm
	Úhel	0,1°
Zvětšení	Okulár	6,3x
	Objektiv	1,6x
	Celkové	10,08x
Maximální hmotnost vzorku		cca 5 kg
Hmotnost zařízení		cca 30 kg

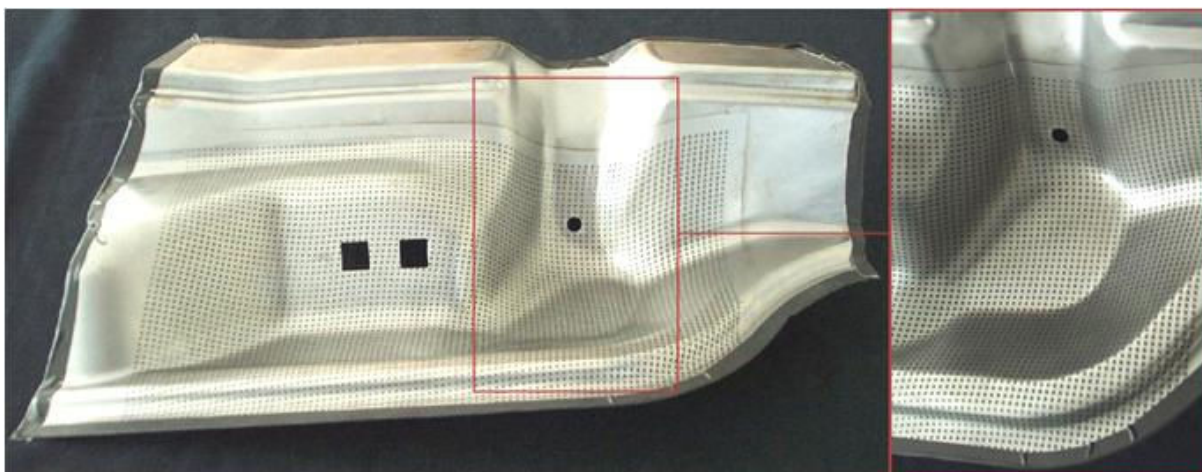
b) Systém ARGUS

Měřicí zařízení ARGUS je bezkontaktní optický systém pro měření 3D deformací plechů při lisovacím procesu, používaný řadou strojírenských firem (například firmou Škoda Auto a.s.). Princip snímání hotového výlisku s přenosem dat do počítače a detail snímací kamery jsou znázorněny na následujícím obrázku Obr. 4.14 [21, 22, 27].



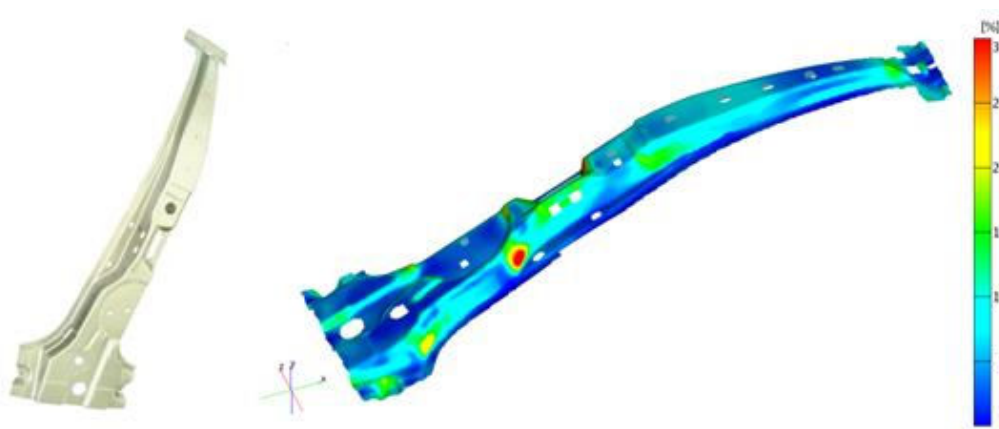
Obr. 4.14: Měřicí systém ARGUS s detailem snímací kamery

Na měřeném objektu je vytvořena bodová síť, která se deformuje současně s lisováním plechového dílu, jak je znázorněno na obrázku Obr. 4.15. Velikost bodů sítě je standardně mezi 1 a 6 mm. Tato síť je po vylisování plechu nasnímána kamerou s CCD čipem [21, 22, 27].



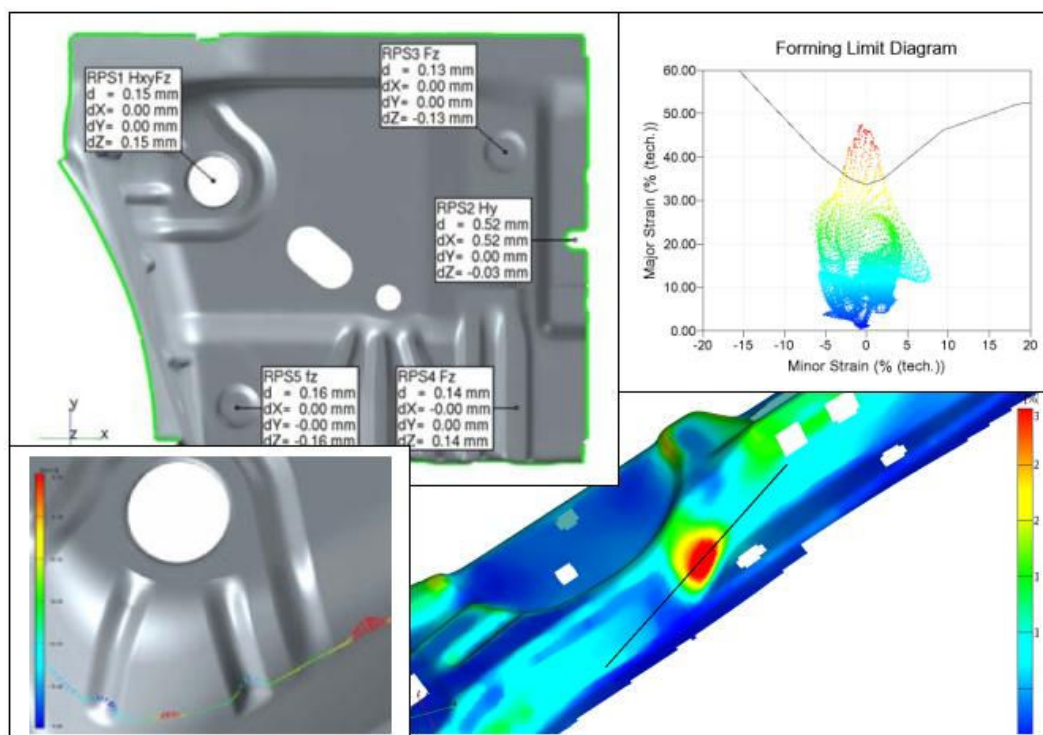
Obr. 4.15: Detail bodové deformační sítě

Ze snímků jsou pomocí Image Processingu (matematické vyhodnocení obrazu) vypočteny souřadnice bodů mřížky a sestaven 3D model výrobku. Na základě metody zachování konstantního objemu je vypočteno rozložení deformací (jak ukazuje obrázek Obr. 4.16) a je zjištěna redukce tloušťky materiálu. Přednosti tohoto systému jsou mobilita (malé rozměry zařízení), flexibilita (snadná změna velikosti záběru a rozlišitelnosti systému), velký rozsah měření deformace, vysoká přesnost a hustota naměřených dat a také přehledná analýza výsledků měření tj. grafická vizualizace. Hodnoty některých jmenovaných parametrů tohoto systému jsou uvedeny v tabulce Tab. 4.2 [21, 22, 27].



Obr. 4.16: Nasnímaný vzorek a příslušný 3D model s rozložením deformací

Kromě hlavních a vedlejších deformací (Major Strain, Minor Strain), mohou být dalšími výstupy z měření například hodnoty napětí (Mises, Tresca) nebo diagramy mezních přetvoření (Forming Limit Diagram). Lze také provádět řezy a zjistit změny tloušťky materiálu. Některé tyto výstupy jsou zobrazeny na obrázku Obr. 4.17 [21, 22, 27].



Obr. 4.17: Další příklady vizualizace systému ARGUS

Systém ARGUS lze rozdělit na několik základních typů provedení, které se vzájemně liší dosahovanými parametry, a tím i možnostmi svého použití [21, 22, 27].

- ARGUS 0,8M je určen pro základní úlohy měření deformací, kde není požadováno vysoké rozlišení. Rozlišení CCD čipu u tohoto modelu je 800000 pixelů, a proto je vhodný pro menší a střední díly. Měření provádí FW kamera.
- ARGUS 2M je určen pro základní úlohy měření deformací, kde není požadováno vysoké rozlišení. Rozlišení CCD čipu činí 2000000 pixelů, a proto je vhodný pro středně velké díly. Měření provádí FW kamera.
- ARGUS 4M je vzhledem k vyššímu rozlišení CCD čipu vhodný pro měření velkých objektů nebo pro měření detailů. Rozlišení CCD čipu je u tohoto modelu 4000000 pixelů. Měření provádí FW kamera.
- ARGUS 12M je určen pro náročnější úlohy měření deformací, kde je požadavek na vysoké rozlišení detailů. K měření se používá digitální kamera Nikon D2X s rozlišením CCD čipu 12000000 pixelů.

V následující tabulce Tab. 4.2 jsou přehledně uvedeny, jak již bylo řečeno dříve, některé hodnoty základních parametrů tohoto měřicího systému [21, 22, 27].

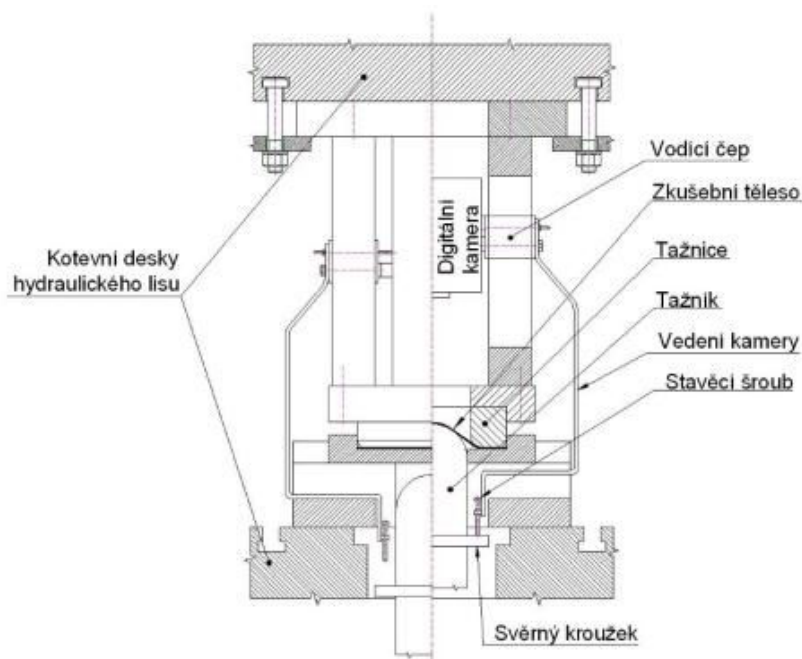
Tab. 4.2: Vybrané parametry měřicího zařízení ARGUS

ARGUS - typ	0,8M	1,3M	2M	4M	12M
Rozlišení kamer	1024x768 pixelů	1280x1024 pixelů	1600x1200 pixelů	2048x2048 pixelů	4280x2840 pixelů
Snímaná plocha	100 mm ² až m ²				
Počet bodů	dle typu 10000 až 300000				
Rozsah deformace	0,5 % až 300 %				
Maximální přesnost	0,1 až 0,2 %				
Rozměry senzoru	90x70x120 mm				
Hmotnost zařízení	0,7 kg				

Kromě systému ARGUS existuje v dnešní době celá řada dalších obdobných metod měřících na podobném principu. Vzájemně se odlišují počtem a přesností snímacích kamer, použitým vyhodnocovacím algoritmem a možnostmi využití pro různé strojírenské obory. Mezi ty nejznámější patří ATOS, ARAMIS, TRITOP, PONTOS nebo ESPI [21, 22, 27].

c) CCD kamera

Snímání deformace zatěžovaného vzorku digitální CCD kamerou je prováděno v reálném čase. Pokud je zabezpečena synchronizace posuvu kamery s deformovaným povrchem zkušebního vzorku, je možné ze zpětné analýzy jednotlivých snímků určit přesný okamžik vzniku trhliny a k tomu i příslušnou mezní deformaci vzorku. Experimenty s kamerou opatřenou CCD čipem probíhaly i na naší katedře. Ve speciálně upraveném tažném nástroji byla vytvořena mechanická synchronizace posuvu zatěžovaného povrchu vzorku s posuvem CCD kamery, pro zachování konstantní ohniskové vzdálenosti snímání, tak jak je ukázáno na schematickém obrázku Obr. 4.18. Po experimentu byla kamera propojena s PC a získaná data byla s minimální ztrátou kvality pořízeného záznamu přenesena přes vysokorychlostní rozhraní FireWire. Měření vybraných elementů bylo poté provedeno na obrazovce monitoru za pomoci speciálně naprogramovaného jednoduchého jednoúčelového programu. Tento program funguje na principu kalibrace známého rozměru, v našem případě je to velikost elementu deformační sítě. Přesnost naměřených dat je dána samotnou kvalitou snímacího prvku kamery, tedy velikostí výstupního obrazu v pixelech. Pixel, jakožto základní jednotka délky pro PC, je schopen udávat i kvalitu daného obrazu - z toho plyne: čím větší počet pixelů snímek má, tím je kvalitnější a naměřená data jsou přesnější [9].



Obr. 4.18: Schéma upevnění CCD kamery

Obdobně lze snímat deformační síť za pomoci digitálního fotoaparátu. Po měření je opět nutno vyhodnotit a proměřit jednotlivé pořízené snímky.

4.4.5. Statistické vyhodnocení KMP

Statistické vyhodnocení křivek mezních přetvoření (KMP) lze provést buď pomocí počítačového softwaru nebo pomocí známých vzorců. V kapitole 4.4.4 a) byl blíže popsán postup statistického vyhodnocení KMP v programu Statistica 6.0. Na tomto místě bych se proto rád zmínil o klasickém způsobu statistického vyhodnocení těchto křivek bez použití počítačového softwaru. Logaritmická přetvoření v podélném φ_1 a příčném φ_2 směru dle vzorce (4.17) jsou graficky znázorněna jako pás bodů o souřadnicích φ_{2kj} a φ_{1kj} představujících mezní přetvoření. Index $j = 1$ až $j = N$ tedy udává počet bodů v daném pásmu. Toto experimentálně zjištěné pásmo mezních přetvoření je následně proloženo v pravé i levé větvi regresní polynomickou křivkou druhého stupně danou rovnicí (4.20) [2, 5].

$$\varphi_{1kj} = a + b \varphi_{2kj} + c \varphi_{2kj}^2 [-] \quad (4.20)$$

kde je:

$\varphi_{2kj}, \varphi_{1kj}$... souřadnice mezních bodů v DMP

a, b, c ... regresní koeficienty

Jelikož je křivka mezních přetvoření (regresní křivka) statistickým znázorněním střední hodnoty náhodného výběru ze souboru naměřených bodů, je tudíž náhodnou veličinou, a tím i odhad vektoru jejích regresních koeficientů a , b , c je zatížen jistou chybou. Přesnost odhadu těchto parametrů základního souboru udává konfidenční interval. Pro KMP ve tvaru polynomu druhého řádu (nejčastěji) lze střední hodnotu mezní deformace φ_{1kj} (na hladině významnosti α) stanovit podle tzv. zjednodušeného konfidenčního intervalu popsaného rovnicí (4.21). Konfidenční interval je podél regresní křivky konstantní [2, 5].

$$\varphi_{K1kj} \pm t_{\alpha} \cdot (n - p) \cdot s_R \cdot \sqrt{\frac{1}{N_m}} \quad [-] \quad (4.21)$$

kde je:

$t_{\alpha}(n-p)$... kritická hodnota studentova rozdělení se stupni volnosti $(n-p)$

s_R ... reziduální směrodatná odchylka

N_m ... počet měření

Vedle konfidenčního intervalu lze stanovit i oboustranné toleranční meze, tj. toleranční interval. Tento interval udává pravděpodobnost výskytu bodů základního souboru v tomto intervalu a je popsán vzorcem (4.22). S větší pravděpodobností tudíž šířka obou pásem (konfidenčního i tolerančního) roste [2, 5].

$$\varphi_{T1kj} \pm k_I \cdot s_R \quad [-] \quad (4.22)$$

kde je:

k_I ... tabelovaná hodnota

5. FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ PROCES TAŽENÍ

Při tažení výlisků karosářského typu se vyskytuje množství činitelů, které tento proces více či méně ovlivňují. Tyto vlivy můžeme rozdělit na dvě skupiny, a to na materiálové a technologické. Do první kategorie například patří samotná hutní výroba plechového materiálu (rozdílnost mezi jednotlivými tavbami, svitky plechu, tabulemi plechu, plošná anizotropie) nebo vliv použité tloušťky plechu. Do kategorie druhé by potom patřily vlastní technologické podmínky, tedy veličiny ovlivňující vlastní proces výroby výlisku. Mezi ty nejvýznamnější patří stav napjatosti převládající v objemu tvářeného materiálu, teplota tváření, rychlost přetvoření, podmínky tření a historie přetvoření.

Velikost přetvárného odporu výrazně závisí na teplotě, při níž k plastické deformaci dochází. Je nutno ji posuzovat vzhledem k teplotě tání nebo k teplotě rekrytalizace příslušného kovu či slitiny. Dalším důležitým činitelem je přetvárná (deformační) rychlost. Při malých rychlostech je přetvárný odpor menší než při rychlostech vysokých. Tváříme-li za studena, závisí přetvárný odpor i na velikosti deformace, protože během plastické deformace dochází ke zpevňování materiálu. Úměrně se zvětšující se deformací stoupá přetvárná pevnost, a tím přetvárný odpor. Při tváření za tepla je závislost přetvárné pevnosti na velikosti deformace méně výrazná, zejména při vyšších tvářecích teplotách a malých rychlostech tváření, protože souběžně se zpevňováním probíhá rekrytalizace. Při většině tvárných procesů dochází ke tření tvářeného tělesa o povrch tvářecího nástroje. Přetvárný odpor v těchto případech závisí na velikosti vnějšího tření, které se snažíme snížit vhodným mazivem [1, 3, 5, 14, 16].

Zmíněný přetvárný (deformační) odpor, značený k_o , můžeme definovat jako souhrn napětí nerovnoměrně rozložených v objemu tvářeného materiálu, který působí proti napětím vyvozovaným vnějšími silami, jež deformaci způsobují. Přetvárný odpor je větší než přetvárná (deformační) pevnost, protože ve většině technologií tváření dochází ještě ke tření tvářeného materiálu o nástroj, které omezuje rozsah deformace. Rozdíl mezi přetvárnou pevností a přetvárným odporem také způsobuje rychlost tváření. Obecnou závislost mezi přetvárným odporem k_o a přetvárnou pevností k_p popisuje vztah (5.1) [16].

$$k_o = k_p + q \text{ [MPa]} \quad (5.1)$$

kde je:

k_p ... přetvárná pevnost [MPa]

q ... přídatné napětí (je funkcí jednotlivých vlivů) [MPa]

Přetvárná pevnost je materiálovou vlastností. Přetvárný odpor závisí na přetvárné pevnosti a na řadě dalších vlivů, které souvisejí s technologickými podmínkami provedení plastické deformace. Je to (jak již bylo dříve řečeno) například tvářecí teplota, poměrná rychlost tváření, stupeň předchozí deformace při tváření pod rekrystalizační teplotou, stupeň prokování při tváření ingotů, součinitel tření mezi tvářeným materiálem a lícem nástroje, stav napjatosti a poměr plochy zatížené přetvárnou silou k celkové ploše. Přetvárný odpor tudíž není materiálovou vlastností. Přetvárný odpor také není neměnný v průběhu plastické deformace, proto je třeba počítat se středním přetvárným odporem dle vztahu (5.2) [1, 16].

$$k_{os} = k_p \cdot m' [\text{MPa}] \quad (5.2)$$

kde je:

m' ... individuální výraz pro jednotlivé tvářecí operace [-]

Při praktických výpočtech přetvárných sil se střední přetvárný odpor odečítá nejčastěji z nomogramů, grafů nebo tabulek. Ty jsou sestaveny pro různé druhy materiálů a tvářecí teploty, s přihlédnutím k dalším podmínkám tváření, zejména k velikosti přetvoření a přetvárné rychlosti. Křivky deformačních odporů získáme buď experimentálně nebo výpočty.

5.1. Rychlost deformace

Při rozboru vlivu rychlosti přetvoření (deformace) na tvářecí proces je třeba nejdříve zavést způsob jejího určení. Od rychlosti přetvoření musíme odlišit rychlost tváření (nástroje). Při konstantní rychlosti tváření (zatěžování) je rychlost přetvoření v jednotlivých částech výlisku různá, v závislosti na tvaru výsledného tělesa, tj. složitosti a hloubce výtažku. Rychlost posuvu jednotlivých dílčích bodů tvářeného tělesa je tedy různá. Při tváření za studena za nízkých rychlostí deformace mez plasticity materiálu roste s velikostí přetvoření v důsledku zpevnění. Avšak při vysokých rychlostech přetvoření může v důsledku tepelného efektu nastat proces zotavení a vlivem toho se mez plasticity materiálu sníží [7, 14].

Čím vyšší je rychlost přetvoření, tím nižší je i příslušná ekvikohezní teplota a naopak. Tento jev je podstatou vlivu rychlosti přetvoření na velikost přetvárného odporu. Při tváření kovů pod rekrystalizační teplotou vznikají prokluzu uvnitř krystalitů. Proto je za těchto podmínek přetvárný odpor jen poměrně málo závislý na rychlosti přetvoření. Dojde-li však při ekvikohezní teplotě, příslušející použité rychlosti přetvoření, k vyrovnání pevnosti krystalitů s pevností mezikrystalové hmoty, změní se charakter plastické deformace [14].

Je třeba také rozeznávat rychlost přetvoření vztaženou k rychlosti rekrytalizace nebo k rychlosti základních způsobů trvalých deformací, tj. k rychlosti kluzu a rychlosti dvojčatění. Při vysoké rychlosti přetvoření je čas potřebný k jejímu uskutečnění malý a může být i kratší než čas nutný k obnově struktury rekrytalizací. V tomto případě je přetvárný odpor poměrně vysoký, i když tváření probíhá nad rekrytalizační teplotou. Při malé rychlosti deformace je třeba k jejímu provedení poměrně velký časový úsek, proti němuž bude čas nutný k rekrytalizaci menší. Tentokrát je přetvárný odpor malý a bude málo záviset na rychlosti plastického přetvoření. Vliv rychlosti přetvoření na přetvárný odpor úzce souvisí s teplotou, při níž plastická deformace probíhá. Každý materiál má při dané tvářecí teplotě určitou kritickou poměrnou rychlost přetvoření c_{krit} , od které se začíná projevovat vliv rychlosti na velikost přetvárného odporu. Naopak když se nedosáhne této kritické deformace, nebude se projevovat vliv rychlosti na přetvárný odpor [14].

5.1.1. Definice rychlosti deformace

Rychlost deformace může být definována buď jako rychlost, kterou se navzájem pohybují dva elementy tvářeného tělesa vzdálené o jednotku délky, nebo jako změna stupně deformace za jednotku času. Proto je rychlost deformace c_d dána vztahem (5.3) [2, 5, 14, 16].

$$c_d = \frac{dv}{l} = d\left(\frac{dl}{dt}\right) \cdot \frac{1}{l} = \frac{d\left(\frac{dl}{l}\right)}{dt} = \frac{d\varphi}{dt} = \dot{\varphi} \text{ [s}^{-1}\text{]} \quad (5.3)$$

kde je:

v ... relativní rychlost [mm.s⁻¹]

l ... vzdálenost pohybujících se elementů [mm]

$d\varphi$... přírůstek přetvoření [-]

t ... čas [s]

K informativnímu zjištění vlivu přetvárné rychlosti na přetvárnou pevnost lze obecně použít empirický vztah (5.4) [16].

$$k'_p = k_p (1 + 0,02 \cdot \dot{\varphi}) \text{ [MPa]} \quad (5.4)$$

kde je:

k'_p - přetvárná pevnost při přetvárné rychlosti $\dot{\varphi}$ [MPa]

k_p - přetvárná pevnost platná pro malé rychlosti [MPa]

Dalším možným pojmem vyskytujícím se v literatuře a popisujícím vliv rychlosti je tzv. intenzita rychlosti přetvoření (deformace) vyjádřená vzorcem (5.5). Je to vlastně intenzita rychlostí smykových deformací [5, 16].

$$c_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(c_1 - c_2)^2 + (c_2 - c_3)^2 + (c_3 - c_1)^2} \quad [\text{s}^{-1}] \quad (5.5)$$

kde je:

$c_1, c_2, c_3 \dots$ složky rychlosti přetvoření v jednotlivých směrech [s^{-1}]

Při tváření za studena s úplným zpevněním je účinek poměrné rychlosti logaritmického přetvoření na přetvárnou pevnost nevýrazný, a proto platí funkce $k_p(\varphi)$ (respektive $\sigma(\varphi)$), kterou pro jednoosou napjatost vyjadřuje vztah (4.12) použitý již v kapitole 4.1.2. Jakmile se poměrná rychlost logaritmického přetvoření přiblíží ke kritické, toto zjednodušení již neplatí (zejména následkem tepelného efektu). Růstem teploty tváření klesá účinek logaritmického přetvoření a roste účinek rychlosti na přetvárný odpor. Při vysokých teplotách (s úplným odpevněním) je už vliv deformace zanedbatelný, a proto platí funkce $k_p(\dot{\varphi})$ respektive $\sigma(\dot{\varphi})$, kterou analyticky pro všeobecnou napjatost vyjadřuje vztah (4.15) uvedený v kapitole 4.1.2. Pokud tuto rovnici přepíšeme do tvaru vyjadřujícího vliv příslušných intenzit deformací získáme vztah ve tvaru (5.6) [1, 3, 5].

$$k_p = C \cdot \varphi_i^n \cdot \dot{\varphi}_i^m \quad [\text{MPa}] \quad (5.6)$$

kde je:

$\dot{\varphi}_i \dots$ intenzita poměrné rychlosti logaritmické deformace [-]

$\varphi_i \dots$ intenzita logaritmické deformace [-]

$m \dots$ exponent citlivosti na $\dot{\varphi}_i$ [-]

5.1.2. Zjištění rychlosti deformace

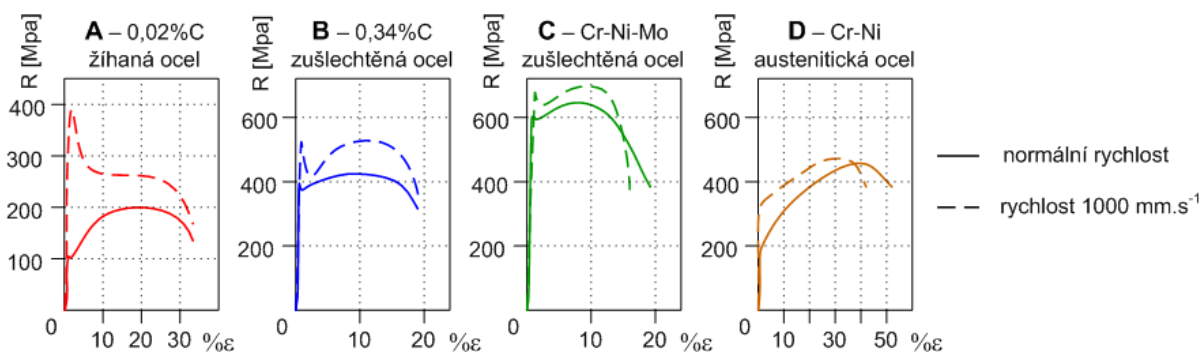
Rychlost deformace, definovaná v předchozí kapitole, je důležitým parametrem každé prováděné zkoušky, ať jde o klasickou zkoušku tahem, či o zkoušky vysokými rychlostmi jako je například extrémní tváření výbuchem (jehož doba se měří v milisekundách) nebo rázová zkouška (viz kapitola 4.2). Rychlost deformace lze u jednoduchých případů (jako je například zkouška tahem) nejsnáze stanovit z rychlosti zatěžování vzorku. Tato hodnota je dána nastavenými parametry strojního zařízení, u tahové zkoušky je to tedy rychlost posuvu

čelistí trhačího stroje. Tvar trhačího diagramu v souřadnicích R - ε názorně ukazuje, že i při stejnoměrném posuvu čelistí je rychlost přírůstku napětí velmi nerovnoměrná v různých fázích zkoušky. V první fázi, kdy již malé prodloužení způsobí velký přírůstek napětí, je nutno zatěžovat pomalu, aby bylo možno jasně odečíst potřebné hodnoty a aby vliv rychlosti chodu stroje na výsledky nepřekročil požadované meze přesnosti zkoušky. V této fázi, která sahá až přes mez kluzu, se chod stroje kontroluje nejlépe měřením rychlosti růstu zatížení. Ve druhé následující fázi rychlých deformací se obvykle pro úsporu času chod stroje značně zrychluje a je účelnější měřit rychlost prodlužování zkušební tyče [2, 7].

Obecně se rychlost zatěžování při tváření v technické praxi měří různými způsoby. Nejjednodušší, ale ovšem jen hrubé, je měřit stopkami čas od počátku zkoušky až do největšího zatížení, popřípadě až do přetržení. Rychlost deformace je poté spočtena dle vztahu (5.3) jako poměr získané skutečné deformace vzorku a změřeného času. Pro zjištění vlivu rychlosti na tvar DMP je různých rychlostí přetvoření docilováno právě tímto způsobem s využitím různých rychlostí pohybu tažníku. Oproti tomu existují dnes již bezdotykové metody snímání vzorků, které dokáží ze vzniklých deformací v různých místech stanovit okamžité hodnoty hledaných rychlostí deformace. Některé tyto metody byly uvedeny již dříve v kapitole 4.4.4 [2, 7].

5.1.3. Vliv rychlosti deformace na vlastnosti materiálu

Vliv rychlosti přetvoření (viz předchozí části kapitoly 5) na mechanické vlastnosti materiálu je velmi významný. Při pomalém zkoušení se tažnost a kontrakce u většiny kovů mění jen málo. Mez kluzu ocelí stoupá velmi výrazně, takže někdy leží nad mezí pevnosti. Změny mechanických vlastností (meze pevnosti a mez kluzu) různých materiálů vlivem rychlosti zatěžování jsou znázorněny na zjednodušeném schematickém obrázku Obr. 5.1 [7].



Obr. 5.1: Tvary trhačích diagramů pro různé oceli při dvou rychlostech zatěžování

Vliv rychlosti je tím menší, čím má kov vyšší bod tání. Za nízkých teplot a při rychlém zatěžování značně klesá u feritických ocelí houževnatost a materiál se přetrhne již bez deformace křehkým lomem. Výjimkou jsou však například již dříve zmíněné TWIP oceli (viz kapitola 3.1.6) [7].

Cílem této disertační práce, je podrobné zkoumání vlivu vysokých rychlostí deformace (zejména pomocí tahové zkoušky a diagramů mezních přetvoření) na vysokopevnostní materiály. Proto by také mělo být jedním z jejich výsledků podpoření či vyvrácení údajů popsaných v této kapitole.

5.2. Teplota

Každý polykrystalický kov obsahuje dvě základní hmoty. Jednu část tvoří hmota uspořádaná v určitém typu krystalické mřížky, kde je hustota poruch v uspořádání a dislokací poměrně malá. Druhou část hmoty tvoří rozhraní krystalů, kde je počet poruch a dislokací mnohonásobně vyšší. Pevnost obou výše zmiňovaných podílů je za určitých teplot rozdílná. S rostoucí teplotou u všech kovů klesá pevnost krystalů i mezikrystalové hmoty. Pokles v obou podílech ovšem neprobíhá současně. Pevnost krystalitů při zvyšování teploty se nejdříve sníží rychleji a vyrovná se s pevností mezikrystalového podílu při tzv. ekvikohezní teplotě. Tato teplota není fyzikální konstantou, neboť závisí na rychlosti přetvoření (deformace). Závislost přetvárného odporu na teplotě dále vyplývá z vlivu teploty na přetvárnou pevnost [1, 16].

Pro závislost přetvárného odporu na teplotě, v oblasti jediné fáze, platí obecný Kurnakovův zákon závislosti mechanických vlastností kovů na teplotě, vyjádřený vztahem (5.7) [1, 16].

$$M = M_0 \cdot e^{-\alpha(T-T_0)} [\text{MPa}] \quad (5.7)$$

kde je:

M, M_0 ... jsou mechanické vlastnosti [MPa]

T, T_0 ... teploty [K]

α ... teplotní součinitel [K^{-1}] ($\alpha = 0,008 \div 0,012$)

Index 0 v některých členech značí normální teplotní stav materiálu. Teplotní součinitel α závisí na chemickém složení a fyzikálních vlastnostech slitiny a na podmínkách deformace, tj. na stupni a rychlosti přetvoření a na druhu napjatosti vznikající v procesu tváření [1, 16].

Vliv teploty na tváření se zkoumá společně s určitou konstantní hodnotou φ pro různé φ s výjimkou teplotních intervalů se sníženou plasticitou. K nejzávažnějším příčinám poklesu plasticity patří: stárnutí, alotropické přeměny ($\alpha \rightarrow \gamma$), smíšené orientované struktury s řádkovitostí, přehřátí a spálení kovu. Teplota zásadně snižuje strmost (exponent n) a polohu (konstanta C) funkce $\sigma(\varphi)$ u aproximačních diagramů tahové zkoušky. Nebezpečné teplotní oblasti, při kterých klesá plasticita, jsou oblasti fázových přeměn, tváření za neúplného ohřevu nebo oblasti stárnutí a lámavosti při modrém žáru. Protože pohyblivost atomů roste se stoupající teplotou, potom i vyléčení mikrotrhlin se lehčeji uskutečňuje při tváření za tepla. Díky tomu tváření za tepla vyžaduje menší tvářecí síly a umožňuje získat maximální změny tvaru bez porušení soudržnosti [1, 16].

5.3. Stav přetvoření

Až 80% přirozené přetvárné práce se mění na potenciální energii skrytou v napětích. Proto velikost zbytkových napětí závisí na velikosti deformace (přetvoření). Základní veličiny určující přetvoření jsou poměrné prodloužení stanovené v kapitole 4.1.2 vztahem (4.6) a zkos daný vzorcem (5.8) [1, 10].

$$\gamma = \frac{\Delta\alpha}{\alpha_0} [-] \quad (5.8)$$

kde je:

α_0 ... původní úhel mezi přímkami na deformovaném tělese [°]

$\Delta\alpha$... změna úhlu vlivem zatížení [°]

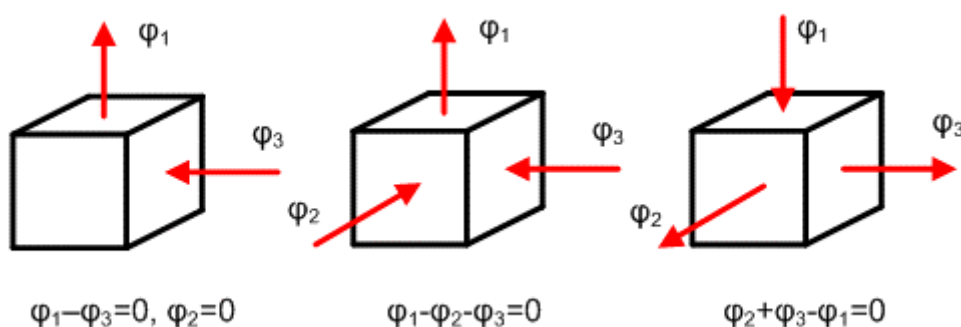
Poměrné prodloužení je možné použít jen v případě malých deformací. Za hranici použitelnosti vztahu se obvykle považuje hodnota $\varepsilon = 0,1$. Jelikož tato hodnota bývá často překročena, je nutné v takovém případě použít vztah diferenciální (5.9) popisující hodnotu skutečné deformace. Po integraci získáme výsledný vztah pro logaritmické přetvoření ve tvaru (4.17) uvedeném již v kapitole 4.4 [3, 5, 10, 16].

$$d\varphi = \frac{dl}{l} [-] \quad (5.9)$$

Dalším důležitým ukazatelem je intenzita deformace daná vztahem (5.10) [5, 16].

$$\varphi_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{(\varphi_1 - \varphi_2)^2 + (\varphi_2 - \varphi_3)^2 + (\varphi_3 - \varphi_1)^2} \quad [-] \quad (5.10)$$

Různá přetvoření je možné též znázornit pomocí schémat přetvoření, jak je naznačeno na obrázku Obr. 5.2. Obecně lze tedy konstatovat, že vliv stavu přetvoření na vlastní proces tváření a jeho energosilové parametry je značný [3].



Obr. 5.2: Schémata přetvoření

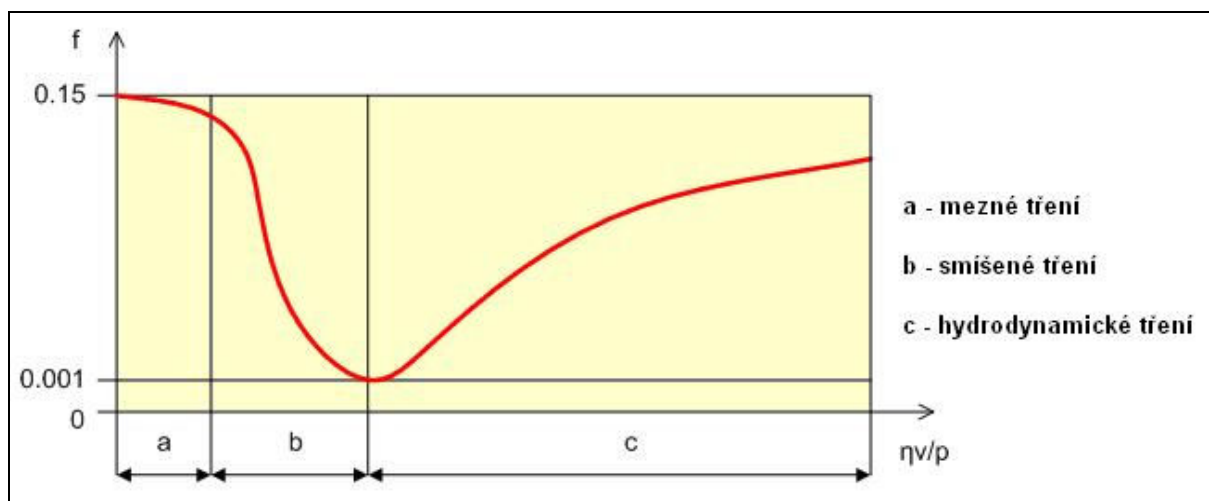
5.4. Tření

Relativní odpor proti pohybu na kontaktní ploše nazýváme tření. Třecí síly působí od kontaktního povrchu do hloubky tvářeného tělesa, čímž vznikají zóny stažené deformace. Nerovnoměrnost deformace narušuje identitu podmínek v průběhu zpevňujících a odpevňujících procesů v přetvářeném objemu tělesa, v důsledku čehož může vznikat nerovnoměrnost vlastností v kovu (například ve formě různých stupňů zpevnění v deformovaném objemu, různá velikost zrna a podobně) [1, 3, 14, 16].

Kontaktní tření tedy zvyšuje potřebné tvářecí síly a práce. Kontaktní tření také zvyšuje potřebu použití technologických maziv, což zdržuje technologický proces a mnohokrát vyžaduje předběžnou úpravu povrchu polotovaru, například fosfátováním, povlaky povrchu plastickými hmotami a podobně. Součinitel tření nejvíce snižuje správný výběr maziva.

Mazivo má za úkol vytvořit pevný mazací film, dobře přilnout ke kontaktnímu povrchu a současně se musí dát po tváření lehko odstranit. Mazadla při tváření mají zmenšit třecí odpory (a tím umožnit větší stupeň deformace), snížit spotřebu energie na překonání pasivních odporů a zvýšit deformační účinnost, zmenšit otěr nástrojů, zabránit zadření a

prodloužit životnost nástrojů. Protože však kontaktní tření není izotropní, je možno regulací mazání částečně ovlivnit i průběh deformace. Velký vliv na tření mají i okraje, povrchové kysličníky při tváření za studena a podobně. V tomto případě ovlivňuje podmínky tření i deformační zpevnění kovu. Vliv různých faktorů na tření znázorňuje Striebeckův diagram tření zobrazený na obrázku Obr. 5.3 [1, 3, 14, 16].



Obr. 5.3: Striebeckův diagram tření

Vysvětlivky k obrázku Obr. 5.3:

η ... dynamická viskozita [$\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$],

v ... rychlost pohybu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],

p ... přítlak [Pa].

Koeficient tření f ze Striebeckova diagramu je tabulkovou hodnotou a jeho velikost závisí na tribologických podmínkách. Třecí síla T je obecně dána známým vztahem (5.11), vyjadřujícím závislost této veličiny na přítláčné síle a součiniteli tření [1, 14, 16].

$$T = N \cdot \mu_P \text{ [N]} \quad (5.11)$$

kde je:

N ... normální síla materiálu na činnou plochu nástroje [N]

μ_P ... součinitel tření při plastické deformaci [-]

Součinitel tření při plastické deformaci μ_P je větší než koeficient tření f a mají na něj vliv níže uvedené parametry [1, 14, 16].



- Drsnost povrchu nástroje a druh materiálu nástroje.
- Druh tvářeného materiálu a vlastnosti jeho povrchu.
- Vliv druhu tření - nejčastěji bývá suché či mezné, případně polokapalinné, někdy i nestabilní kapalinné nebo čistě kapalinné.
- Experimentálně bylo také zjištěno, že μ_P je závislé na teplotě.
- Hodnota μ_P je funkcí měrného tlaku, s rostoucím tlakem jeho hodnota klesá.
- Velikost μ_P je závislé podobně jako koeficient tření f i na relativní rychlosti pohybu tvářeného materiálu po činném povrchu stroje, se vzrůstající rychlostí μ_P mírně klesá.
- Dalšími faktory ovlivňujícími μ_P je chemické složení kovů nebo použití vhodných maziv, s jejichž pomocí lze snížit měrné tlaky. Vliv opracování je také velký a navíc se tření mění v závislosti na směru tečení kovu vůči směru opracování kontaktního povrchu nástroje tzv. anizotropie tření. Ta také ovlivňuje výsledné přetvoření tělesa.

6. ANALÝZA NAPJATOSTI PŘI TAŽENÍ RONDELŮ

Experimentálně získané hodnoty deformací lze použít pro stanovení napětíových poměrů vzniklých při procesu tažení plechového rondelu. Tato kapitola si bere za svůj cíl přiblížit problematiku analýzy těchto napjatostí a nalézt výpočtový (co nejjednodušší) postup určení výsledných hodnot napětí.

Konstrukční prvky plošného charakteru, tj. prvky, u nichž výrazně převládají dva rozměry nad rozměrem třetím (tloušťkou), se obecně dělí na desky a skořepiny. Deskami nazýváme prvky rovinného charakteru (v případě technologie plošného tváření reprezentují tento typ například plechové rondely) a skořepinami prvky prostorově zakřivené (opět v případě plošného tváření může jít například o plechové rondely, tentokrát ovšem zatížené určitou předdeformací). Pro zjednodušení celé problematiky se nyní budeme zabývat již jen deskami, které se ovšem ještě mohou dále dělit na několik podskupin [6, 12, 15].

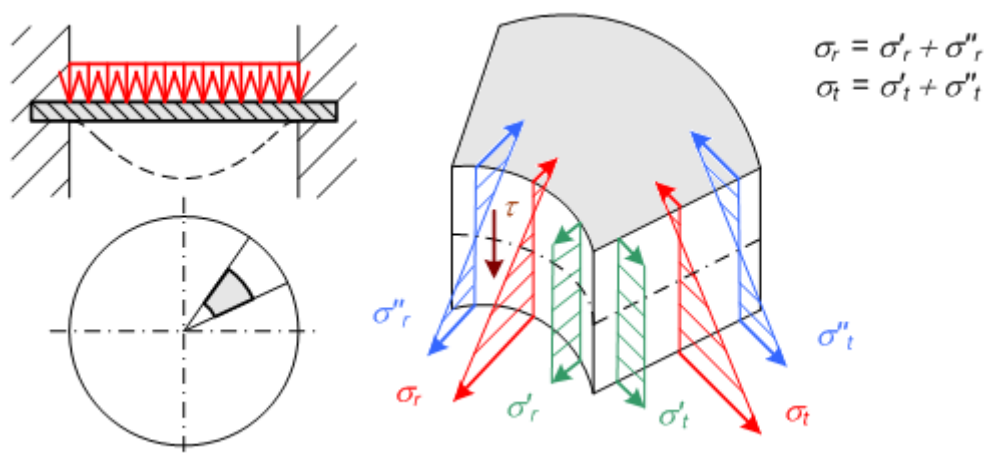
6.1. Rozdělení desek

Deska je tedy (jak již bylo zmíněno v úvodu) konstrukční prvek rovinného charakteru, který je namáhán převážně na ohyb a jehož tloušťka je podstatně menší než zbývající dva rozměry. Desky se dělí do několika skupin, a to zejména dle tvaru a způsobu namáhání.

Dělení dle tvaru se provádí zejména pro určení, zda následný výpočet bude proveden v kartézských či cylindrických souřadnicích. Z tohoto důvodu rozdělujeme desky na tyto tři základní skupiny [6, 15]:

- kruhové,
- obdélníkové,
- obecných tvarů.

Dělení desek dle způsobu namáhání je komplikovanější. Celkové napětí uvnitř desky lze rozdělit na napětí tečná τ (smyková) a normálová σ . Obecně je průběh normálových napětí lineární, avšak neutrální osa není uprostřed tloušťky desky. Normálové napětí (jak radiální σ_r , tak i tečné σ_t) proto můžeme rozložit na dvě složky (jak je patrné z obrázku Obr. 6.1), kde první je po tloušťce desky konstantní (nazýváme ji membránové napětí σ'_r, σ'_t) a druhá má průběh jako při čistém ohybu s nulovou hodnotou uprostřed tloušťky desky (tuto složku nazýváme ohybové napětí σ''_r, σ''_t) [15].



Obr. 6.1: Průběh radiálních a tečných normálových napětí

Veškerá napětí působící na zatíženou desku lze rozdělit tedy na ohybová napětí, která mají za následek pootáčení úsečků nebo i celých průřezů, na membránová, která prodlužují nebo zkracují jednotlivé elementy desky a nakonec zde působí i napětí smyková, způsobující zkosení jednotlivých elementů desky. Podle kombinace jednotlivých napětí můžeme tedy rozdělit desky na následující skupiny [6, 12, 15]:

- tlusté,
- střední tloušťky (tzv. Kirchhoffovy desky),
- tenké (s velkými průhyby),
- membrány.

6.1.1. Desky tlusté

Průhyby těchto desek bývají malé, a proto lze zanedbat prodloužení vláken po deformaci a tím i vliv membránových napětí. Také ohybová napětí jsou velmi malá v důsledku velké tloušťky desek, a proto jsou velikostně srovnatelná se smykovými. Proto u výpočtů těchto desek bereme v potaz právě jen namáhání na ohyb a smyk [15].

6.1.2. Desky střední tloušťky

Ohybové napětí u těchto desek převládá nad smykovým, a proto lze smyk (a jeho důsledek zprohýbání původně přímých kolmic ke střední ploše desky) zanedbat. Při výpočtu se poté vychází s tzv. Kirchhoffovy hypotézy zachování normál [6, 15].

V tomto případě zanedbáváme i membránová napětí, jelikož průhyby nejsou ještě příliš velké a tím nedochází k prodlužování vláken střední plochy desky (tj. plochy půlící v každém místě tloušťku desky). Proto zde uvažujeme pouze namáhání ohybem s lineárním rozložením ohybových napětí po tloušťce desky a s nulovým napětím ve střední ploše desky.

6.1.3. Desky tenké

V tomto případě je vliv smyku ještě nevýraznější než u předchozího typu, a proto můžeme jeho účinky opět zanedbat. Ohybová a membránová napětí zde ovšem hrají významnou roli, neboť dochází k velkým průhybům s délkovými změnami vláken střední plochy, a proto je již nelze zanedbat. Tento typ desek se navíc vyznačuje nelinearitou deformace (respektive napětí) na zatížení a to i přes platnost lineárního Hookova zákona. Jedná se o geometrickou nelinearitu vznikající vlivem velkých deformací (vlivem velkých úhlů pootočení) desky [6, 12, 15].

6.1.4. Membrány

Jsou to vlastně tenké desky, jejichž ohybová tuhost (i ohybové napětí) lze zanedbat, a proto bereme v potaz jen vliv tahového napětí. V důsledku ještě větších deformací než u tenkých desek dochází u nich opět ke geometrické nelinearitě napětí a deformace [15].

6.2. Výpočet desek

Na úvod je třeba říci, že níže popsany postup výpočtu bude vztažen pouze na desky (nikoliv skořepiny) kruhového tvaru, neboť nejlépe aproximují tvar kruhového dosud nedeformovaného (nezatěžovaného) rondelu. Tento tvar desek, jak již bylo zmíněno v kapitole 6.1., bývá řešen nejčastěji v cylindrických souřadnicích (poloha bodu je dána poloměrem x , úhlem ψ a svislou odlehlostí z).

Před započítáním vlastního odvození je velmi důležité nejprve stanovit zjednodušující předpoklady, bez kterých by byl výpočet velmi obtížný, v některých případech i nemožný. Předpokládáme tyto zjednodušující podmínky [6, 12, 15]:

- platí lineární Hookův zákon,
- ve většině případů platí též teorie malých deformací.

Z tohoto plyne, že většina řešení bude lineárních, jen v některých případech, u velkých deformací, budeme nuceni zohlednit nelinearitu řešení. Pro další zjednodušení využijeme toho, že se zde většinou jedná o rotačně symetrické úlohy, kde je vnější zatížení konstantní a spojitě na jednotlivých kružnicích soustředných s deskou (vnější zatížení je funkcí pouze poloměru x nikoliv úhlu ψ). Za tohoto předpokladu platí, že i napětí a deformace jsou rotačně symetrické a tedy jejich velikost se mění jen s jednou proměnnou, a to poloměrem x . Tuto soustavu lze popsat obyčejnými diferenciálními rovnicemi, což velmi zjednodušuje celý následný výpočet. Postup řešení dané úlohy je následující [6, 12, 15].

- V první fázi musíme provést analýzu napětí, tj. na základě známých rozměrů a vnějších zatížení stanovit průběhy a velikosti jednotlivých napětí.
- Současně je nutné stanovit i případné staticky neurčité veličiny (někdy lze ovšem získat výsledky rychleji a to experimentálně, přímým měřením na modelu).
- Nakonec musíme posoudit přípustnost zjištěných napjatostí pro daný materiál (to vyžaduje znalost celé řady pojmů z teorie plasticity, nauky o materiálu a dalších předmětů a oborů).

6.2.1. Desky tlusté

Podrobným popisem výpočtu těchto desek se zde nebudeme zabývat, neboť je poměrně komplikovaný a krom toho je tento model pro popis stavů při tažení tenkého plechového rondelu nevhodný.

6.2.2. Desky střední tloušťky

U tohoto typu, jak již bylo popsáno v kapitole 6.1.2, počítáme převážně s napětím ohybovým a smykové se objeví pouze v rovnici rovnováhy pro směr kolmý k desce, i když se jeho vliv na deformace ve výsledku neuvažuje.

Vlivem zjednodušujících a omezujících faktorů se deska (střední tloušťky) ve výsledku deformuje tak, že válcové řezy původně souosé s deskou se přemění deformací na řezy kuželové. Ani tento typ desek se příliš nehodí pro modelování procesu tažení tenkých plechů a proto není třeba dále podrobně popisovat postup výpočtu. Za desky střední tloušťky se tedy považují takové, které splňují následující podmínky [12, 15].

- Tloušťka vztažená na poloměr desky se pohybuje v mezích 1/5 až 1/10 a zároveň jejich průhyb není příliš velký.
- Platí Hookův lineární zákon.
- Střední plocha těchto desek (s nulovým ohybovým napětím - zanedbáváme membránová napětí) se deformuje tak, že její body se posouvají pouze svisle, ne však radiálně.
- Úsečky zůstávají přímé a kolmé na střední plochu (neutrální plochu) i po deformaci = Kirchhoffova hypotéza (hypotéza platí, neboť zanedbáváme smyková napětí = lineární rozložení deformací a napětí po tloušťce desky).
- Při vyjádření rovinných posuvů lze zanedbat normálové napětí kolmé na střední plochu desky, neboť je mnohem menší než ostatní napětí = lze využít vztahů pro rovinnou napjatost.

6.2.3. Desky tenké

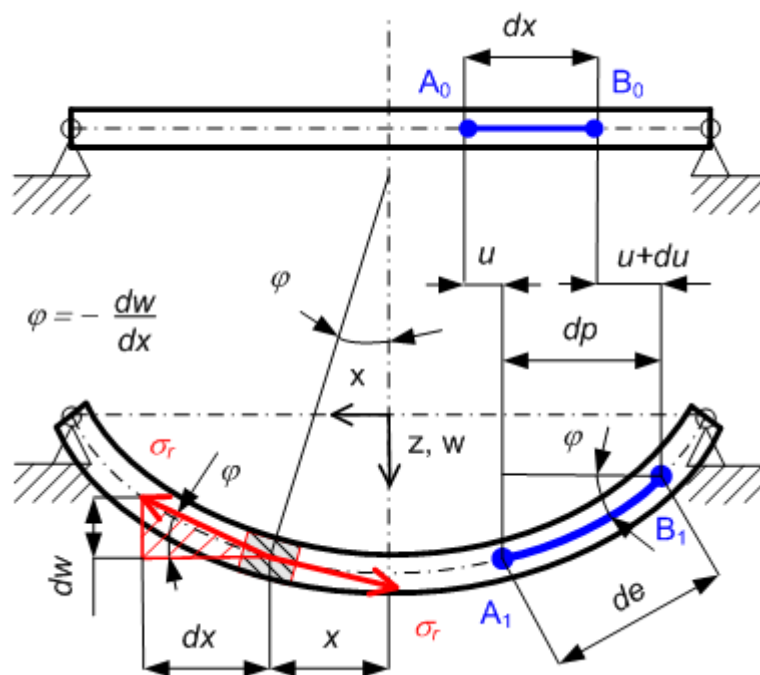
Nyní se podrobněji zaměřím na postup výpočtu tenkých desek, neboť tento typ ze všech nejlépe popisuje podmínky, které nastávají při tažení kruhových rondelů. Vliv velkých průhybů, a tedy i velkých úhlů pootočení, se při výpočtu projeví. Nejprve se v rovnici rovnováhy pro svislý směr osy z objeví i složky těch napětí, která u Kirchhoffovy desky ležela pouze v rovině desky a dále zde již není lineární závislost mezi vnějším zatížením, napětím a průhybem [15].

a) Odvození základních vztahů

Vlivem rotační symetrie úlohy má poměrné prodloužení v tečném směru ε_t tvar dle vztahu (6.1), kde u je posuv zvoleného bodu ve směru osy x vlivem zatížení desky [6, 15].

$$\varepsilon_t = \frac{u}{x} [-] \quad (6.1)$$

U poměrného prodloužení ve směru radiálním ε_r je odvození poněkud komplikovanější. Nejprve uvažujeme element desky před deformací označený A_0B_0 s délkou dx , který bude mít po deformaci polohu A_1B_1 a velikost de , jak je naznačeno na obrázku Obr. 6.2 [12, 15].



Obr. 6.2: Deformace desky

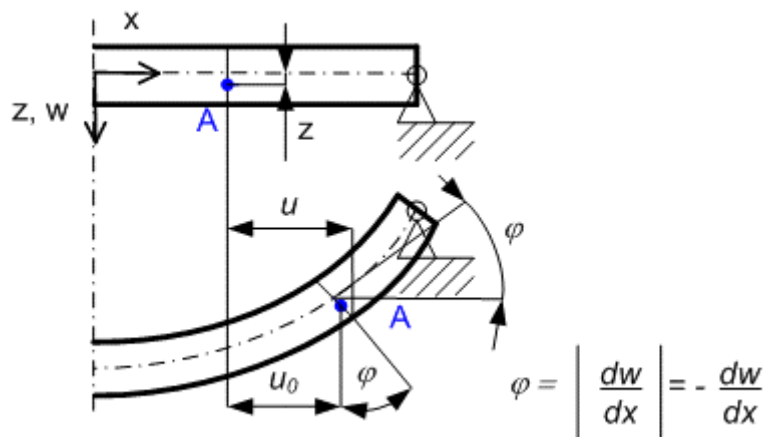
S použitím obrázku lze odvodit radiální poměrné prodloužení ε_r ve tvaru (6.2) [6, 15].

$$\varepsilon_r = \frac{de - dx}{dx} = \frac{\frac{dp}{\cos \varphi} - dx}{dx} = \frac{\frac{dx + du}{\cos \varphi} - dx}{dx} = \left(1 + \frac{du}{dx}\right) \cdot \frac{1}{\cos \varphi} - 1 \quad [-] \quad (6.2)$$

Tento vztah lze zjednodušit použitím trigonometrického vzorce a binomického rozvoje (se zanedbáním členů rozvoje s vyššími mocninami, neboť jsou úhly sklonu malé). Dále můžeme roznásobit vzniklé členy a zanedbat ty, které obsahují násobky tří a více derivací (násobení malých čísel dá ve výsledku ještě menší číslo). Po těchto úpravách dostaneme původní rovnici (6.2) zjednodušenou na tvar (6.3) [15].

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dx} + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{dw}{dx}\right)^2 \quad [-] \quad (6.3)$$

Ze vztahu je patrná jeho nelineárnost a navíc je poměrné prodloužení v radiálním směru funkcí nejen posuvu u , ale i průhybu desky w . Tento vztah lze dále přepsat použitím úpravy (6.4), jejíž odvození je naznačeno schematicky na obrázku Obr. 6.3 [15].



Obr. 6.3: Definice posuvu

$$u = u_0 + z \cdot \varphi = u_0 - z \cdot \frac{dw}{dx} \quad [\text{mm}] \quad (6.4)$$

Získané vztahy pro tečné a radiální poměrné prodloužení (6.5) jsou pro názornost uvedeny spolu [15].

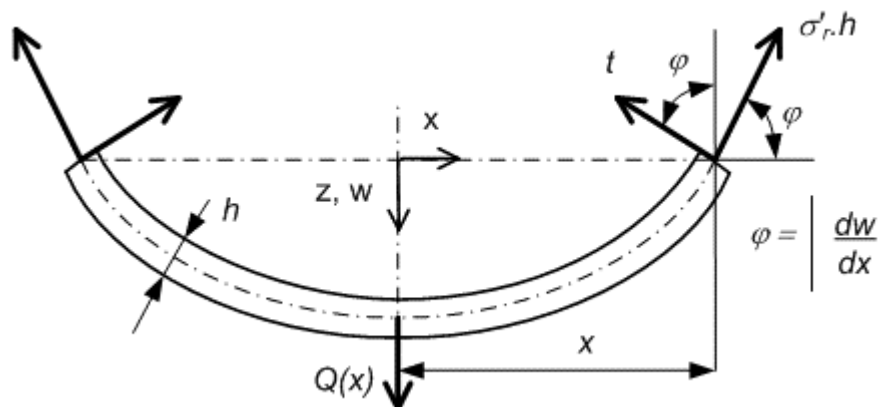
$$\begin{aligned} \varepsilon_t &= \frac{u_0}{x} - \frac{z}{x} \cdot \frac{dw}{dx} \\ \varepsilon_r &= \frac{du_0}{dx} - z \cdot \frac{d^2w}{dx^2} + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 \end{aligned} \quad [-] \quad (6.5)$$

Pokud vyjádříme tečné a radiální napětí v závislosti na deformaci pomocí známých vztahů (6.6) a do těchto rovnic dosadíme námi zjištěné vztahy (6.5), získáme výsledné rovnice tečného a radiálního napětí (6.7) [6, 15].

$$\begin{aligned} \sigma_t &= \frac{E}{1-\mu^2} \cdot (\varepsilon_t + \mu \cdot \varepsilon_r) \\ \sigma_r &= \frac{E}{1-\mu^2} \cdot (\varepsilon_r + \mu \cdot \varepsilon_t) \end{aligned} \quad [\text{MPa}] \quad (6.6)$$

$$\begin{aligned} \sigma_t &= \frac{E}{1-\mu^2} \cdot \left[\frac{u_0}{x} + \mu \cdot \frac{du_0}{dx} + \frac{\mu}{2} \cdot \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 \right] - z \cdot \frac{E}{1-\mu^2} \cdot \left[\frac{1}{x} \cdot \frac{dw}{dx} + \mu \cdot \frac{d^2w}{dx^2} \right] \\ \sigma_r &= \frac{E}{1-\mu^2} \cdot \left[\frac{du_0}{dx} + \mu \cdot \frac{u_0}{x} + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 \right] - z \cdot \frac{E}{1-\mu^2} \cdot \left[\frac{\mu}{x} \cdot \frac{dw}{dx} + \frac{d^2w}{dx^2} \right] \end{aligned} \quad [\text{MPa}] \quad (6.7)$$

Tyto vztahy jasně ukazují rozložení obou napětí na membránové (konstantní po celé tloušťce desky), které je dáno první částí výrazů a na napětí ohybové (lineárně závislé na souřadnici z), které charakterizuje druhá část vzorců [15].



Obr. 6.3: Výsledné odvození

Odvození diferenciální rovnice tenké kruhové desky provedeme za pomoci obrázku Obr. 6.3. Z prohnuté desky vytkneme část o poloměru x a napíšeme pro ni složkovou rovnici pro směr z . Výslednici vnějšího zatížení označíme $Q(x)$, posouvající sílu vztaženou na jednotku délky označíme t a na ni působící membránové napětí v radiálním směru σ'_r , které vyvodí na jednotku délky sílu $\sigma'_r \cdot h$ (kde h je celková tloušťka desky). Ohybové napětí má v tomto případě nulovou výslednici a v rovnici rovnováhy tedy chybí. Úhel sklonu φ již není zanedbatelný, ale stále je velmi malý, a proto pro něj můžeme psát zjednodušující rovnici ve tvaru (6.8) [15].

$$\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi \approx \varphi = -\frac{dw}{dx} = \left| \frac{dw}{dx} \right|, \cos \varphi \approx 1 \quad (6.8)$$

Jelikož průhyb s rostoucím x klesá, takže platí podmínka $dw/dx < 0$, je nutno psát při odstraňování absolutní hodnoty znaménko mínus. Hledaná rovnice rovnováhy pro svislý směr má tedy po úpravách tvar (6.9) [15].

$$Q(x) = t \cdot 2 \cdot \pi \cdot x - \sigma'_r \cdot h \cdot 2 \cdot \pi \cdot x \cdot \frac{dw}{dx} \quad [\text{N}] \quad (6.9)$$

Posouvající sílu t lze dále vyjádřit z Kirchhoffovy teorie pro desky střední tloušťky, a to z momentové rovnice rovnováhy, neboť tato rovnice platí i zde. Jednotlivé ohybové momenty se vyjádří pouze z ohybových napětí, a tak má výsledný upravený vztah tvar dle rovnice (6.10) [15].

$$t = D \cdot \frac{d}{dx} \left[\frac{1}{x} \cdot \frac{d}{dx} \left(x \cdot \frac{dw}{dx} \right) \right] \text{ [N]} \quad (6.10)$$

Dále musíme zavést funkci napětí $F(x)$, jejímiž derivacemi jsou definována membránová napětí dle vztahu (6.11). Po sloučení vztahů (6.9), (6.10) a (6.11) dostaneme výslednou rovnici (6.12) [15].

$$\begin{aligned} \sigma_r' &= \frac{1}{x} \cdot \frac{dF}{dx} \text{ [MPa]} \\ \sigma_t' &= \frac{d^2 F}{dx^2} \end{aligned} \quad (6.11)$$

$$D \cdot \frac{d}{dx} \left[\frac{1}{x} \cdot \frac{d}{dx} \left(x \cdot \frac{dw}{dx} \right) \right] = \frac{Q(x)}{2 \cdot \pi \cdot x} + \frac{h}{x} \cdot \frac{dF}{dx} \cdot \frac{dw}{dx} \quad (6.12)$$

Tato rovnice rovnováhy pro výsledné řešení nestačí, neboť opět obsahuje dvě neznámé veličiny závislé na x , a to průhyb $w(x)$ a napětí $F(x)$. Proto musíme použít ještě jednu rovnici, a to rovnici kompatibility. Získáme ji z rovnice pro střední plochu desky, kde působí jen membránové napětí (použijeme vztahu pro tečné poměrné prodloužení $u = x \cdot \varepsilon_t$). Vztah pro radiální poměrné prodloužení bude potom ve tvaru (6.13) [15].

$$\varepsilon_r = \varepsilon_t + x \cdot \frac{d\varepsilon_t}{dx} + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 \text{ [-]} \quad (6.13)$$

Obecná vyjádření poměrných prodloužení střední plochy desky popisuje Hookův zákon. Po dosazení příslušných derivací získáme vztah (6.14) [15].

$$\begin{aligned}\varepsilon_r &= \frac{1}{E} \cdot \left(\frac{1}{x} \cdot \frac{dF}{dx} - \mu \cdot \frac{d^2 F}{dx^2} \right) \\ \varepsilon_t &= \frac{1}{E} \cdot \left(\frac{d^2 F}{dx^2} - \frac{\mu}{x} \cdot \frac{dF}{dx} \right)\end{aligned} \quad [-] \quad (6.14)$$

Sloučením vztahů (6.13) a (6.14) vznikne po úpravách výsledná chybějící rovnice kompatibility ve tvaru (6.15) [15].

$$\frac{d}{dx} \left[\frac{1}{x} \cdot \frac{d}{dx} \left(x \cdot \frac{dF}{dx} \right) \right] = - \frac{E}{2 \cdot x} \cdot \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 \quad (6.15)$$

Nyní již teoreticky můžeme řešit soustavu dvou rovnic (6.12) a (6.15) o dvou neznámých, ovšem řešení je velmi složité. Pro určení membránových napětí můžeme použít rovnic (6.11), pro napětí ohybová vyjdeme ze vztahů (6.7), kde jsou tato napětí dána druhými členy vzorců. Pokud chceme kupříkladu vyjádřit ohybová napětí na spodní ploše desky, mají potom vztahy tvar (6.16). Koeficient E^* se potom nazývá zpevněný modul pružnosti a je vyjádřen zlomkem (6.17) [15].

$$\begin{aligned}\sigma_t'' &= - \frac{E^* \cdot h}{2} \cdot \left(\frac{1}{x} \cdot \frac{dw}{dx} + \mu \cdot \frac{d^2 w}{dx^2} \right) \\ \sigma_r'' &= - \frac{E^* \cdot h}{2} \cdot \left(\frac{\mu}{x} \cdot \frac{dw}{dx} + \frac{d^2 w}{dx^2} \right)\end{aligned} \quad [\text{MPa}] \quad (6.16)$$

$$E^* = \frac{E}{1 - \mu^2} \quad [\text{MPa}] \quad (6.17)$$

Soustava rovnic (6.12), (6.15) má univerzální použití, neboť zohledňuje jak membránová napětí, tak i velké deformace a lze z ní odvodit Kirchhoffovu rovnici desek i rovnice dokonale ohebných pružných membrán. Jelikož byly tyto rovnice odvozeny právě z Kirchhoffovy hypotézy zachování přímých normál, nelze je již použít pro výpočet tlustých desek [15].

Pokud bychom chtěli získat rovnice pro dokonale ohebné pružné membrány, musíme položit ohybovou tuhost D rovnu nule. Tím získáme soustavu rovnic ve tvaru (6.18) [15].

$$0 = \frac{Q(x)}{2 \cdot \pi \cdot x} + \frac{h}{x} \cdot \frac{dF}{dx} \cdot \frac{dw}{dx}$$
$$\frac{d}{dx} \left[\frac{1}{x} \cdot \frac{d}{dx} \left(x \cdot \frac{dF}{dx} \right) \right] = - \frac{E}{2 \cdot x} \cdot \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 \quad (6.18)$$

b) Stanovení okrajových podmínek

Pro správné vyřešení soustavy rovnic, získané v předchozí kapitole, je nezbytné zavést okrajové podmínky. Opět i v tomto případě uvažujeme kruhovou rotačně symetrickou tenkou desku o poloměru r a tloušťce h . Okrajové podmínky se liší pro různé typy desek, a proto zde uvedu některé základní případy [6, 15].

- **deska bez otvoru**

Ve středu desky je nulový úhel pootočení. Pro $x = 0$ tedy platí podmínka $\left(\frac{dw}{dx} \right)_{x=0} = 0$.

- **okraj desky je podepřen**

Na okraji desky (poloměr r) je nulový průhyb a tedy platí $x = r$, $w(r) = 0$.

- **okraj desky je vetknut**

Na vetknutém okraji desky o poloměru r je pro $x = r$ nulový průhyb $w(r) = 0$ a nulový úhel pootočení $\left(\frac{dw}{dx} \right)_{x=r} = 0$.

- **okraj desky je volně posuvný**

U podepřeného i vetknutého konce uloženého posuvně je nulové radiální membránové napětí.

Pro $x = r$ tedy platí $\sigma'_r(r) = 0$ a $\left(\frac{dF}{dx} \right)_{x=r} = 0$.

- **okraj desky je neposuvný**

Deska s podepřeným nebo i vetknutým koncem uložená neposuvně vykazuje nulový radiální posuv ve střední ploše tj. pro $x = r$ platí $\Delta r = 0$ a lze tedy psát vztah (6.19) [15].

$$\frac{\Delta r}{r} = \varepsilon_t = \frac{1}{E} \cdot (\sigma'_t - \mu \cdot \sigma'_r)_{x=r} = 0 \quad (6.19)$$

Po dosazení za membránová napětí dostaneme okrajovou podmínku ve tvaru (6.20) [15].

$$\left(\frac{d^2 F}{dx^2} - \frac{\mu}{x} \cdot \frac{dF}{dx} \right)_{x=r} = 0 \quad (6.20)$$

c) Postup řešení

Jelikož je výsledná soustava rovnic (6.12), (6.15) poměrně komplikovaná, bývá často pro jejich zjednodušení použita některá z přibližných metod řešení. Zde nyní uvádím zjednodušený postup řešení Galerkinovou metodou.

Při její aplikaci má původní obecná diferenciální rovnice tvar $L(x, w) = 0$. Odhadneme její pravděpodobné řešení $w(x)$, které obsahuje některé neznámé parametry a vyhovuje okrajovým podmínkám. Neznámé parametry následně určíme z podmínky, že $L(x)$ a $w(x)$ jsou v celé oblasti, pro niž provádíme řešení, ortogonální funkce a tudíž pro ně platí rovnice (6.21), kde integrační mez S je oblast řešené desky [15].

$$\iint_S L(x, w) \cdot w(x) \cdot dx = 0 \quad (6.21)$$

Po úpravách této rovnice pro konkrétní případ a užitím vztahů (6.12) a (6.15) dostaneme výsledné řešení. V technické praxi nás nejvíce zajímají hodnoty napětí uprostřed a na obvodě desky a velikost maximálního průhybu. Z tohoto důvodu zde nyní uvedu zjednodušené univerzální vztahy, odvozené ze zmíněných rovnic pro výpočet hledaných parametrů.

- **membránová napětí**

Hodnoty radiálního a tečného membránového napětí ve středu ($x = 0$) a na okraji desky ($x = r$) zjistíme ze vztahů (6.22). Vztahy jsou v bezrozměrném tvaru, kde S je konstanta, jejíž hodnoty jsou pro různé případy zatížení a uložení desek uvedeny v tabulce Tab. 6.1 (hodnoty platí pro Poissonovo číslo $\mu = 0,3$) [15].

$$\begin{aligned} \frac{\sigma'_r \cdot r^2}{E \cdot h^2} &= S \cdot \left(\frac{w}{h} \right)^2 \\ \frac{\sigma'_t \cdot r^2}{E \cdot h^2} &= S \cdot \left(\frac{w}{h} \right)^2 \end{aligned} \quad (6.22)$$

Tab. 6.1: Výpočtové konstanty $|R|$, S

Konstanta	Typ zatížení	Uložení		Působíště zatížení		
				Uprostřed	Na obvodě	
					Radiálně	Tečně
$ R $	Spojitě rovnoměrné	Vetknutí	Neposuvné	2,86	4,4	1,32
			Posuvné	2,86	4,4	1,32
		Podepření	Neposuvné	1,778	0	0,755
			Posuvné	1,778	0	0,755
	Osamělá síla uprostřed	Vetknutí	Neposuvné	-	2,198	0,659
			Posuvné	-	2,198	0,659
		Podepření	Neposuvné	-	0	0,606
			Posuvné	-	0	0,606
S	Spojitě rovnoměrné	Vetknutí	Neposuvné	0,976	0,476	0,143
			Posuvné	0,5	0	-0,333
		Podepření	Neposuvné	0,905	0,61	0,183
			Posuvné	0,295	0	-0,427
	Osamělá síla uprostřed	Vetknutí	Neposuvné	1,232	0,357	0,107
			Posuvné	0,875	0	-0,25
		Podepření	Neposuvné	0,895	0,488	0,147
			Posuvné	0,407	0	-0,341

- ohybová napětí**

Obdobně jako v předchozím případě dostaneme hodnoty radiálního a tečného ohybového napětí ve středu ($x = 0$) a na okraji desky ($x = r$) ze vztahů (6.23). Absolutní hodnoty bezrozměrné konstanty $|R|$ jsou opět pro různé případy zatížení a uložení desek uvedeny v tabulce Tab. 6.1 (hodnoty platí pro $\mu = 0,3$). Výslednou korekcí znaménka můžeme zdůraznit, zda jsme počítali napětí na horní nebo spodní straně desky [15].

$$\frac{\sigma_r'' \cdot r^2}{E \cdot h^2} = |R| \cdot \left(\frac{w}{h} \right) \quad (6.23)$$

$$\frac{\sigma_t'' \cdot r^2}{E \cdot h^2} = |R| \cdot \left(\frac{w}{h} \right)$$

• **maximální průhyb**

Pro všechny možné případy uložení a zatížení tenké desky lze psát výslednou rovnici maximálního průhybu ve tvaru (6.24) [15].

$$\nu + K \cdot \nu^3 = L \cdot \Pi \quad (6.24)$$

Tento vztah plně platí u velkých průhybů, pro malé průhyby lze psát rovnici ve zjednodušeném lineárním tvaru kde $\nu^3 = \nu$. Bezrozměrné konstanty K , L jsou zpracovány pro různé způsoby zatížení a uložení desky v tabulce Tab. 6.2 (hodnoty platí pro $\mu = 0,3$) [15].

Tab. 6.2: Výpočtové konstanty K , L

Konstanta	Typ zatížení	Uložení		Působíště zatížení	
				Uprostřed	Na obvodě
					Radiálně Tečně
K	Spojitě rovnoměrné	Vetknutí	Neposuvné	0,528	
			Posuvné	0,146	
		Podepření	Neposuvné	1,852	
			Posuvné	0,262	
	Osamělá síla uprostřed	Vetknutí	Neposuvné	0,443	
			Posuvné	0,2	
		Podepření	Neposuvné	1,43	
			Posuvné	0,272	
L	Spojitě rovnoměrné	Vetknutí	Neposuvné	0,171	
			Posuvné	0,171	
		Podepření	Neposuvné	0,696	
			Posuvné	0,696	
	Osamělá síla uprostřed	Vetknutí	Neposuvné	0,217	
			Posuvné	0,217	
		Podepření	Neposuvné	0,552	
			Posuvné	0,552	

Součinitel ν se nazývá bezrozměrný průhyb a je dán vztahem (6.25), součinitel Π je bezrozměrné zatížení (Π_1 pro spojitě zatížení a Π_2 pro zatížení osamělou silou uprostřed desky) a lze jej zjistit ze vztahů (6.26) [15].

$$\nu = \frac{w}{h} \quad (6.25)$$

$$\Pi_1 = \frac{q \cdot r^4}{E \cdot h^4}, \Pi_2 = \frac{F \cdot r^2}{E \cdot h^4} \quad (6.26)$$

6.2.4. Membrány

Membrány též někdy bývají nazývány absolutně ohebnými deskami (deskami s nulovou ohybovou tuhostí D). Tato tuhost je popsána vztahem (6.27) [15].

$$D = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)} = 0 \quad (6.27)$$

Problém dokonale ohebné pružné membrány popisovala již upravená soustava rovnic (6.18). Z řešení této soustavy dostaneme výsledné vztahy, s univerzálními konstantami, pro maximální průhyb (6.28) a jednotlivá napětí (6.29) a (6.30). Vzorci platí pro $\mu = 0,3$ [15].

$$\left(\frac{w}{h}\right)^3 = 0,28 \cdot \frac{q \cdot r^4}{E \cdot h^4} \quad (6.28)$$

Napětí uprostřed membrány pro $x = 0$ je dáno vztahem (6.29) [15].

$$\frac{\sigma(0) \cdot r^2}{E \cdot h^2} = 1,01 \cdot \left(\frac{w}{h}\right)^2 \quad (6.29)$$

Tečné a radiální napětí na obvodě membrány pro $x = r$ je dáno vztahy (6.30) [15].

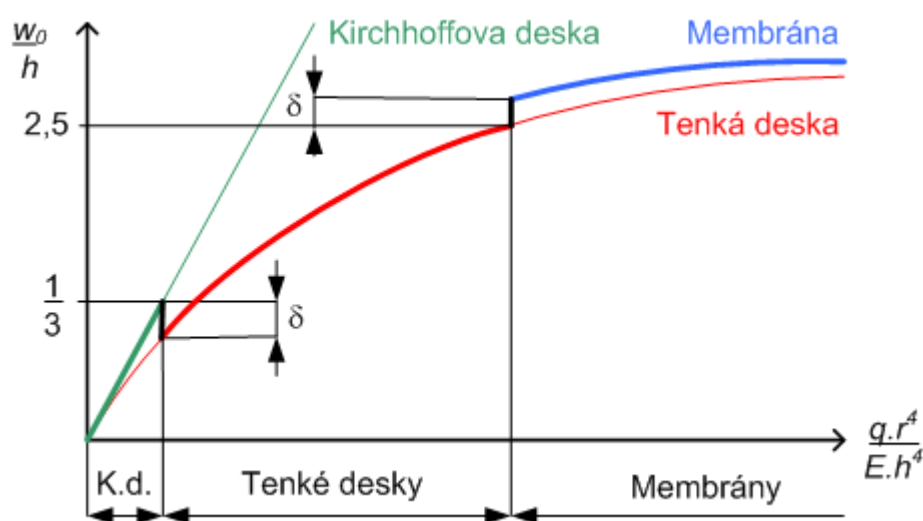
$$\begin{aligned} \frac{\sigma_t(r) \cdot r^2}{E \cdot h^2} &= 0,285 \cdot \left(\frac{w}{h}\right)^2 \\ \frac{\sigma_r(r) \cdot r^2}{E \cdot h^2} &= 0,783 \cdot \left(\frac{w}{h}\right)^2 \end{aligned} \quad (6.30)$$

Jelikož hovoříme o membránách, je tedy napětí působící v tělese pouze membránové a ohyb je zanedbatelně malý.

6.3. Oblast použitelnosti jednotlivých modelů

Každý z výpočtových modelů uvedených v předchozích kapitolách (model Kirchhoffovy desky, tenké desky a membrány) má samozřejmě svoji omezenou platnost. Aby při výpočtu nevznikly příliš velké chyby, je nutné stanovit meze platnosti jednotlivých teorií.

Pro názornost byl sestaven obecný diagram Obr. 6.5, kde je graficky naznačena závislost bezrozměrného průhybu w_0/h na bezrozměrném zatížení $q \cdot r^4 / E \cdot h^4$ pro všechny tři zmiňované modely [15].



Obr. 6.5: Porovnání jednotlivých modelů

Jak je patrné z obrázku, při malých bezrozměrných průhybech lze použít model Kirchhoffovy desky či tenké desky, při velmi velkých průhybech již Kirchhoffův model neplatí, a proto můžeme použít zbývající dva (tenkou desku a membránu). Z obrázku tedy plyne, že nejuniverzálnější použití má model tenké desky. Je to logické, neboť jako jediný z těchto tří modelů zohledňuje vliv ohybových i membránových napětí a současně i velké úhly pootočení. Zjištění přípustné chyby δ jednotlivých modelů je velmi snadné a je naznačeno taktéž na obrázku Obr. 6.5. Pokud chceme, aby tato chyba byla co nejmenší a nepřesáhla statisticky významnou hodnotu 5%, neměli bychom Kirchhoffovu teorii desek použít pro větší bezrozměrný průhyb než je uvedeno ve vztahu (6.31). Použitelnost Kirchhoffovy teorie závisí na velikosti maximálního průhybu vztaženého na tloušťku desky. Hodnota průhybu je funkcí velikosti zatížení, a proto může být někdy deska zařazena jak mezi desky tenké, tak i Kirchhoffovy [15].

$$\left(\frac{w}{h}\right) < \frac{1}{3} \quad (6.31)$$

Obdobně lze stanovit i empirický vztah pro hranici platnosti mezi teorií tenkých desek a teorií membrán. Při opětovném zavedení maximální přípustné chyby průhybu 5% lze použít teorii membrán pro větší bezrozměrný průhyb než je uvedeno ve vztahu (6.32) [15].

$$\left(\frac{w}{h}\right) > 2,5 \quad (6.32)$$

V tomto případě bude ovšem chyba napětí větší než zmiňovaných 5% a pro její snížení bychom musely posunout hranici platnosti teorie k vyšším hodnotám průhybů. Tím by mohl nastat případ, kdy napětí překročí mez kluzu a nastanou plastické deformace. V tomto případě již nemůže platit teorie membrán, která nezohledňuje ohybová napětí [15].

6.4. Obecné případy kruhových desek

Dosud jsme se v předchozích kapitolách zabývali deskami (membránami) kruhového rovinného tvaru. V technické praxi se ovšem vyskytují i desky odlišných tvarů. Mohou to být například desky proměnné tloušťky či nerovinného charakteru (desky vyklenuté). V případě druhém se již vlastně nejedná o desky, ale o velmi ploché skořepiny, jak bylo zmíněno v úvodu kapitoly 6.1. Při malém vyklenutí lze tyto skořepiny nahradit modelem tzv. desek s počátečním zakřivením, což velmi zjednoduší výpočet a nevzniknou tím velké chyby [15].

6.5. Výsledné zhodnocení

V souvislosti s poznatky získanými v předchozích kapitolách (zejména kapitole 6.3) lze říci o postupu zjištění hodnot napětí zhruba toto. Při zohlednění všech zjednodušujících předpokladů (platných zejména pro Kirchhoffův model) a malých deformacích zkušebních rondelů (přechodová oblast elastických a plastických deformací) je možno použít pro zjištění požadovaných napěťových hodnot výpočtový model (nejlépe) pro tenké desky.

V experimentální části disertační práce (kapitola 9.4.) je poté proveden modelový výpočet průhybu vzorku v závislosti na zátěžné síle, dle postupu z kapitoly 6.2.3.

7. CÍLE EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI

Tato disertační práce navazuje ve své experimentální části na řadu měření, která byla a jsou prováděna v dílnách a laboratořích Katedry strojírenské technologie. Byly kupříkladu uskutečněny následující projekty [2, 5, 9].

- Sestavení a odzkoušení pneumatického přípravku pro zjištění DMP za rychlostí čelní bariérové zkoušky.
- Měření deformací plechových vzorků tenzometry.
- Optické měření dopadové rychlosti tažníku jednou a dvěma kamerami.
- Provedení různého stupně předdeformací vzorků.
- Počítačové simulace proběhlých dějů.
- Rychlostní zkoušky materiálů: DX53, H(180,220,300)BD, CP-W 800 a RA-K 40/70.

V návaznosti na proběhlé experimenty si tato práce vzala za svůj cíl poznat a následně popsat vlastnosti zvoleného vysokopevnostního materiálu při zkouškách tváření za studena a tím tak přispět k hlubšímu poznání chování tohoto materiálu za zvolených podmínek. Materiál je následně hodnocen zejména ve vztahu k rychlosti deformace zkušebního dílu. Rozmezí hodnot zkoušených rychlostí je velké a umožňuje tak co nejkomplexnější pohled na chování zkoušeného materiálu za různých podmínek zatěžování. Předkládaná disertační práce je tedy, v souladu s předchozím textem, zaměřena ve své experimentální části zejména na tyto následující body:

- Zjištění vlivu rychlosti zatěžování na strukturu vysokopevnostního materiálu, průběh zkoušky tahem a výsledné mechanické hodnoty.
- Zhotovení diagramů mezních přetvoření při různých rychlostech deformací a naznačení výpočtu silových poměrů na modelovém příkladu kruhové desky.
- Komplexní pohled na problematiku lisovatelnosti vysokopevnostních materiálů za studena (se zaměřením na zvolený materiál) a popis vlivu vysokých deformačních rychlostí na chování těchto materiálů.

8. CHARAKTERISTIKA ZKOUŠENÉHO MATERIÁLU

Základním rozdělením materiálů používaných v dnešní době pro výrobu karosérie osobních automobilů se blíže zabývala kapitola 3.1. v teoretické části disertační práce. Tato kapitola představuje již specifikaci konkrétního materiálu zvoleného pro experimentální měření. Disertační práce sleduje chování pevnostních materiálů při tváření za studena. Vzhledem k tomuto omezení nebo spíše právě proto byla zvolena skupina vysokopevnostních materiálů, jejichž mechanické vlastnosti (blíže viz následující kapitoly 8.1. a 8.2.) je řadí na samou hranici použitelnosti při tváření za studena a je tedy velmi zajímavé zkoumat jejich chování za těchto podmínek. Dále bylo také při volbě zohledněno, zda je v současné době materiál zaveden ve výrobě a tedy zda mohou být naměřená data okamžitě využita ve výrobním procesu. Na výběr bylo několik vysokopevnostních materiálů s různými vlastnostmi, z nichž byl nakonec po odborné rozpravě s představiteli automobilového průmyslu a zvážení všech uvedených faktorů vybrán jeden materiál s následujícím označením od výrobce:

- Docol 1200M.

8.1. Údaje výrobce

V této kapitole, zabývající se charakteristikou zvoleného pevnostního materiálu, předkládám základní popis tohoto materiálu uváděný jeho výrobcem s bližší specifikací jeho základních (zaručených) mechanických hodnot.

8.1.1. Obecná charakteristika materiálů typu Docol

Docol je obchodní název za studena válcovaného plechu švédské firmy SSAB Swedish Steel. Materiály typu Docol zahrnují všechny druhy ocelí od nízkouhlíkových, určených pro běžné technologie lisování a ohýbání, až po pevnostní a ultra vysokopevnostní oceli. Tyto materiály můžeme také dále dělit na martenzitické oceli válcované za studena (příklad označení Docol 1200M) a martenzitické oceli válcované za studena pozinkované (příklad označení Docol 1200M+ZE). Použitím pevnostních ocelí, místo ocelí běžných pevností, získáme úsporu hmotnosti konstrukce, velmi vysokou pevnost karosérie, zvýšenou bezpečnost, vyšší životnost dílů, zvýšené užitečné zatížení nebo úsporu celkových nákladů [30].

Pevnostní a ultrapevnostní materiály typu Docol mají velký rozsah využití v různých technických oborech a používají se pro řadu aplikací, například na bezpečnostní součásti automobilové karosérie (jak je ukázáno na obrázku Obr. 8.1), elektrické a horkovodní radiátory, chladiče, kontejnery, pružiny, podložky nebo na spojkové lamely [30].

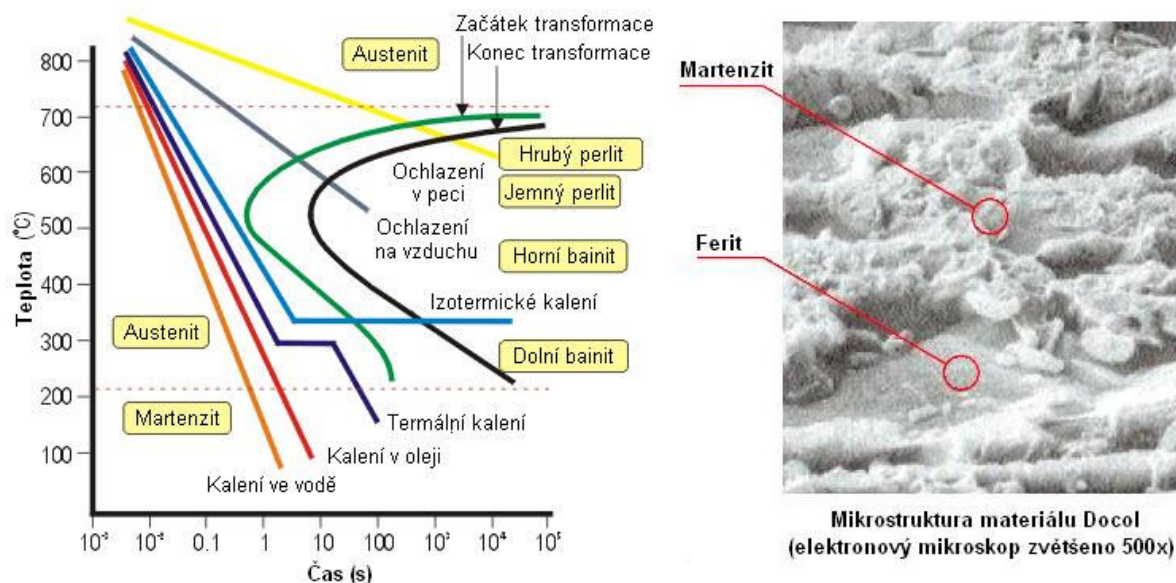


Obr. 8.1: Příklady výrobků zhotovených z materiálu Docol

Jak již bylo řečeno, oceli značky Docol jsou k dispozici v široké škále pevností vhodných pro různé aplikace. Oceli vyšších pevností mají větší potenciál pro úsporu hmotnosti (tato úspora může být více než 40% při zachování hodnoty pevnosti), avšak s rostoucí pevností materiálu se obecně také snižuje jeho tvárnost. Volba vhodného materiálu pro daný výrobek tedy závisí na kombinaci požadované pevnosti, tvárnosti a velikosti nákladů. Úspora hmotnosti je důležitým hlediskem, zvláště v automobilovém průmyslu. Vysokopevnostní oceli nám poskytují obrovskou příležitost k úspoře hmotnosti vzorků. Tvárnutí pevnějších materiálů vyžaduje více energie, což je částečně kompenzováno tenčím vzorkem.

8.1.2. Zvolený materiál Docol 1200M

Materiál Docol 1200 stupně M je martenzitická ocel vyráběná válcováním za studena s použitím speciálního tepelného zpracování na kontinuální žíhací lince. Jeho vysoká pevnost je vytvořena extrémně rychlým vodním ochlazením z vysoké austenitické teploty. Tento pevnostní materiál je charakterizován poměrně dobrou tvárností při extrémně vysoké hodnotě pevnosti a dobrou svařitelností. Lze použít všechny běžné metody svařování s přihlédnutím k chemickému složení této oceli. Vznik martenzitické struktury a její detail pořízený elektronovým mikroskopem s dobře patrnými jednotlivými fázemi je znázorněn na obrázku Obr. 8.2 [30].



Obr. 8.2: Způsob vzniku martenzitické struktury a její detail

a) Základní materiálové hodnoty Docolu 1200M

Plechý z materiálu Docol 1200M jsou vyráběny v šířkách 800-1500 mm a tloušťkách 0,5-2,0 mm. Materiál Docol 1200M je dodáván v tolerancích dle evropské normy EN 10 131. Materiálové vlastnosti jsou pochopitelně proměnné jak svitek od svitku, tak i uvnitř vlastního svitku. Firma SSAB Swedish Steel zaručuje pouze takové materiálové hodnoty, které jsou uvedené v materiálovém listě. Takovými typickými hodnotami jsou například minimální mez kluzu, minimální mez pevnosti v tahu a tažnost. Základní parametry zvoleného materiálu jsou přehledně zpracovány v následující tabulce Tab. 8.1 [30].

Tab. 8.1: Materiálové hodnoty udávané výrobcem pro Docol 1200M

Chemické složení	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Nb %	Al %
	0,110	0,200	1,600	0,015	0,002	0,015	0,040
Mechanické hodnoty	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]			950 min - (1200 max)			
	Mez kluzu po BH efektu $R_{p0,2}$ [MPa]			1150 min			
	Mez pevnosti R_m [MPa]			1200 min - (1400 max)			
	Tažnost $A_{80 \text{ mm}}$ [%]			4 min			

Pro porovnání uvádím tabulku Tab. 8.2 materiálových hodnot oceli MS-W 1200 firmy Thyssen Krupp Steel. Je patrné, že dostupné hodnoty si jsou velmi podobné [32].

Tab. 8.2: Materiálové hodnoty udávané výrobcem pro MS-W 1200

Chemické složení	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Nb+Ti %	Cr %
	< 0,180	< 0,800	< 2,000	< 0,020	< 0,010	< 0,150	< 1,000
Mechanické hodnoty	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]			900 min			
	Mez pevnosti R_m [MPa]			1200 min - (1400 max)			
	Tažnost $A_{80\text{ mm}}$ [%]			5 min			

b) Vhodnost Docolu 1200M pro jednotlivé technologie

Docol 1200M je určen pro konvenční technologie tváření za studena, jako je například lisování, válcování nebo výroba trubek. Ohybatelnost tohoto materiálu je dobrá, přesnost poloměru ohybu bude větší pokud budeme materiál ohýbat příčně na směr válcování, kde je ohybatelnost o něco lepší než ve směru podélném. Když stříháme a děrujeme tento materiál, je zvláště zajímavé použití přesného stříhání. Faktory, které toto ovlivňují jsou tloušťka plechu, pevnost a požadavek na kvalitu střížné plochy. Máme zaručenu kvalitní střížnou plochu minimálně 10-12% z tloušťky plechu. Svařitelnost je velmi dobrá, neboť materiál Docol má velmi nízký obsah legujících prvků současně s vysokou pevností. Docol svařujeme všemi běžnými metodami, jako je svařování elektrickým obloukem v plynné atmosféře, svařování metodou WIG, svařování plasmou, laserem nebo odporové bodové svařování [30].

8.2. Experimentálně zjištěné hodnoty

Zvolený zkušební vysokopevnostní materiál Docol 1200M byl dodán ve dvou tloušťkách plechů a to 2 mm a 0,7 mm. Tabule byly dodány v rozměrech 2x1090x2000 (směr válcování 2000 mm) a 0,7x1125x680 (směr válcování 680 mm). Materiál tloušťky 0,7 mm byl odvinut ze svitků, a proto rovinnost těchto tabulí byla horší. Z obou polotovarů (2 a 0,7 mm) byly nejprve odebrány vzorky pro zjištění struktury materiálu před deformací (více viz kapitola 8.2.1), poté byly zhotoveny vzorky pro zkoušky tahem a pro zjištění koeficientu normálové anizotropie (kapitoly 8.2.3 a 8.2.4) a nakonec byly vyrobeny sady vzorků pro zjištění vlivu rychlosti na DMP (kapitola 9). Některé přetržené tyčky z tahové zkoušky byly také následně využity pro zjištění struktury materiálu po deformaci (opět více viz následující kapitola 8.2.1).

8.2.1. Hodnocení struktury materiálu

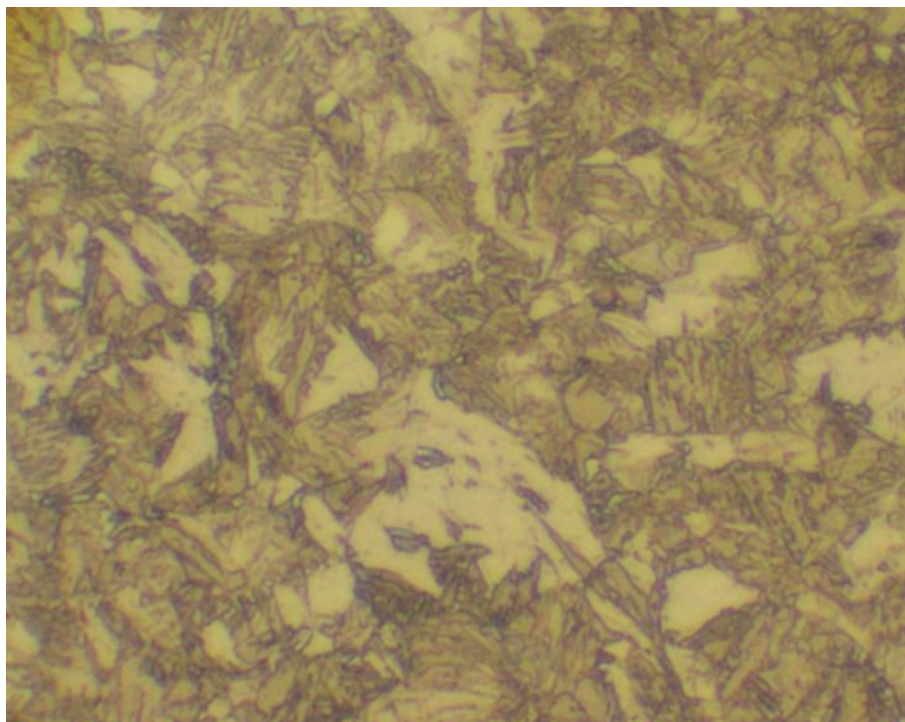
Skupina vysokopevnostních materiálů je specifická svou strukturou, která má za následek uplatnění jiných způsobů zpevnění materiálu (viz kapitola 3.2.) během deformace za studena, než je tomu například u hlubokotažných materiálů. Díky tomu je část experimentální části disertační práce věnována také hodnocení struktury zkoušeného materiálu.

Vzorky pro hodnocení vnitřní struktury nedeformovaného materiálu byly z tabulí plechu (tloušťky 2 mm a 0,7 mm) nejprve nhrubo odděleny třecí pilou, následně očištěny a obroušeny a teprve poté odeslány na České vysoké učení technické v Praze, Fakultu strojní, Ústav strojírenské technologie k provedení analýzy. Později byly na tuto adresu zaslány též přetržené zkušební tahové tyče (2 a 0,7 mm) pro zjištění vnitřní struktury materiálu po deformaci. Po obdržení zásilek byly vzorky rozděleny na menší části, ty byly upraveny do požadovaného tvaru a velikosti, zality materiálem VARIDUR 200 do manipulačních těles a nakonec obroušeny brusnými kotouči (drsnost 120 až 650) na metalografické brusce MTH KOMPAKT 1031 (obrázek Obr. 8.3 vpravo). Po jemném broušení následovalo ještě leštění povrchu vzorků plátnem s vlasem a s malým přídavkem leštící emulze, které bylo provedeno na témže zařízení. Mechanicky připravené vzorky s vyleštěnými funkčními povrchy byly naleptány leptadlem Nital (2% roztok kyseliny dusičné v alkoholu) pro zvýraznění struktury, očištěny a vloženy do světelného optického mikroskopu NEOPHOT 21 (Obr. 8.3 vlevo) pro vyhodnocení struktury zkoušeného materiálu. Metalografické hodnocení bylo provedeno dle ČSN 42 0003 a jeho výsledky jsou poté uvedeny v kapitole 8.2.5.

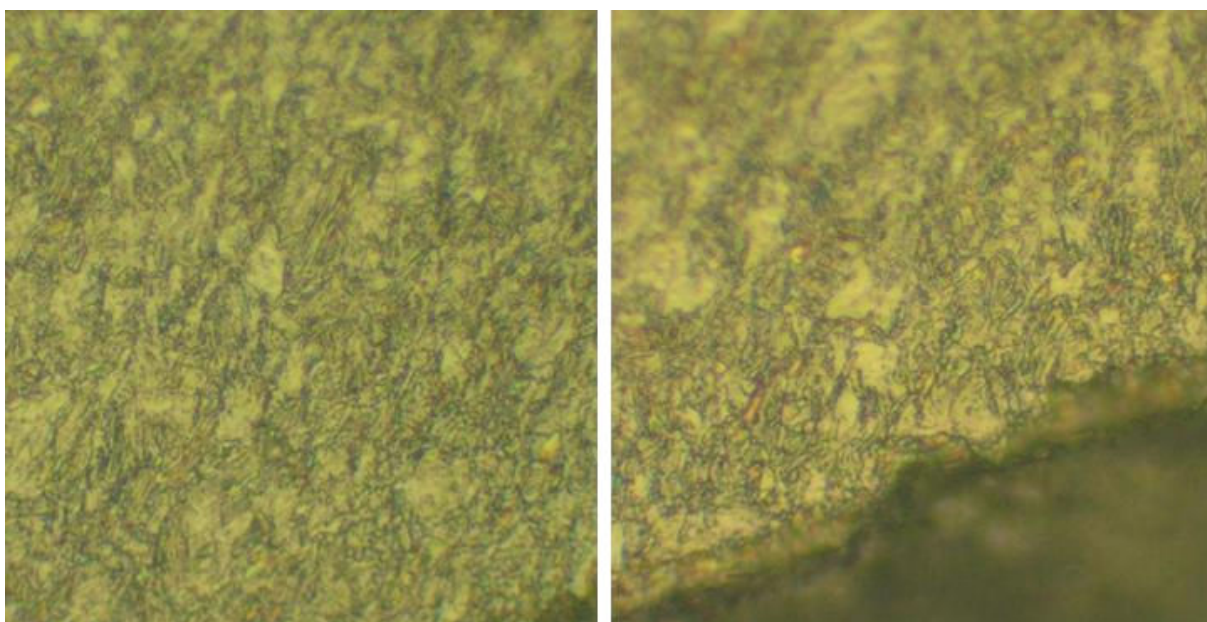


Obr. 8.3: Mikroskop NEOPHOT 21 a metalografická bruska MTH KOMPAKT 1031

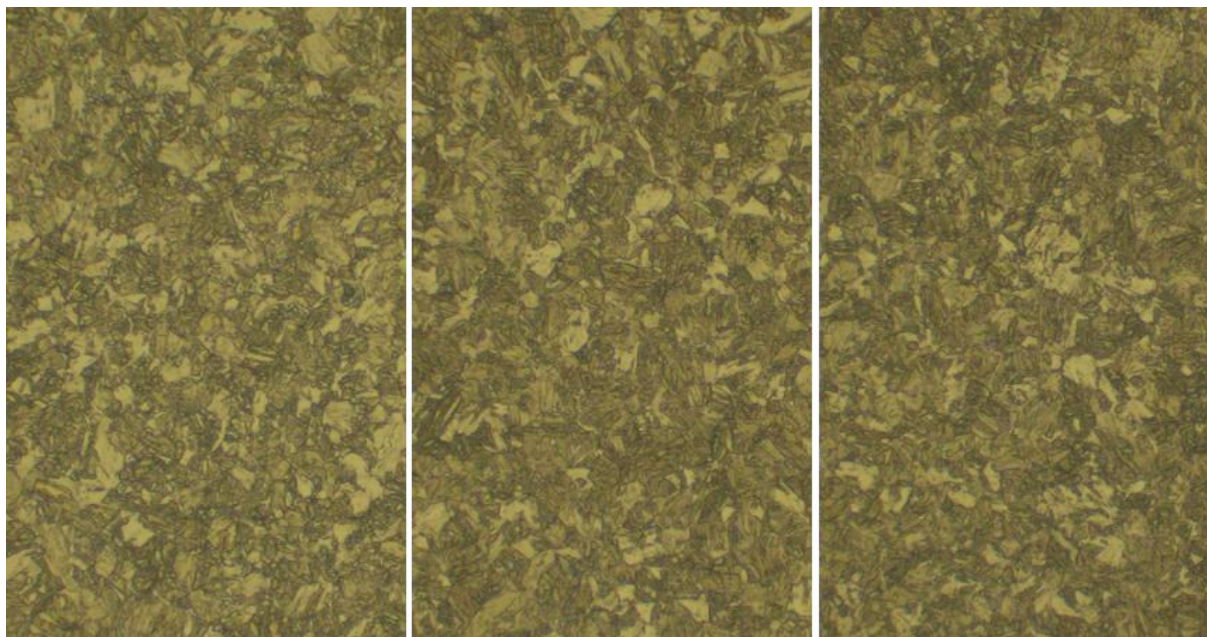
Na následujících fotografiích jsou znázorněny konečné metalografické struktury. První tři obrázky ukazují strukturu materiálu Docol 1200M tloušťky 2 mm, a to nezatíženou deformací Obr. 8.4, po provedené statické zkoušce tahem ($v = 10$ mm/min) Obr. 8.5 a rychlostní tahové zkoušce ($v = 24000$ mm/min) Obr. 8.6.



Obr. 8.4: Struktura materiálu Docol 1200M - $t = 2$ mm před zatížením - zvětšeno 1000x

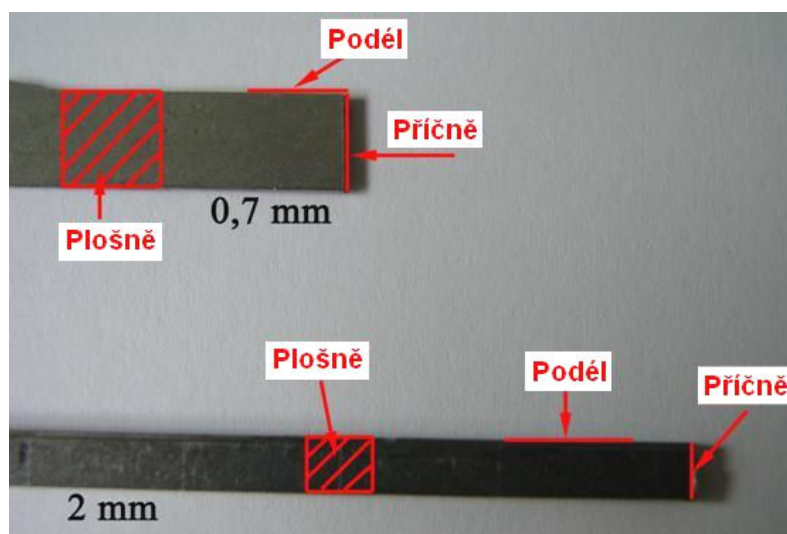


Obr. 8.5: Struktura materiálu Docol 1200M - $t = 2$ mm po statické zkoušce tahem ($v = 10$ mm/min), vlevo zobrazen střed vzorku a vpravo jeho okraj - zvětšeno 1000x



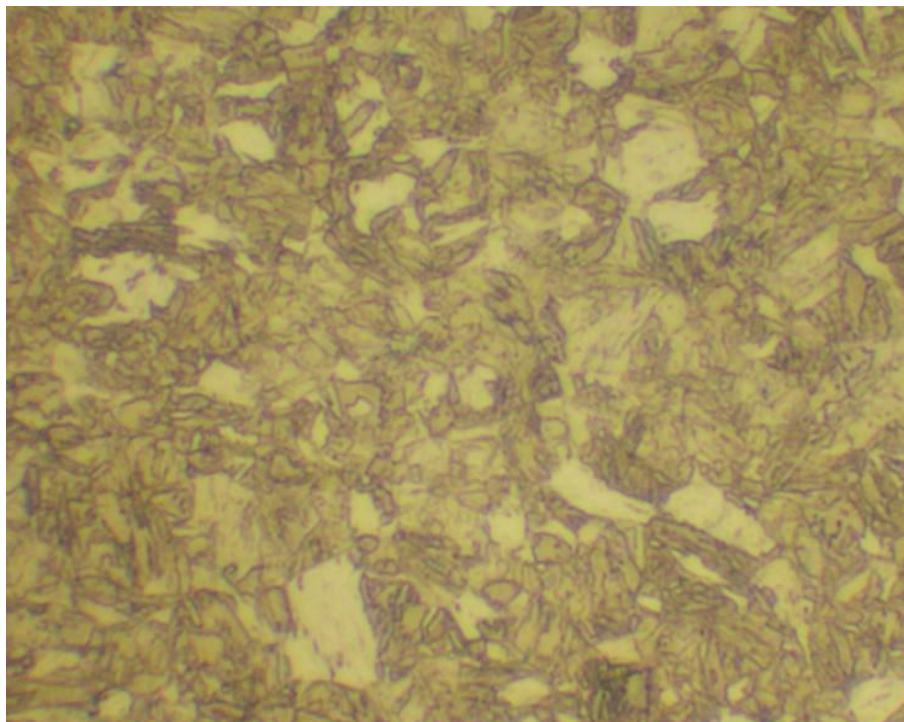
Obr. 8.6: Struktura materiálu Docol 1200M - $t = 2$ mm po rychlostní tahové zkoušce ($v = 24000$ mm/min), vlevo byl odebrán vzorek z plochy zkušební tyče, uprostřed byl odebrán podél tyče a vpravo příčně (viz níže) - zvětšeno 400x

Struktura materiálu (jak $t = 2$ mm tak i $t = 0,7$ mm) byla v posledním případě zjištěna ze vzorků rychlostních tahových zkoušek provedených za rychlosti $v = 24000$ mm/min. Místa jednotlivých odběrů na tahových vzorcích jsou přehledně znázorněny na následujícím obrázku Obr. 8.7.

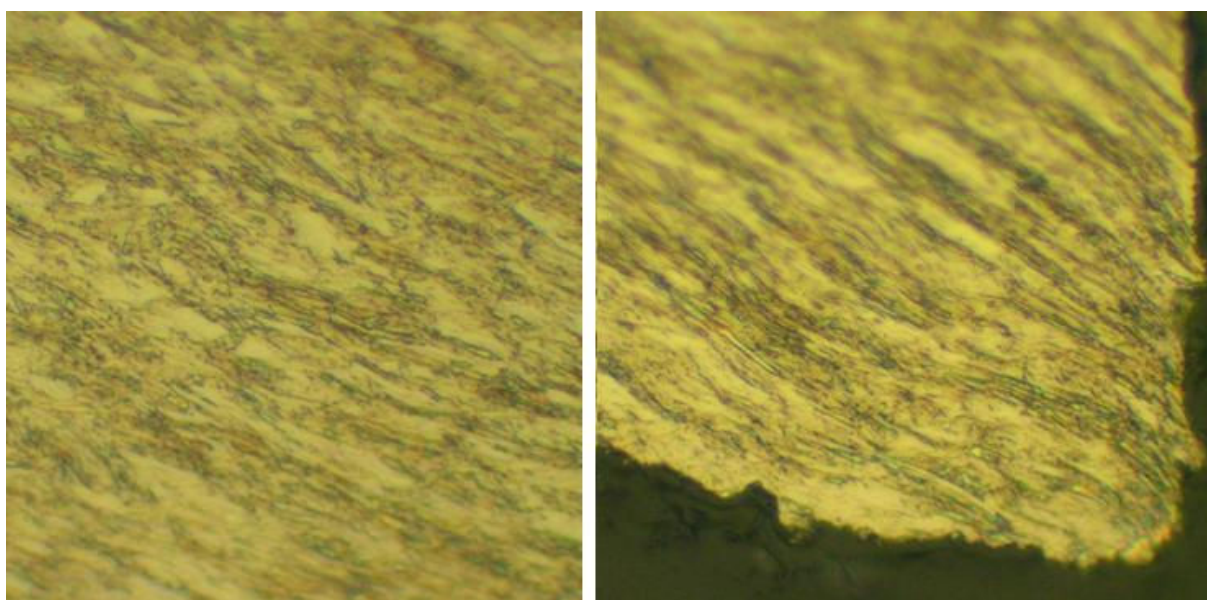


Obr. 8.7: Místa hodnocení struktury na zkušebních tyčích materiálu Docol 1200M po rychlostní tahové zkoušce ($v = 24000$ mm/min)

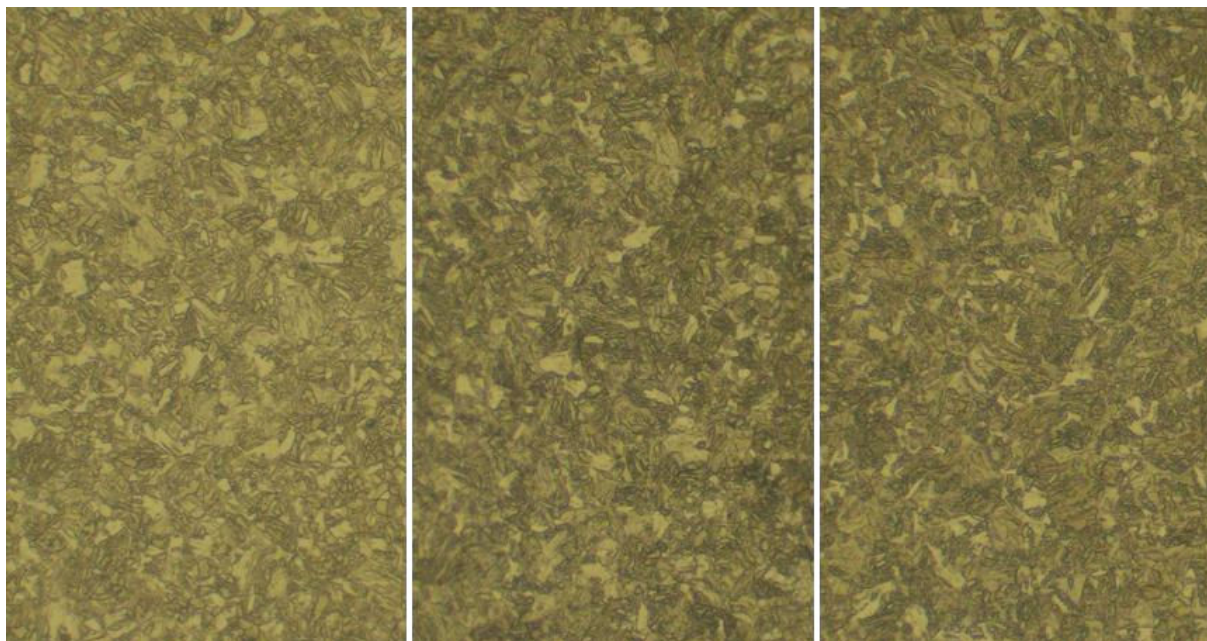
Zbývající tři obrázky ukazují strukturu materiálu Docol 1200M tloušťky 0,7 mm, a to opět před deformací Obr. 8.8, po provedené statické zkoušce tahem ($v = 10$ mm/min) Obr. 8.9 a rychlostní tahové zkoušce ($v = 24000$ mm/min) Obr. 8.10.



Obr. 8.8: Struktura materiálu Docol 1200M - $t = 0,7$ mm před zatížením - zvětšeno 1000x



Obr. 8.9: Struktura materiálu Docol 1200M - $t = 0,7$ mm po statické zkoušce tahem ($v = 10$ mm/min), vlevo deformovaný okraj vzorku a vpravo trhlina - zvětšeno 1000x



Obr. 8.10: Struktura materiálu Docol 1200M - $t = 0,7$ mm po rychlostní tahové zkoušce ($v = 24000$ mm/min), vlevo byl odebrán vzorek z plochy zkušební tyče, uprostřed byl odebrán podél tyče a vpravo příčně - zvětšeno 400x

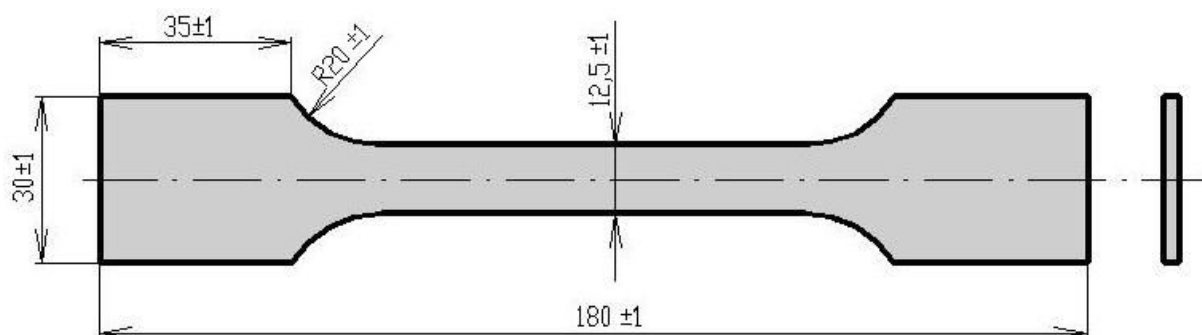
8.2.2. Základní mechanické vlastnosti

Pro zjištění základních mechanických vlastností, jako je mez pevnosti v tahu nebo tažnost, byla u zvoleného materiálu Docol 1200M (obou měřených tloušťek $t = 2$ mm a $t = 0,7$ mm) použita zkouška tahem. Dalšími měřeními a výpočty byly také například zjištěny hodnoty normálové anizotropie a ukazatelů tvárnosti. Postupy těchto experimentů jsou spolu se zjištěnými hodnotami uvedeny v následujících kapitolách 8.2.3 a 8.2.4, komplexní zhodnocení je poté provedeno v kapitole 8.2.5.

Pro hlubší poznání chování zvoleného materiálu za různých zatěžujících rychlostních podmínek byla provedena celá řada měření tahových zkoušek rozdělených do několika skupin dle velikosti zátěžné rychlosti. První skupinu tvořily statické zkoušky tahem rychlostí 10 mm/min dle normy ČSN EN 10002-1. Druhou část tvořily zkoušky vyšší rychlostí zatěžování a to 600 mm/min. Poslední třetí skupinu představovaly tahové zkoušky extrémní zátěžovou rychlostí 24000 mm/min, tj. maximální rychlostí, kterou lze na trhačích zařízeních na Katedře strojírenské technologie, Oddělení tváření kovů a plastů experimentálně realizovat. Pro jednotlivé jmenované skupiny experimentů byl užit různý způsob zhotovení a provedení zkušebních vzorků, což je také podrobněji popsáno v následujících kapitolách.

8.2.3. Zkouška tahem - $t = 2$ mm

Vzhledem k vysoké pevnosti použitého materiálu, jeho značné tloušťce (2 mm) a snaze o co nejmenší tepelné ovlivnění byla pro zhotovení vzorků na tahovou zkoušku a dále také vzorků pro zjištění koeficientu normálové anizotropie zvolena technologie CNC řezání vodním paprskem. Vyřezání vzorků (0° , 45° a 90° na směr válcování) bylo provedeno firmou S-plasma s.r.o., následující obrázek Obr. 8.11 znázorňuje rozměry a tvar zkušební tyče [17].



Obr. 8.11: Normalizovaná zkušební tyč pro zkoušku tahem $L_0 = 50$ mm

Reálnou podobu vzorků ukazuje obrázek Obr. 8.12 znázorňující ve své levé části tabuli plechu s vyřezanými vzorky spojenými dosud se zbytkovým plechem tenkými můstky, v pravé části již oddělené a označené vzorky.



Obr. 8.12: Tabule plechu po řezání vodním paprskem a hotové vzorky

Zkušebními tyčím byly následně obroušeny můstky a povrchy v měřeném úseku (koroze povrchu vzorků vlivem vodního prostředí během procesu dělení materiálu) smirkovými kotouči (Obr. 8.13 levá a střední část), což způsobilo různou šířku a tloušťku

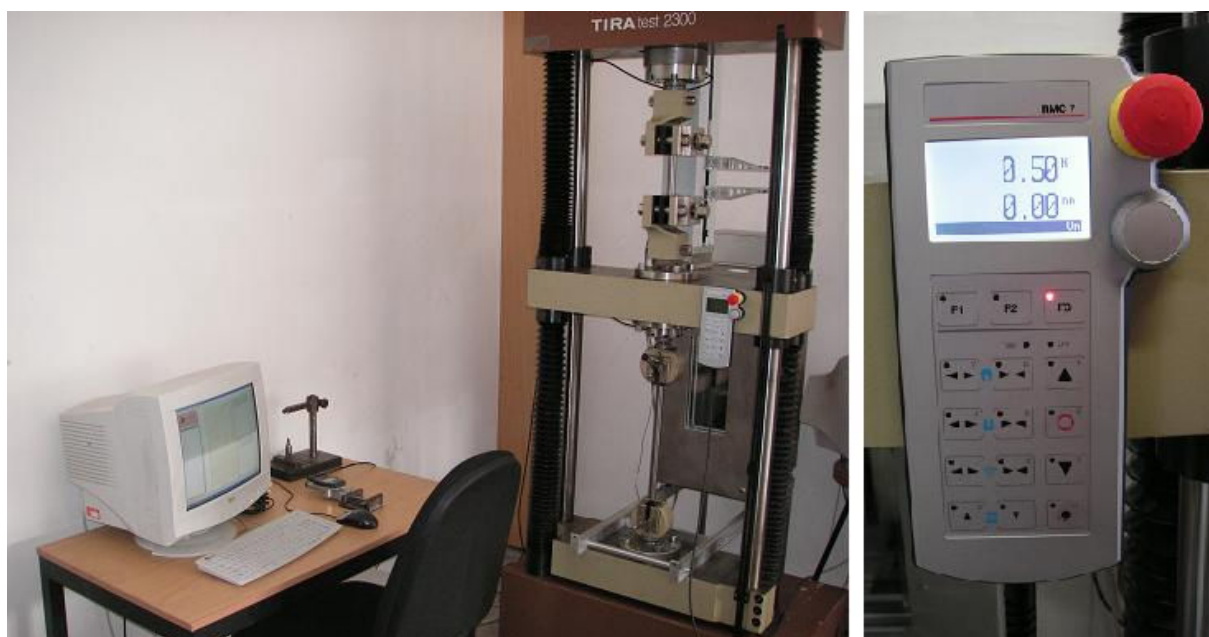
zkušebních vzorků v této části. K přesnému určení těchto rozměrů byl použit digitální mikrometr firmy Mitutoyo upnutý v měřícím přípravku a zobrazený v pravé části obrázku Obr. 8.13. Takto zhotovené vzorky byly následně použity pro zkoušky tahem rychlostí 10 mm/min a 600 mm/min.



Obr. 8.13: Brusné smirkové kotouče a mikrometr Mitutoyo

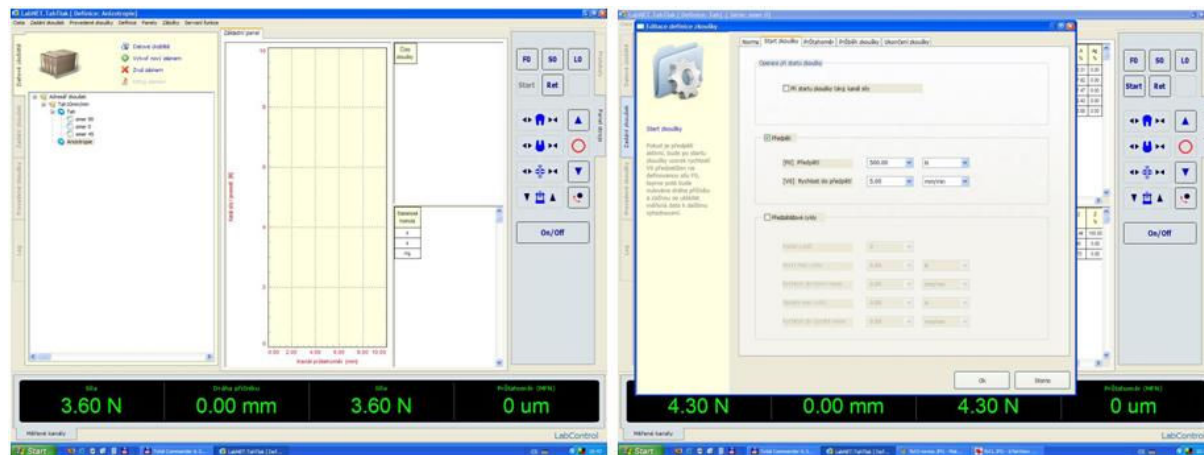
a) Zkouška tahem - $t = 2 \text{ mm}$ - 10 mm/min

Statické zkoušky tahem byly provedeny dle příslušné normy ČSN EN 10002-1 na modernizovaném trhacím zařízení TIRAtest 2300 (Obr. 8.14 vlevo) opatřeném PC řízením pomocí nového softwaru LabNET. Kontrola stroje je možná buď přímo přes dálkový ovládací panel (Obr. 8.14 vpravo) nebo přes ikony ovládacího programu.



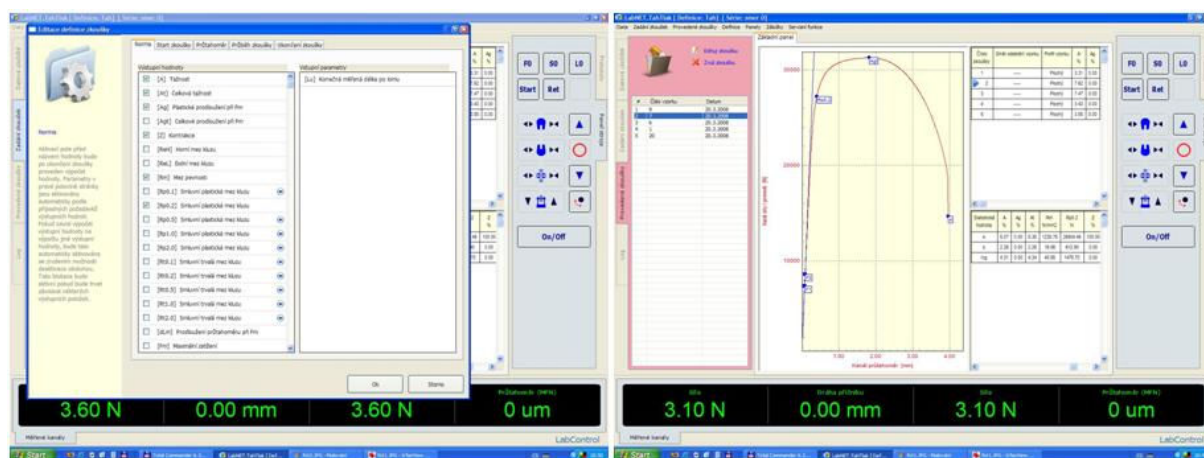
Obr. 8.14: TIRAtest 2300 s detailem ovládacího panelu

Ovládací program obsahuje několik základních oken, umožňujících definovat vstupní parametry (rozměry tyče, parametry průběhu zkoušky atd.), jak je ukázáno na obrázku Obr. 8.15. V pravých částech obrazovek je již zmíněný panel s ikonami ovládání stroje.



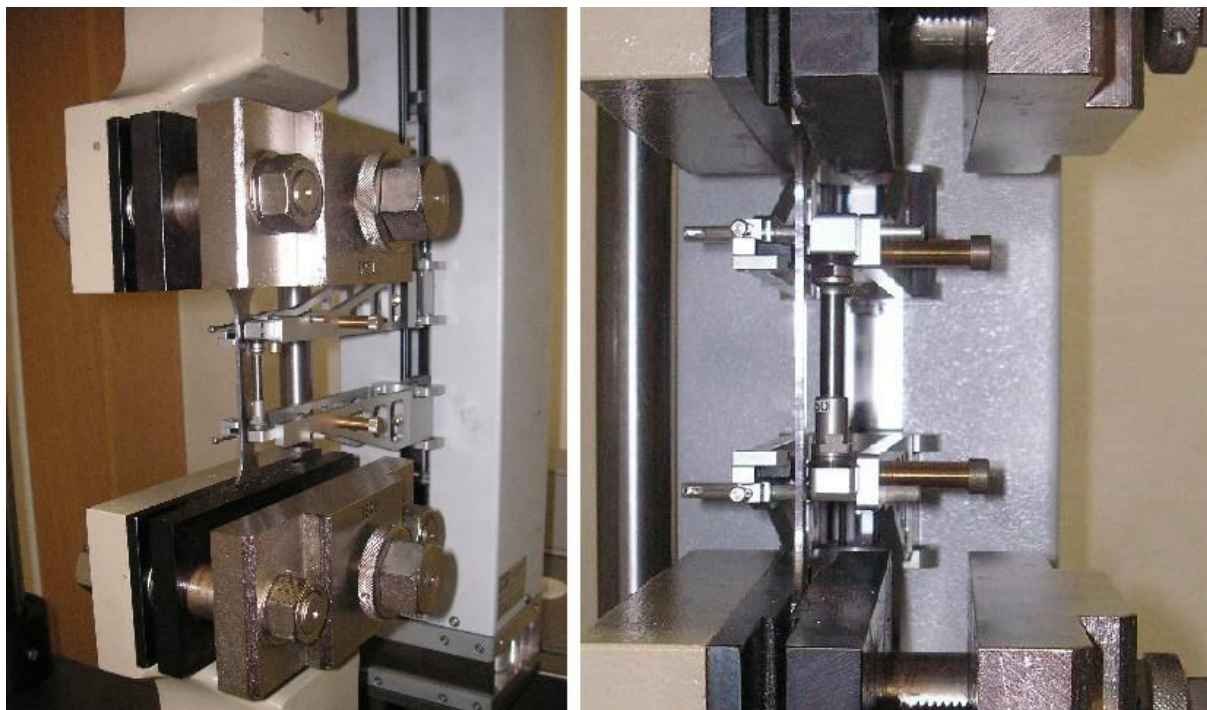
Obr. 8.15: Vytvoření datového uložště a zadání rozměrů zkušební tyče

Program samozřejmě také umožňuje výstupy požadovaných naměřených hodnot ve formě grafů, tabulek a celkového protokolu viz obrázky Obr. 8.16.



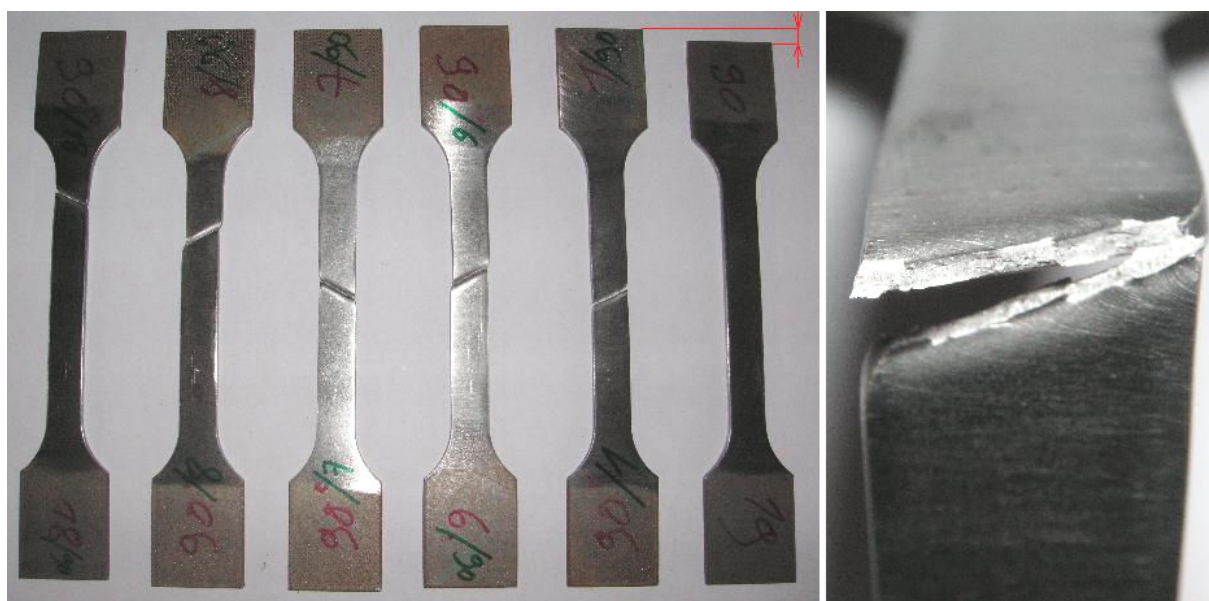
Obr. 8.16: Požadované výstupní parametry a provedená zkouška

Vlastní měření probíhala takto. Proměřený vzorek (šířka b_0 a tloušťka t_0) byl vložen do speciálních čelistí v horním pracovním prostoru trhacího stroje TIRAtest 2300, po dotažení přítláčných šroubů byl na vzorek v měřeném úseku ($L_0 = 50$ mm) přiložen externí elektrický průtahoměr MFN-A, jak je ukázáno na obrázku Obr. 8.17 a vstupní rozměry tyče byly zapsány do připraveného datového uložště v ovládacím programu LabNET. Dále byla nastavena rychlost posuvu (10 mm/min) a další vstupní a výstupní parametry (požadované výstupní veličiny, způsob ukončení zkoušky atd.).



Obr. 8.17: Detail čelistí s upnutou zkušební tyčí a přiloženým průtahoměrem

Nyní proběhlo vynulování vstupních snímačů a byla spuštěna vlastní zkouška. Po jejím skončení (nastaveném na pokles síly 50% $F_{\max}$) byl ze vzorku odepnut průtahoměr, obě poloviny přetrženého vzorku byly uvolněny z čelistí a byl dán příkaz k návratu příčnicku do počáteční polohy. Tento postup byl aplikován na všech tyčích tří směrů (0° - 5 ks, 45° - 5 ks, 90° - 5 ks na směr válcování) první skupiny měření, celkem tedy 15 vzorků.



Obr. 8.18: Sada zkušebních tyčí a detail lomové plochy

Na obrázku Obr. 8.18 vlevo je zobrazena řada 6 vzorků jednoho směru, prvních 5 vzorků (zleva) je po provedené tahové zkoušce, vzorek poslední (vpravo) je dosud nezatížen. Z uspořádání je patrné výsledné natažení tyče do okamžiku porušení (červená kóta). Vpravo je na obrázku Obr. 8.18 ukázán detail lomové plochy jedné z přetržených zkušebních tyčí.

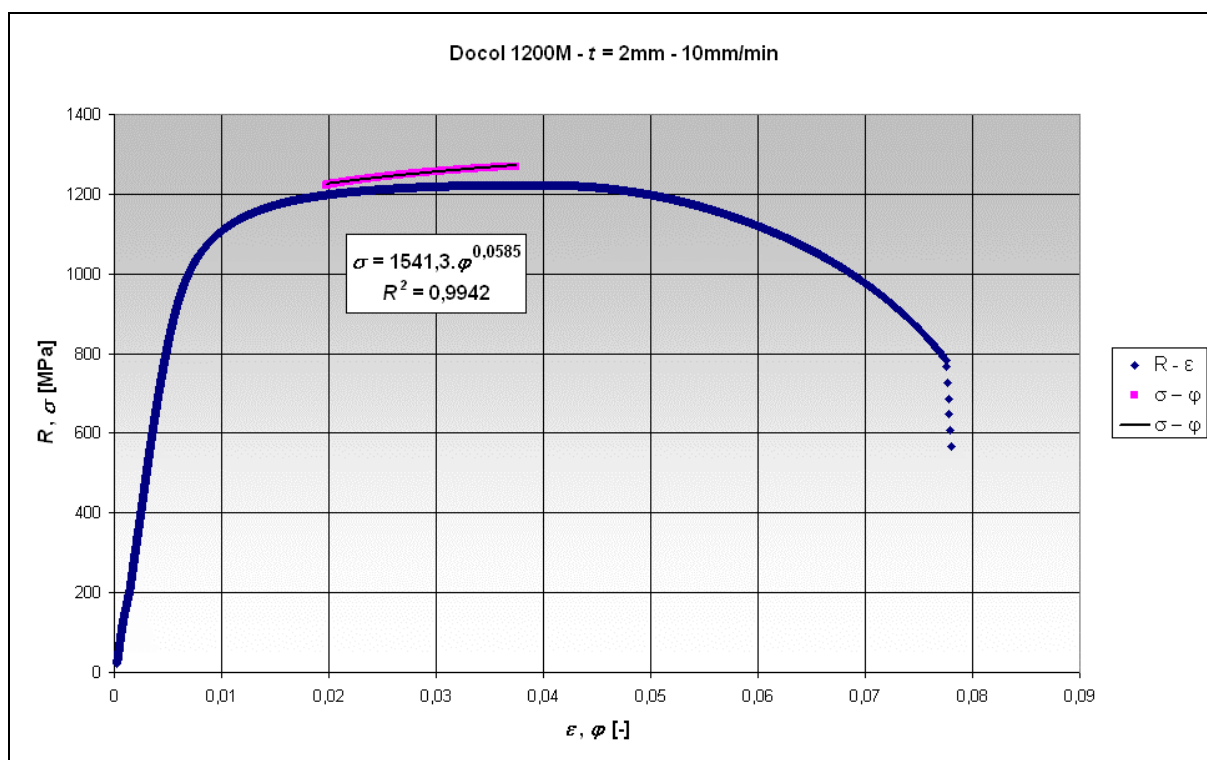
Z předchozího obrázku je také patrné, že některé vzorky praskly mimo průtahoměrem měřenou oblast ($L_0 = 50$ mm). Tento jev se vyskytl u všech měřených sad (ve všech třech směrech). Z naměřených hodnot mezí pevnosti R_m a nevýrazných mezí kluzu $R_{p0,2}$ jednotlivých vzorků byly spočteny v programu Microsoft Excel hodnoty střední, z hodnot tažností $A_{50\text{ mm}}$ a plastických tažností A_g byly samozřejmě pro výpočet středních hodnot použity pouze ty, které náležely tyčím porušeným v měřené oblasti [17, 19].

Z takto získaných mechanických hodnot byly také dopočítány ukazatele tváritelnosti a to zásoba plasticity ZP (definovaná vztahem 4.8), ukazatel hlubokotažnosti UH (daný vztahem 4.9) a komplexní ukazatel tváritelnosti KUT (vzorec 4.10) [2, 5].

Nakonec proběhlo stanovení materiálových konstant C a n pomocí mocninných regresí (dle vzorce 4.12) příslušných grafických průběhů tahových zkoušek. Pro nalezení výsledných hodnot bylo zapotřebí nejprve stanovit vhodnou aproximační oblast tahového diagramu. Tuto problematiku popisuje řada norem (jak bylo naznačeno již v kapitole 4.1.2 b), ovšem jednotlivé způsoby vyhodnocení se vzájemně liší [3, 5, 11, 18].

- Česká norma ČSN ISO 10272 doporučuje oblast rovnoměrné plastické deformace, tedy interval mezi hodnotami $\varphi = 5\%$ a maximální rovnoměrnou deformací.
- Dle normy EN 10 130+A1:2000 je vhodný interval pro aproximaci $\varphi = 10 \div 15(20)\%$.
- Poslední zde citovaná norma ASTM E 646-78 stanovuje hledané konstanty z libovolného intervalu hodnot $\sigma - \varphi$, kde minimum je dáno mezí kluzu a maximum odpovídá přetvoření při $F_{\max}$ či těsně před touto hodnotou.

Vzhledem k malé tažnosti zkoušeného materiálu (tažnost na mezí pevnosti kolem 2,5 | 4%) nebylo možno pro stanovení těchto konstant využít ani první ani druhou normu. Byl tedy zvolen způsob aproximace dle třetí (ASTM E 646-78) s intervalem $\varphi = 2\%$ (tedy $\varphi = 0,02$) až mezí pevnosti materiálu σ_m . Spolehlivostní hodnota aproximace dané rovnicí (4.12) byla $R^2 \cong 0,99$. Následující obrázek (Obr. 8.19) znázorňuje příklad aproximace provedené v programu Microsoft Excel. Modrá křivka představuje smluvní tahový diagram $R = f(\varepsilon)$, fialová část skutečného diagramu $\sigma = f(\varphi)$ v intervalu ($\varphi = 2\%$ až σ_m) a černá křivka je její mocninná regrese ve tvaru $\sigma = C \cdot \varphi^n$ tedy $\sigma = 1541,3 \cdot \varphi^{0,0585}$.



Obr. 8.19: Zjištění konstant C a n

Kromě vlastního měření tahových diagramů proběhlo také zjištění koeficientu normálové anizotropie daného vztahem (4.11) a blíže specifikovaného již v kapitole 4.1.2. Tento vztah lze upravit dle zákona zachování objemu do tvaru (8.1) [11, 18].

$$r_{\alpha} = \frac{\ln\left(\frac{b_o}{b_u}\right)}{\ln\left(\frac{L_u \cdot b_u}{L_o \cdot b_o}\right)} \quad [-] \quad (8.1)$$

kde je:

b_o, L_o ... šířka tyčky a délka měřeného úseku před zkouškou [mm]

b_u, L_u ... šířka tyčky a délka měřeného úseku po deformaci [mm]

Pro zjištění jeho velikosti byla zvolena rychlost zatěžování vzorku 10 mm/min. Při pozdějších rychlostních tahových zkouškách nebyla předpokládána změna hodnoty tohoto koeficientu a proto již nebyl za vyšších rychlostí opětovně zjišťován. V experimentu bylo užito zkušebních tyčí stejného provedení jako v případě tahové zkoušky (Obr. 8.11), vždy 3 vzorky v každém směru (0° , 45° a 90° na směr válcování). Norma ČSN ISO 10 275 (ČSN 420436) stanovuje, že tento koeficient má být zjištěn při prodloužení zkušební tyče o

20% měřené délky, v našem případě ($L_0 = 50$ mm) tedy při natažení tyče o 10 mm. Z výsledných hodnot tažností (viz tabulka Tab. 8.3 či předchozí obrázek Obr. 8.19) je ovšem zřejmé, že v případě materiálu Docol 1200M nelze tento postup použít. Proto bylo stanoveno konečné prodloužení měřeného úseku o 1 mm tedy o 2%. Tato hodnota je sice velmi malá a obtížně měřitelná, avšak deformace obdobné velikosti (0,95 mm a 1,2 mm) užívá pro zjištění tohoto koeficientu u materiálu Docol 1200M i jeho výrobce firma SSAB Swedish Steel. Vlastní postup experimentu byl následující. Vzorky byly nejprve orýsovány na orýsovacím zařízení (Obr. 8.25 vlevo) po 10 mm na celé zkoušené délce, byla změřena jejich šířka ve třech místech pomocí mikrometru Mitutoyo (Obr. 8.13) a přesná délka měřeného úseku (označeného již zmíněnými ryskami) za pomoci Abbého délkoměru znázorněného na obrázku Obr. 8.20. Proměřená a orýsovaná zkušební tyč byla vložena do čelistí stroje TIRatest 2300, byl přiložen průtahoměr a v ovládacím programu nastaveno ukončení zkoušky po dosažení prodloužení 1 mm. Po spuštění a proběhnutí zkoušky byl odepnut průtahoměr, uvolněn vzorek a stroj vrácen do výchozí polohy. Následovalo opětovné proměření šířky (ve třech místech) a délky deformované tyče za užití již zmiňovaných přístrojů. Ze zjištěných hodnot byly v programu Microsoft Excel za použití vztahu (8.1) dopočítány hledané koeficienty normálové anizotropie pro tři směry (0° , 45° a 90°).

Na následujícím obrázku Obr. 8.20 jsou kromě již zmíněného Abbého délkoměru znázorněny i 4 zkušební tyče, první tři (zleva) jsou tyče pro zjištění koeficientu normálové anizotropie po natažení o 1 mm s jasně patrnými ryskami, vpravo je tyč nezatížená. Červená kóta ukazuje konečné prodloužení tyčí.



Obr. 8.20: Tyče po zjištění koeficientu normálové anizotropie a Abbého délkoměru

Střední hodnoty všech zjištěných veličin ($R_{p0,2}$, R_m , A_g , $A_{50\text{ mm}}$, UH , KUT , ZP , C , n , r_a) spolu s příslušnými směrodatnými odchylkami s , zjištěnými dle vztahu (8.2), jsou přehledně zpracovány v tabulce Tab. 8.3, kde jsou též uvedeny i směrově střední hodnoty x_s definované vztahem (8.3) [2, 3, 5, 11].

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (8.2)$$

kde je:

x_i ... aktuální naměřená hodnota

$\bar{x}$... střední hodnota

n ... počet měření

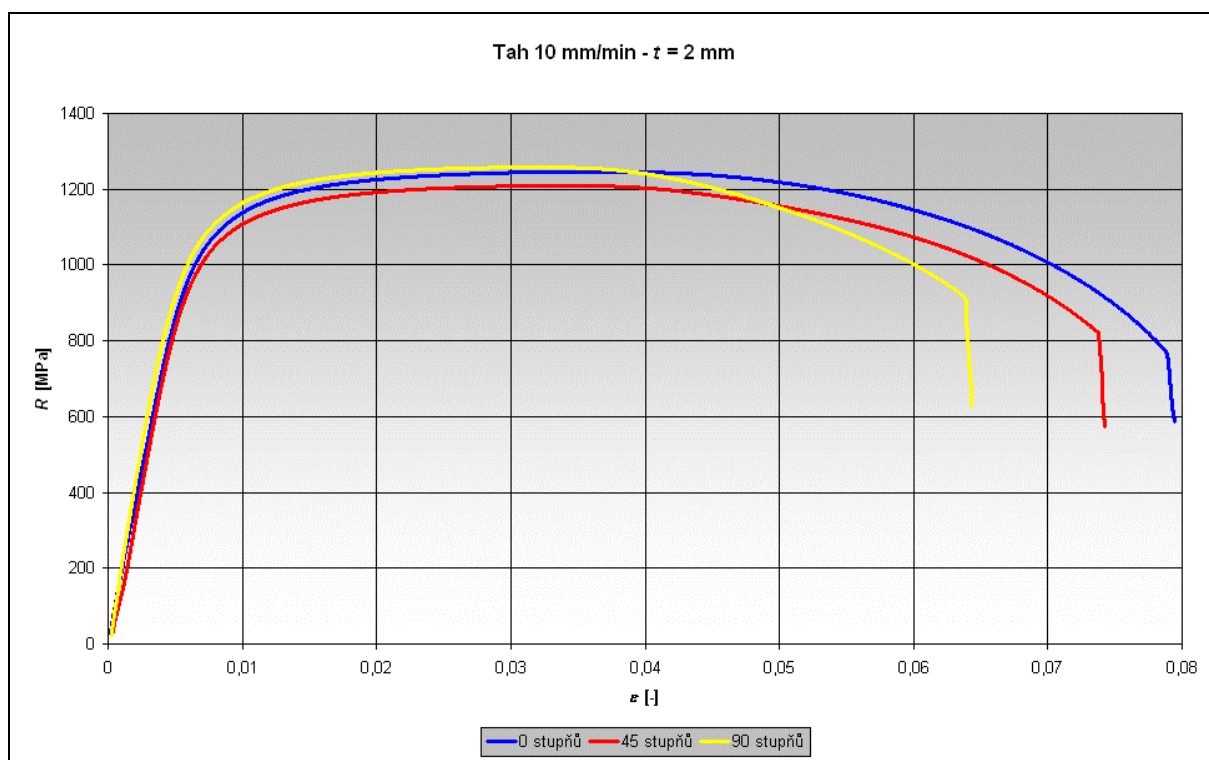
$$x_s = \frac{x_0 + 2 \cdot x_{45} + x_{90}}{4} \quad (8.3)$$

kde je:

x_0 , x_{45} , x_{90} ... hodnota dané veličiny ve směru 0° , 45° a 90° na směr válcování

K tabulce náleží také tahový diagram (Obr. 8.21) znázorňující vzorové křivky pro všechny tři měřené směry 0° , 45° a 90° .

Naměřená data jsou zpracována ve formě výstupního protokolu v příloze PŘÍLOHA 1.



Obr. 8.21: Vzorový tahový diagram - 10 mm/min

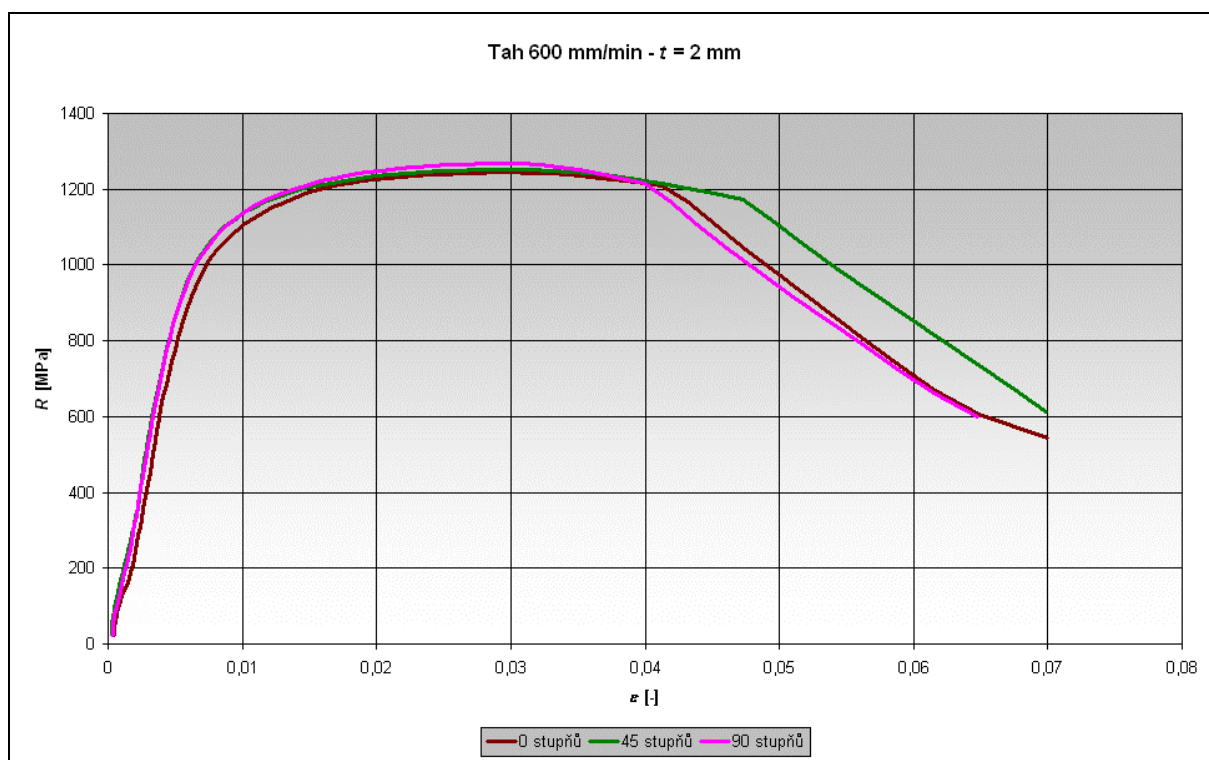
Tab. 8.3: Zjištěné hodnoty z tahové zkoušky

Docol 1200M $t = 2$ mm		Rychlost zatěžování 10 mm/min						
		0°	s	45°	s	90°	s	x_s
$R_{p0,2}$	[MPa]	1074,71	20,39	1052,00	21,93	1101,23	31,13	1069,98
R_m	[MPa]	1238,78	16,55	1220,30	10,07	1252,77	8,99	1233,03
$A_{50 \text{ mm}}$	[%]	7,55	0,11	6,99	0,19	6,13	0,30	6,92
A_g	[%]	3,04	0,11	2,54	0,22	2,43	0,15	2,64
UH	[-]	0,868	0,006	0,862	0,012	0,879	0,021	0,868
KUT	[-]	0,065	0,001	0,060	0,001	0,054	0,001	0,060
ZP	[MPa]	9,283	0,324	8,827	0,713	6,971	1,194	8,477
C	[MPa]	1549,24	22,50	1529,76	21,13	1549,36	19,34	1539,53
n	[-]	0,056	0,002	0,055	0,004	0,052	0,003	0,055
R^2	[-]	0,994	0,001	0,991	0,001	0,993	0,001	0,992
r_a	[-]	0,607	0,097	0,818	0,207	0,486	0,137	0,682

b) Zkouška tahem - $t = 2 \text{ mm}$ - 600 mm/min

Pro zjištění tahových diagramů a základních mechanických hodnot při rychlosti zatěžování 600 mm/min byly použity také zkušební tyče vyrobené dle popisu v předchozí podkapitole. Měření se lišila pouze v hodnotě nastavené zatěžující rychlosti (nyní tedy 600 mm/min). Měřen byl stejný počet vzorků jako v předchozím případě ($0^\circ - 5 \text{ ks}$, $45^\circ - 5 \text{ ks}$, $90^\circ - 5 \text{ ks}$ na směr válcování), celkem tedy 15 vzorků. Výsledné střední hodnoty mechanických veličin (tažnost počítána pouze ze vzorků porušených v měřené oblasti viz předchozí podkapitola) jsou společně s dopočítanými ukazateli tvárivosti, konstantami C a n a statistickými veličinami s a x_s uvedeny v tabulce Tab. 8.4. Vzorový tahový diagram pro tři směry je znázorněn na obrázku Obr. 8.22.

Zjištěné hodnoty jsou poté zpracovány ve formě protokolu v příloze PŘÍLOHA 2.



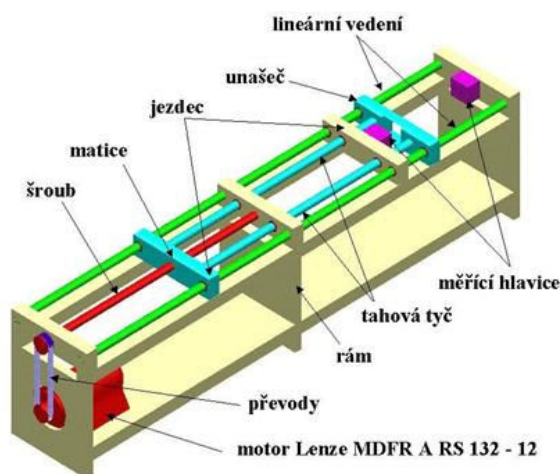
Obr. 8.22: Vzorový tahový diagram - 600 mm/min

Tab. 8.4: Zjištěné hodnoty z tahové zkoušky

Docol 1200M $t = 2$ mm		Rychlost zatěžování 600 mm/min						
		0°	s	45°	s	90°	s	x_s
$R_{p0,2}$	[MPa]	1057,51	5,23	1052,91	17,19	1086,77	10,48	1062,53
R_m	[MPa]	1252,96	5,22	1234,65	11,27	1261,89	15,64	1246,04
$A_{50 \text{ mm}}$	[%]	6,65	0,05	6,84	0,43	6,01	0,18	6,58
A_g	[%]	2,47	0,26	2,52	0,24	2,01	0,36	2,38
UH	[-]	0,844	0,003	0,853	0,010	0,861	0,013	0,853
KUT	[-]	0,056	0,001	0,058	0,001	0,052	0,001	0,056
ZP	[MPa]	9,748	0,212	9,324	0,615	7,887	0,787	9,070
C	[MPa]	1647,82	43,97	1554,76	29,79	1589,56	56,48	1586,73
n	[-]	0,069	0,008	0,056	0,005	0,056	0,008	0,059
R^2	[-]	0,987	0,004	0,983	0,012	0,989	0,005	0,986

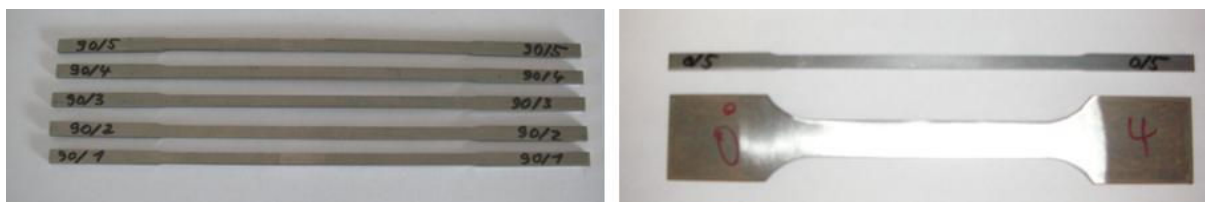
c) Zkouška tahem - $t = 2 \text{ mm}$ - 24000 mm/min

Pro tuto skupinu měření byl použit odlišný postup zhotovení zkušebních tyčí a i jejich rozměry a tvar se lišily od předchozích dvou skupin (10 mm/min a 600 mm/min). Jelikož stroj TIRAtest 2300, použitý v předchozích dvou případech, nedokáže vyvinout vyšší zatěžující rychlost než již měřených 600 mm/min a byla snaha zjistit chování zvoleného materiálu Docol 1200M za extrémních rychlostí, bylo pro třetí skupinu měření použito vysokorychlostního zařízení SOKOL 400. Tento stroj, vyvinutý na Katedře strojírenské technologie, Oddělení tváření kovů a plastů a původně určený pro rychlostní tribologické testování maziv, je ve své podstatě horizontálním trhacím mechanismem s maximální rychlostí posuvu 400 mm/s (jak již napovídá samotné označení stroje) tedy 24000 mm/min . Následující obrázek Obr. 8.23 znázorňuje ve své levé části konstrukční schéma a v pravé části reálnou podobu stroje SOKOL 400 [8].



Obr. 8.23: Konstrukční schéma a reálná podoba zařízení SOKOL 400

Maximální síla čelistí činí u tohoto zařízení $F_t = 20 \text{ kN}$. Vzhledem k extrémním pevnostním hodnotám zkoušeného materiálu nemohly být použity pro tuto sérii měření tahové tyčky popsané v úvodu této kapitoly 8.2.3, neboť jejich průřez činil $S_0 \cong 25 \text{ mm}^2$ což je hodnota překračující, vzhledem k dané síle čelistí, možnosti tohoto stroje. Proto byly zhotoveny speciální vzorky šířky cca 4 mm s průřezem $S_0 \cong 8 \text{ mm}^2$ vyhovující parametrům stroje. Vzorky byly nastříhány na tabulových nůžkách a jemně ofrézovány na funkčních plochách. Zkoušen byl stejný počet vzorků jako v předchozích případech (5 ks v každém směru celkem tedy 15 kusů). Ukázka jedné sady těchto vzorků spolu s porovnáním jejich velikosti s normalizovanou zkušební tyčí je na obrázku Obr. 8.24.



Obr. 8.24: Vzorky pro rychlost 24000 mm/min a porovnání s normalizovanou tyčí

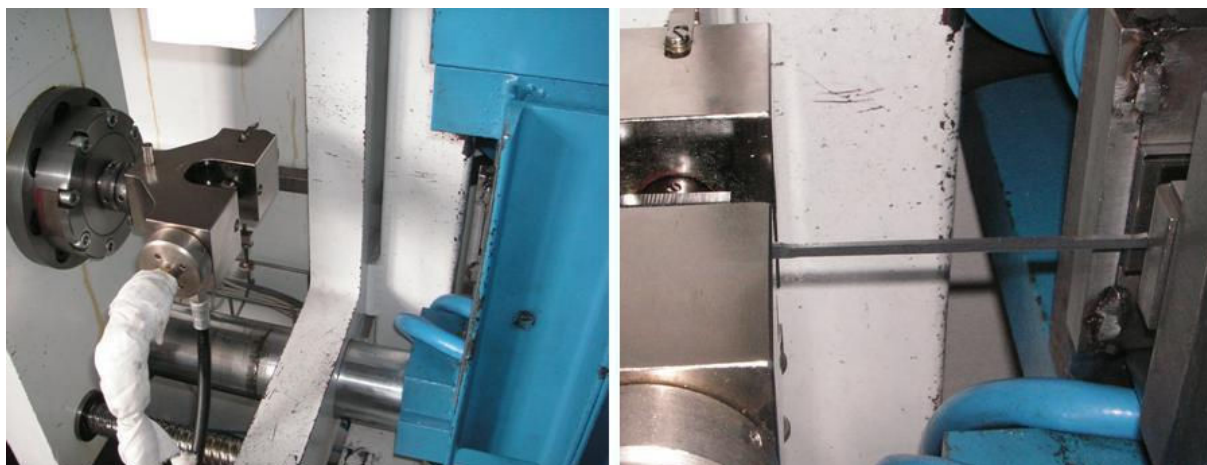
Jelikož zařízení SOKOL 400 neobsahuje průtahoměr, bylo před vlastním měřením provedeno orýsování zkušebních tyček (po 10 mm v celém měřeném úseku) na orýsovacím zařízení znázorněném v levé části obrázku Obr. 8.25. Délky měřených úseků jednotlivých tyček (hodnoty L_0) byly proměřeny Abbého délkoměrem a tloušťky příslušných tyčí digitálním posuvným měřítkem firmy Mitutoyo (pravá část obrázku Obr. 8.25).



Obr. 8.25: Orýsovací zařízení a digitální posuvné měřítko firmy Mitutoyo

Vlastní měření probíhalo takto. Po nastavení vstupních parametrů stroje (přidržovací tlak v hydraulických čelistech aj.) a ovládacího software (frekvence snímání, dráha příčnicku, požadovaná rychlost posuvu 24000 mm/min a geometrie zkušební tyče) byl vzorek vložen do čelistí a sevřen požadovaným tlakem, jak je ukázáno na obrázku Obr. 8.26. Následoval impuls stroji a současně i měřicímu software k započetí testu. Po přetržení zkušební tyče a odjetí příčnicku do nastavené vzdálenosti došlo k ukončení měření a k následnému vyjmutí obou částí přetržené tyče z čelistí. Dále proběhlo uložení naměřených dat ve formě Excelovského souboru (datový kanál síly, dráhy příčnicku a času) a po návratu pohyblivé čelisti do výchozí polohy mohlo proběhnout nové měření. Tento postup byl aplikován na všech vzorcích tří směrů odebrání. Pro výpočet tažnosti $A_{50 \text{ mm}}$ bylo u všech vzorků, po vzájemném přiložení

příslušných částí zkušebních tyček, provedeno zjištění délky měřených úseků po deformaci na Abbého délkoměru. Hledané hodnoty tažností byly dopočítány dle vztahu (4.7).



Obr. 8.26: Detail pneumatické čelisti stroje SOKOL 400 a upnutá zkušební tyč

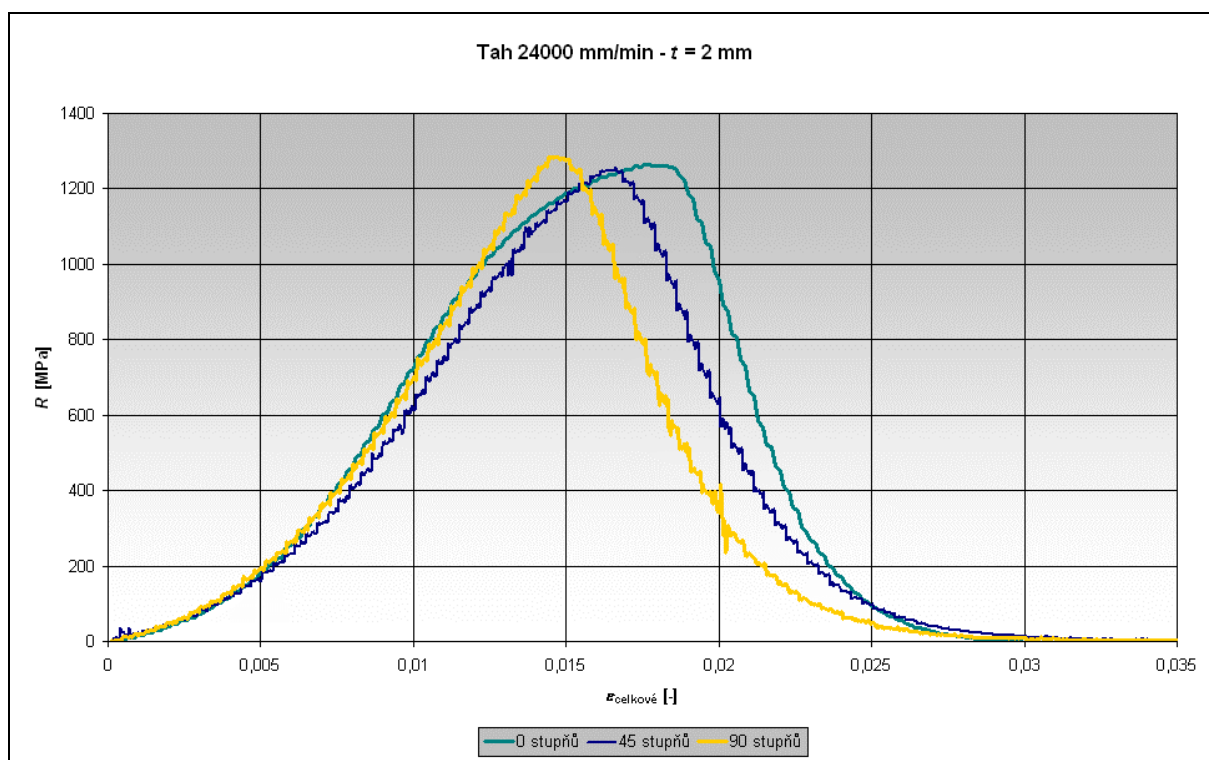
Na obrázku Obr. 8.27 vlevo jsou zobrazeny všechny tři měřené sady vzorků. Jak je vidět, tak první sada (směr 0°) obsahuje pouze 4 vzorky, neboť první exemplář vyjel při pokusném testu z čelistí a byl nevratně zdeformován. Přetržené tyčky jsou opět doplněny dosud nezatíženým vzorkem pro názornou ukázkou velikosti výsledného natažení (červená kóta). Z obrázku je také patrné, že některé vzorky (ve všech třech směrech) praskly mimo orýsovanou oblast. Vpravo na obrázku Obr. 8.27 je ukázán detail lomové plochy jedné z přetržených zkušebních tyčí.



Obr. 8.27: Sada zkušebních tyčí a detail lomové plochy

Z naměřených dat byly v programu Microsoft Excel zhotoveny tahové diagramy. Bohužel jedinou zjistitelnou hodnotou napětí, vlivem průběhu zkoušky a tvaru diagramu, byla mez pevnosti R_m . Nepřítomnost průtahoměru na zařízení SOKOL 400 mělo za následek, že také deformace (tažnosti) nemohly být přesně zjištěny, kromě již zmíněné dopočítané tažnosti $A_{50 \text{ mm}}$. Výsledné diagramy jsou proto v souřadnicích $R = f(\varepsilon_{\text{celkové}})$, kde $\varepsilon_{\text{celkové}}$ je deformace části zkušební tyče mezi čelistmi trhacího stoje SOKOL 400 (vzdálenost čelistí před zkouškou cca 120 mm). Z výsledných mezí pevnosti a tažností byly nakonec dopočítány střední hodnoty a ty přehledně zpracovány v tabulce Tab. 8.5, kde je též pro jednotlivé veličiny uvedena směrodatná odchylka s a směrově střední hodnota x_s . Některé tažnosti nebyly opět brány v potaz při výpočtu středních hodnot vlivem porušení příslušných vzorků mimo orýsovanou oblast. K tabulce náleží také tahový diagram (Obr. 8.28), znázorňující vzorové křivky pro všechny tři měřené směry 0° , 45° a 90° .

Naměřená data jsou zobrazena ve výstupním protokolu v příloze PŘÍLOHA 3.



Obr. 8.28: Vzorový tahový diagram - 24000 mm/min

Tab. 8.5: Zjištěné hodnoty z tahové zkoušky

Docol 1200M $t = 2$ mm		Rychlost zatěžování 24000 mm/min						
		0°	s	45°	s	90°	s	x_s
R_m	[MPa]	1274,69	8,79	1252,40	9,83	1279,59	7,47	1264,77
$A_{50 \text{ mm}}$	[%]	4,36	2,55	4,34	0,56	4,60	1,15	4,41

8.2.4. Zkouška tahem - $t = 0,7$ mm

Jak již bylo uvedeno v úvodu kapitoly 8.2., rovinnost plechů Docol 1200M tloušťky 0,7 mm nebyla dobrá vlivem zvlnění (to je dobře vidět v levé části obrázku Obr. 8.29) a tudíž by bylo velmi obtížné zhotovit z takového polotovaru vzorky technologií řezání vodním paprskem. V důsledku nekonstantní vzdálenosti mezi tryskou a děleným materiálem by docházelo k značnému rozptylu vodního paprsku, případná regulace této hodnoty během procesu řezání by byla velmi komplikovaná, ne-li nemožná. Z tohoto důvodu byla nakonec pro zhotovení vzorků použita technologie řezání laserem, původně zamítnutá z obavy o přílišné tepelné ovlivnění materiálu. Zhotovení vzorků provedla, po jistých prvotních komplikacích, opět firma S-plasma s.r.o., tvar vzorků byl stejný jako je uveden na obrázku Obr. 8.11. Kvalita řezu byla velmi vysoká a tudíž nebylo zapotřebí následné obroušení funkčních ploch. Zhotovené vzorky byly opět použity pro zkoušky tahem rychlostí 10 mm/min a 600 mm/min. Následující obrázek Obr. 8.29 ukazuje (v levé části) značně zvlněný původní plech a (v pravé části) zhotovené vzorky všech tří směrů.

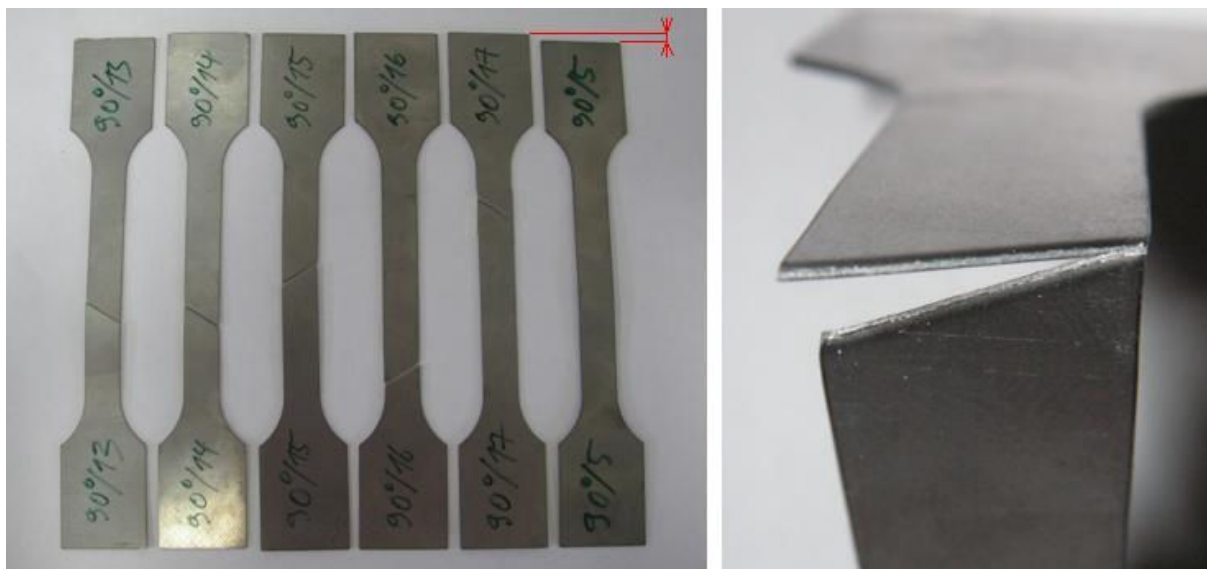


Obr. 8.29: Tabule plechu Docol 1200M $t = 0,7$ mm a hotové vzorky

a) Zkouška tahem - $t = 0,7$ mm - 10 mm/min

Postup měření této série zkoušek byl stejný jako u polotovaru tloušťky 2 mm a této rychlosti zatěžování. Počty vzorků byly obdobné a to směr 0° - 5 vzorků, směr 45° - 4 vzorky (menší celkový počet zhotovených vzorků) a směr 90° - 5 vzorků. Celkem bylo tedy zkoušeno 14 vzorků. Zjištěny byly základní mechanické veličiny ve všech směrech ($R_{p0,2}$, R_m , A_g , $A_{50\text{ mm}}$), ukazatele tvárnosti (UH , KUT , ZP) a následně dopočítány konstanty C a n . Taktéž byly zjištěny koeficienty normálové anizotropie r_α s použitím stejného zařízení a postupu jako

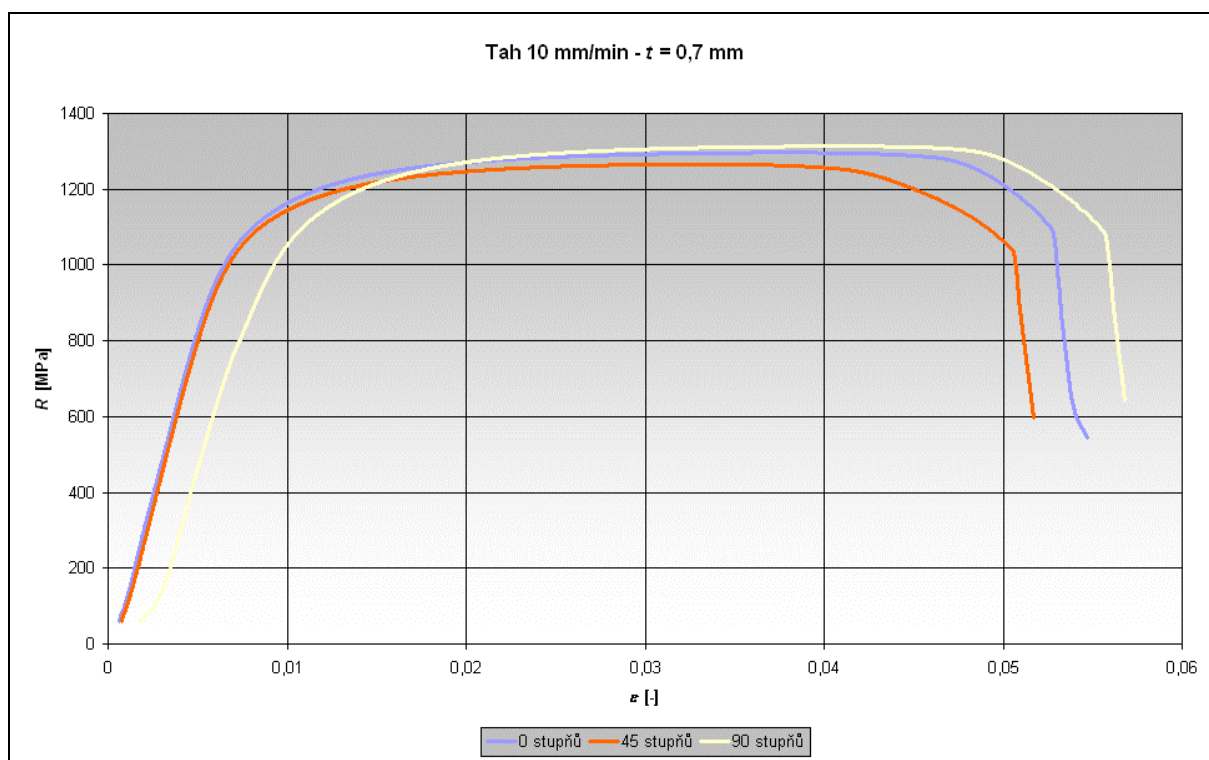
v případě polotovaru tloušťky 2 mm. Výsledné střední hodnoty zjištěných mechanických veličin a konstant jsou uvedeny v tabulce Tab. 8.6, kde jsou též uvedeny i příslušné směrodatné odchylky a směrově střední hodnoty. K tabulce je taktéž přiložen vzorový tahový diagram (Obr. 8.31), znázorňující vzorové křivky pro tři měřené směry 0° , 45° a 90° . Následující obrázek Obr. 8.30 ukazuje ve své levé části řadu 6 vzorků jednoho směru, prvních 5 vzorků (počítáno zleva) je po přetržení, vzorek poslední (vpravo) je dosud nezatížen. Červená kóta opět ukazuje velikost výsledného prodloužení tyčí. Pravá část obrázku představuje detail lomové plochy jednoho z měřených vzorků.



Obr. 8.30: Sada zkušebních tyčí a detail lomové plochy

Tak jako v předchozích měřeních (tloušťka 2 mm) docházelo i zde k občasnému porušení vzorků mimo oblast měřenou průtahoměrem, jak je patrné i z předchozího obrázku Obr. 8.30. Výsledné střední hodnoty tažností (A_g a $A_{50\text{ mm}}$), uvedené v tabulce Tab. 8.6, byly proto počítány pouze z hodnot vzorků porušených v měřené oblasti, na výsledné střední hodnoty napětí neměl tento jev pochopitelně vliv.

Naměřená data jsou zpracována ve formě výstupního protokolu v příloze PŘÍLOHA 4.



Obr. 8.31: Vzorový tahový diagram - 10 mm/min

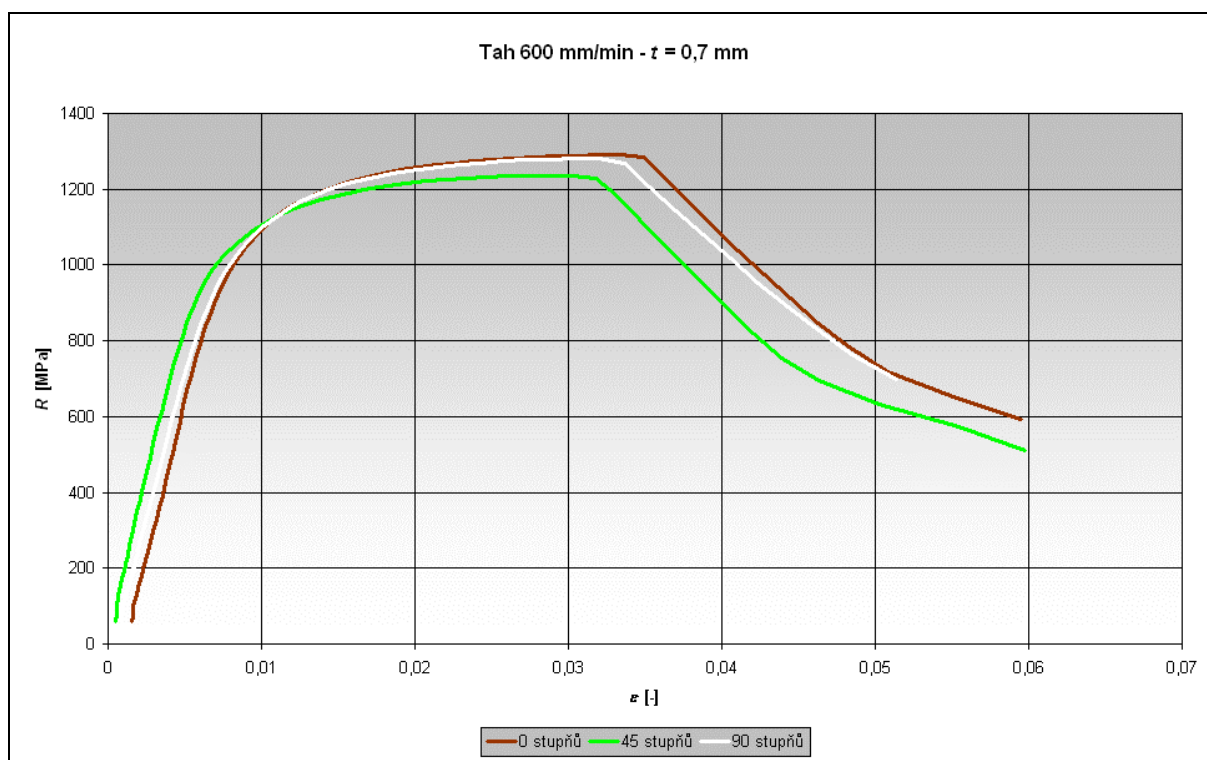
Tab. 8.6: Zjištěné hodnoty z tahové zkoušky

Docol 1200M $t = 0,7$ mm		Rychlost zatěžování 10 mm/min						
		0°	s	45°	s	90°	s	x_s
$R_{p0,2}$	[MPa]	1113,65	21,82	1099,13	17,92	1122,85	30,00	1108,69
R_m	[MPa]	1290,04	22,79	1267,62	4,52	1314,79	4,93	1285,01
$A_{50\text{ mm}}$	[%]	5,32	0,37	5,01	0,30	4,89	0,25	5,05
A_g	[%]	3,15	0,21	2,65	0,13	2,89	0,19	2,84
UH	[-]	0,863	0,012	0,867	0,012	0,854	0,021	0,863
KUT	[-]	0,046	0,001	0,043	0,001	0,042	0,001	0,044
ZP	[MPa]	7,031	0,659	6,324	0,567	7,035	0,983	6,679
C	[MPa]	1638,88	34,07	1599,70	26,36	1693,16	22,68	1632,86
n	[-]	0,061	0,005	0,058	0,006	0,064	0,005	0,060
R^2	[-]	0,992	0,002	0,991	0,002	0,987	0,004	0,991
r_a	[-]	1,290	0,358	1,667	0,567	1,103	0,589	1,432

b) Zkouška tahem - $t = 0,7 \text{ mm}$ - 600 mm/min

Pro tuto rychlost zatěžování byly použity zkušební tyče stejného provedení jako v předchozí podkapitole i stejný postup měření. Zkoušen byl také stejný počet vzorků (0° - 5 ks, 45° - 4 ks, 90° - 5 ks na směr válcování), celkem tedy 14. Střední hodnoty napětí a tažností (u vzorků porušených v měřené oblasti) jsou společně s dopočítanými konstantami UH , KUT , ZP , C , n a statistickými veličinami uvedeny v tabulce Tab. 8.7. K tabulce je přiložen tahový diagram (Obr. 8.32) se třemi vzorovými průběhy pro tři měřené směry 0° , 45° a 90° .

Zjištěné hodnoty jsou zpracovány ve formě protokolu v příloze PŘÍLOHA 5.



Obr. 8.32: Vzorový tahový diagram - 600 mm/min

Tab. 8.7: Zjištěné hodnoty z tahové zkoušky

Docol 1200M $t = 0,7$ mm		Rychlost zatěžování 600 mm/min						
		0°	s	45°	s	90°	s	x_s
$R_{p0,2}$	[MPa]	1095,15	23,88	1061,39	17,90	1089,14	13,47	1076,77
R_m	[MPa]	1288,96	12,88	1235,60	25,59	1289,37	9,19	1262,38
$A_{50\text{ mm}}$	[%]	5,83	0,50	5,66	0,65	4,75	0,38	5,47
A_g	[%]	2,79	0,34	2,37	0,34	1,84	0,28	2,35
UH	[-]	0,849	0,015	0,859	0,004	0,845	0,011	0,853
KUT	[-]	0,050	0,001	0,049	0,001	0,040	0,001	0,047
ZP	[MPa]	8,475	0,807	7,391	0,358	7,133	0,511	7,597
C	[MPa]	1707,58	29,20	1594,00	43,99	1831,40	81,53	1681,75
n	[-]	0,071	0,006	0,064	0,003	0,089	0,012	0,072
R^2	[-]	0,984	0,002	0,988	0,003	0,989	0,002	0,987

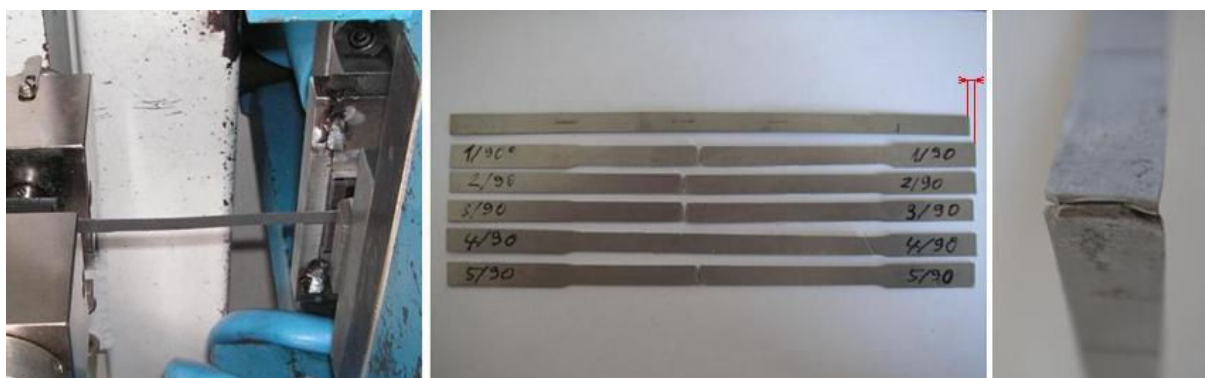
c) Zkouška tahem - $t = 0,7$ mm - 24000 mm/min

Vzorky pro tuto sérii testů byly, taktéž jako u plechu $t = 2$ mm a této rychlosti zatěžování, zhotoveny stříháním na tabulových nůžkách. Z důvodu menší tloušťky polotovaru byly tentokrát zhotoveny vzorky šířky cca 7 mm, tedy o průřezu $S_0 \cong 5 \text{ mm}^2$. Všechny tyto vzorky byly následně jemně ofrézovány na funkčních plochách. Ukázka těchto vzorků spolu s porovnáním jejich velikosti se vzorky tloušťky 2 mm a s normalizovanou zkušební tyčí použitou v předešlých měřeních je v levé části obrázku Obr. 8.33. V pravé části tohoto obrázku je poté zobrazena jedna sada zkušebních tyčí (tloušťky 0,7 mm pro rychlost 24000 mm/min) s jejich jasně patrným zvlněním.



Obr. 8.33: Porovnání velikosti tahových tyčí a jedna sada vzorků

Zhotoveno bylo 5 vzorků v každém směru (0° , 45° a 90° na směr válcování), celkem tedy 15 kusů. Následující obrázek Obr. 8.34 ukazuje ve své levé části zkušební tyč upnutou v čelistech stroje SOKOL 400, prostřední část představuje opět řadu 6 vzorků jednoho směru, prvních 5 vzorků (počítáno zdola) je po přetržení, vzorek poslední (nahore) je dosud nezatížen. Červená kóta opět ukazuje velikost výsledného prodloužení tyčí. Pravá část obrázku představuje detail lomové plochy jednoho z měřených vzorků.

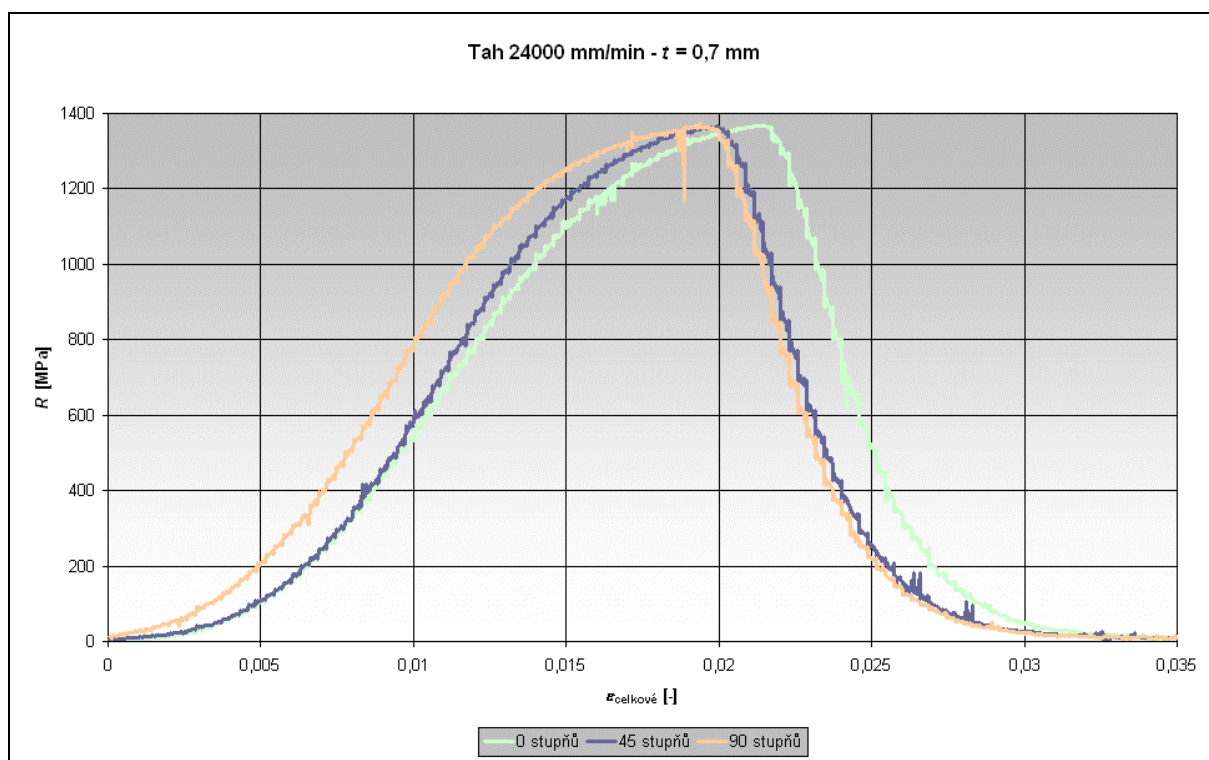


Obr. 8.34: Tyč upnutá v čelistech a přetržené vzorky s ukázkou lomové plochy



Průběh celého měření i vyhodnocení dat proběhl obdobně jako tomu bylo u tloušťky materiálu 2 mm a této rychlosti zatěžování. V programu Microsoft Excel byly z naměřených dat zhotoveny tahové diagramy ve tvaru $R = f(\epsilon_{\text{celkové}})$ a byly také dopočítány hodnoty tažností $A_{50 \text{ mm}}$. Ze zjištěných mezí pevnosti a tažností (u vzorků porušených v orýsované oblasti) byly také dopočítány střední hodnoty a ty přehledně zpracovány v tabulce Tab. 8.8, kde je též pro jednotlivé veličiny uvedena směrodatná odchylka s a směrově střední hodnota x_s . K tabulce náleží tahový diagram (Obr. 8.35) znázorňující vzorové křivky pro všechny tři měřené směry 0° , 45° a 90° .

Naměřená data jsou zpracována ve výstupním protokolu v příloze PŘÍLOHA 6.



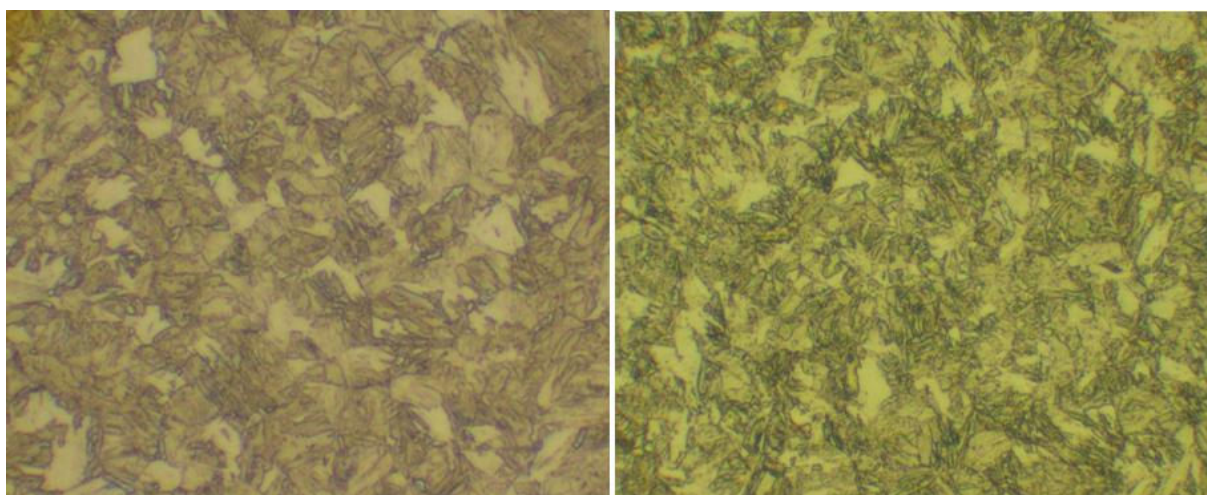
Obr. 8.35: Vzorový tahový diagram - 24000 mm/min

Tab. 8.8: Zjištěné hodnoty z tahové zkoušky

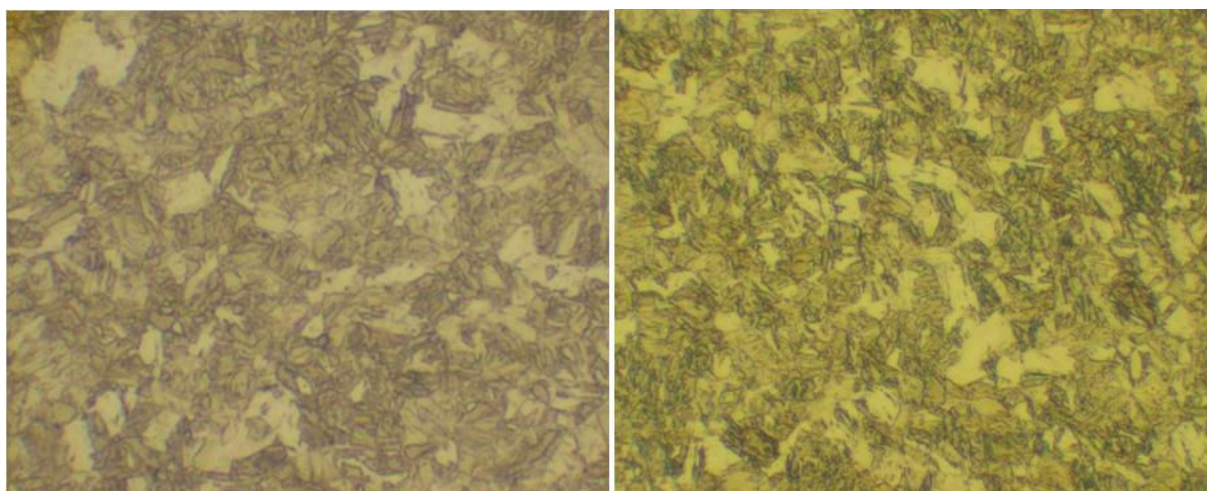
Docol 1200M $t = 0,7$ mm		Rychlost zatěžování 24000 mm/min						
		0°	s	45°	s	90°	s	x_s
R_m	[MPa]	1368,48	10,60	1336,01	21,56	1372,72	9,39	1353,31
$A_{50 \text{ mm}}$	[%]	4,42	0,16	4,44	0,31	4,81	0,61	4,52

8.2.5. Dílčí zhodnocení

Ze vzájemného porovnání vnitřních struktur dvou tloušťek (2 mm a 0,7 mm) materiálu Docol 1200M vyplývá, že mezi strukturami (zjištěnými ze vzorků zatížených stejnými podmínkami) nejsou velké rozdíly. Tento jev byl předpokládán, neboť se v obou případech jedná o totožný základní materiál, pouze o jiné tloušťce. Při bližším pohledu na obrázky Obr. 8.36 a Obr. 8.37, znázorňující struktury zkoušených materiálů před deformací (levá část obrázků) a po deformaci (pravá část obrázků), je také zřejmé, že základní martenziticko-feritická struktura nedoznala po zatížení radikálních změn, pouze došlo k přeměně malé části feritu na martenzit, a tím k mírnému nárůstu poměru této fáze ve výsledné struktuře.



Obr. 8.36: Porovnání nedeformované struktury materiálu Docol 1200M tloušťky 2 mm se strukturou po deformaci – zvětšeno 800x



Obr. 8.37: Porovnání nedeformované struktury materiálu Docol 1200M tloušťky 0,7 mm se strukturou po deformaci – zvětšeno 800x

Výsledné mechanické hodnoty, zjištěné z tahových zkoušek obou tloušťek materiálu a všech tří rychlostí zatěžování, jsou přehledně zpracovány v tabulce Tab. 8.9 ve tvaru směrově středních mechanických hodnot x_s .

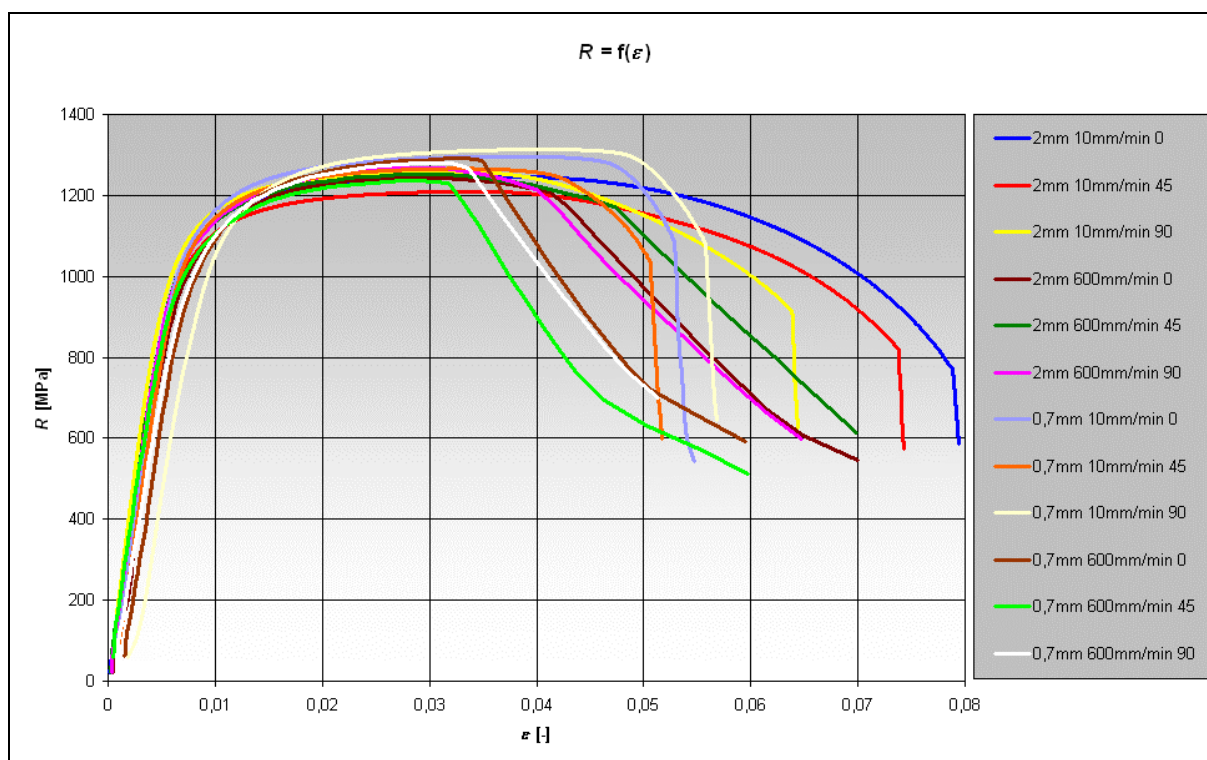
Tab. 8.9: Porovnání výsledných směrově středních mechanických hodnot

Docol 1200M		$t = 2 \text{ mm}$			$t = 0,7 \text{ mm}$		
Rychlost zatěžování		$10 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$	$600 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$	$24000 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$	$10 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$	$600 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$	$24000 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$
$R_{p0,2}$	[MPa]	1069,98	1062,53	-	1108,69	1076,77	-
R_m	[MPa]	1233,03	1246,04	1264,77	1285,01	1262,38	1353,31
$A_{50 \text{ mm}}$	[%]	6,92	6,58	4,41	5,05	5,47	4,52
A_g	[%]	2,64	2,38	-	2,84	2,35	-
UH	[-]	0,868	0,853	-	0,863	0,853	-
KUT	[-]	0,060	0,056	-	0,044	0,047	-
ZP	[MPa]	8,477	9,070	-	6,679	7,597	-
C	[MPa]	1539,53	1586,73	-	1632,86	1681,75	-
n	[-]	0,055	0,059	-	0,060	0,072	-
R^2	[-]	0,992	0,986	-	0,991	0,987	-
r_a	[-]	0,682	-	-	1,432	-	-

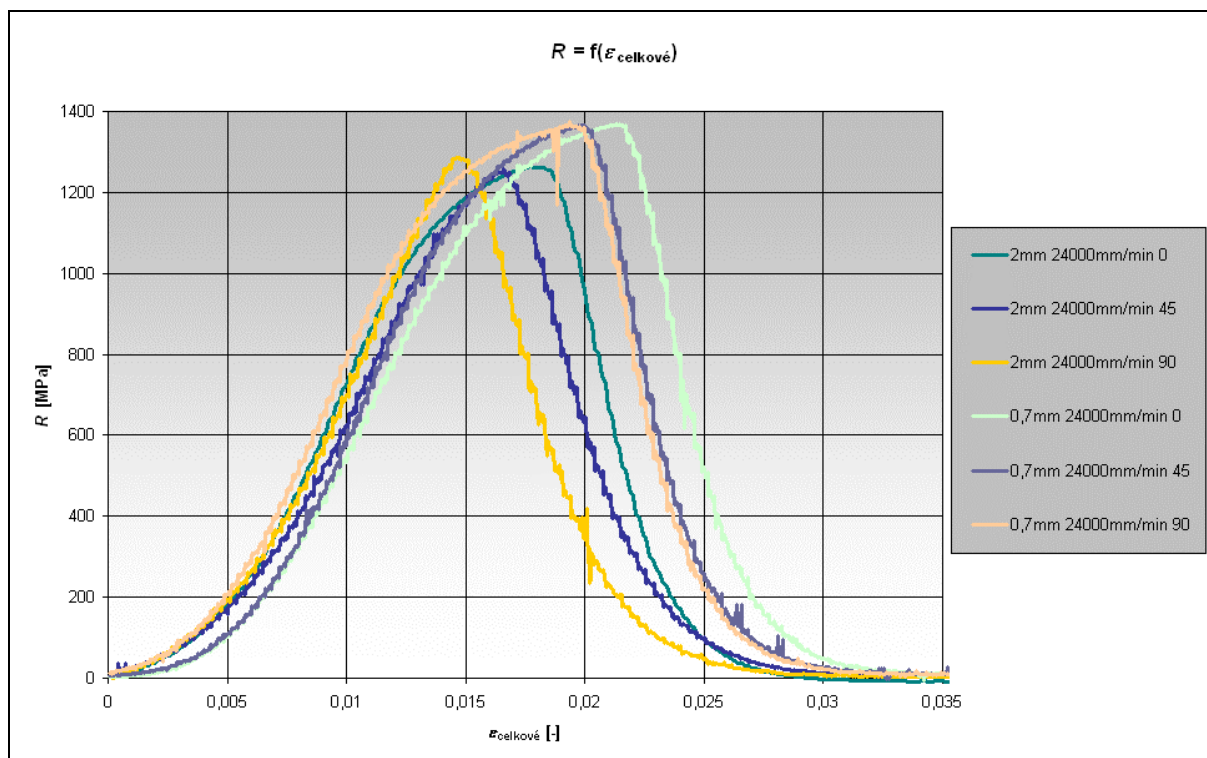
Z výsledků je patrné, že hodnoty mezí kluzu (rozmezí zjištěných hodnot $R_{p0,2} = 1062,53 \div 1108,69 \text{ MPa}$) mají u obou tloušťek tendenci k poklesu, zatímco meze pevností ($R_m = 1233,03 \div 1353,31 \text{ MPa}$) s mírnými výkyvy rostou. Pokud porovnáme jednotlivé hodnoty odpovídajících si napětí obou provedení materiálu Docol 1200M zjistíme, že jak u meze kluzu, tak i meze pevnosti vykazuje v průměru vyšší hodnoty tenčí plech. U mezí kluzu a rychlosti zatěžování 10 mm/min činí rozdíl napětí přibližně 40 MPa , s rostoucí rychlostí rozdíl klesá až na přibližně 14 MPa u rychlosti 600 mm/min . Meze pevnosti vykazují nárůst rozdílu z hodnoty cca 50 MPa u nejnižší rychlosti až po téměř 90 MPa u rychlosti nejvyšší. Podobný, avšak strmější pokles než měly meze kluzu, je vidět z hodnot obou měřených tažností. V případě tažností ($A_{50 \text{ mm}} = 4,41 \div 6,92 \%$) jsou dosaženy v průměru vyšší hodnoty u polotovaru $t = 2 \text{ mm}$, zatímco u homogenní tažnosti ($A_g = 2,35 \div 2,84 \%$) byly u obou polotovarů a stejných rychlostí zatěžování zjištěny téměř identické hodnoty. U tažnosti $A_{50 \text{ mm}}$ je také velmi viditelný pokles hodnot mezi rychlostmi 600 mm/min a 24000 mm/min , který činí u tenčího plechu cca 17% a u druhého dokonce 33% .

Z ukazatelů tváritelnosti bych se zmínil o zásobě plasticity ($ZP = 6,679 \div 9,070$ MPa). Je vidět, že její velikost roste spolu s tloušťkou polotovaru a také s rychlostí zatěžování, přesto jsou její hodnoty ve všech měřených případech nízké, převážně díky malým hodnotám tažností. Modul monotónního zpevnění ($C = 1539,53 \div 1681,75$ MPa) dosahuje velmi vysokých hodnot (zejména u tenčího plechu), zatímco exponent deformačního zpevnění ($n = 0,055 \div 0,072$) má hodnoty velmi nízké. Pro jeho zvětšení by bylo zapotřebí zvolit jinou mez kluzu (než $R_{p0,2}$), například R_{p1} , a této nové hodnotě následně přizpůsobit použitou aproximaci. Poslední zjištěnou hodnotou byl koeficient normálové anizotropie ($r_a = 0,682 \div 1,432$). Jeho hodnota je u tloušťky 2 mm velmi nízká, zatímco u plechu 0,7 mm dosahuje více než dvojnásobné hodnoty.

Pro představu o tvaru tahových křivek a možnosti jejich vizuálního porovnání jsou dále přiloženy dva obrázky znázorňující vzorové tahové diagramy. Na obrázku Obr. 8.38 jsou znázorněny tahové křivky obou tlouštěk materiálu a rychlosti zatěžování 10 mm/min a 600 mm/min, na druhém obrázku Obr. 8.39 rychlosti zatěžování 24000 mm/min. Ke každé tloušťce a rychlosti zatěžování (u obou obrázků) náleží vždy tři vzorové křivky pro tři směry 0° , 45° a 90° . Bohužel nemohl být vytvořen jeden komplexní diagram zobrazující křivky všech měřených rychlostí z důvodů uvedených již dříve v kapitole 8.2.3. V prvním případě (Obr. 8.38) je velmi dobře vidět jak se lišil tvar křivek zjištěných za rychlosti 10 mm/min a rychlosti 600 mm/min. Do meze pevnosti jsou u obou typů plechů (všech směrů odebrání) tahové křivky téměř totožné, zatímco po překročení této hodnoty jsou mezi nimi patrné jasné rozdíly. U vyšší rychlosti došlo vždy po překročení hodnoty R_m k strmému, téměř lineárnímu, poklesu napětí v závislosti na dráze, a to u obou zkoušených rozměrů plechů. Ve druhém případě (Obr. 8.39) mají tahové křivky neobvyklý tvar, který je dán použitým atypickým zkušebním zařízením SOKOL 400 (prioritně určeným pro tribologické testování), extrémní hodnotou zvolené rychlosti zatěžování 24000 mm/min (tj. 400 mm/s) a také absencí průtahoměru. Všechny křivky zjištěné touto rychlostí vykazují v počátku pomalý náběh napětí, způsobený zrychlením příčnicku z klidu do požadované maximální rychlosti, které je dosaženo ve velmi krátkém, nikoliv však nulovém, čase. Po této rozběhové etapě následuje klasický průběh až do hodnoty meze pevnosti. Překročením této hodnoty dochází k strmému poklesu napětí až na nulovou hodnotu. K přetržení tyče nastává téměř současně s překročením hodnoty R_m a dále klesající průběh grafu po této hodnotě je dán nastavením vstupních parametrů průběhu zkoušky. V našem případě nebyl konec zkoušky řízen poklesem napětí o určitou hodnotu, jak tomu nejčastěji bývá, ale předem danou drahou příčnicku.



Obr. 8.38: Porovnání vzorových tahových křivek ve třech osách pro tloušťku materiálu 2 mm a 0,7 mm a rychlosti zatěžování 10 mm/min a 600 mm/min



Obr. 8.39: Porovnání vzorových tahových křivek ve třech osách pro tloušťku materiálu 2 mm a 0,7 mm a rychlost zatěžování 24000 mm/min

9. DIAGRAMY MEZNÍCH PŘETVOŘENÍ

Bližší charakteristikou DMP, způsoby jejich zjišťování a vyhodnocení, se zabývala kapitola 4.4. v teoretické části této disertační práce. V této kapitole je proto podrobněji probrán již vlastní experiment, a to od výroby zkušebních vzorků pro zjištění KMP za různých rychlostí tváření, přes výrobu deformačních sítí a zatěžování vzorků, až po konečné vyhodnocení deformovaných elementů a sestrojení hledaných diagramů mezních přetvoření.

9.1. Postup experimentu

Určení diagramů mezních přetvoření bylo v našem případě provedeno metodou vypínání tvarových přístřihů polokulovým tažníkem. Byly sestrojeny zjednodušené DMP pomocí pěti sad vzorků, představujících pět deformačních stop. Byly to rondely o průměru 210 mm s kruhovými úsečemi stejného poloměru měnícími šířku vzorku ve střední části od 30 mm až do 210 mm (plný rondel). Každá jednotlivá sada se tedy skládala ze vzorku o rozměru 30, 75, 120, 160 a 210 mm (viz obrázek Obr. 9.1).

9.1.1. Příprava zkušebních vzorků

Plech z materiálu Docol 1200M obou zkoušených tloušťek (2 mm a 0,7 mm) byly, tak jako v případě tahových tyčí pro statickou zkoušku tahem, převezeny do firmy S-plasma s.r.o. pro zhotovení vzorků technologií CNC řezáním vodním paprskem. Řezací plán byl vytvořen v programu AutoCad a byl dodán firmě současně s materiálem. Všechny vzorky byly na svém okraji ve směru 0° na směr válcování označeny malým vybráním. Bylo počítáno se zhotovením následujícího počtu vzorků. Pro každou tloušťku materiálu měly být sestrojeny minimálně 3 diagramy mezních přetvoření (pro tři různé rychlosti), pro každý diagram bylo třeba 5 sad po 5 vzorcích. Celkem tedy vychází minimální počet 150 potřebných vzorků (75 od každé tloušťky).

a) Zhotovení vzorků pro DMP - $t = 2$ mm

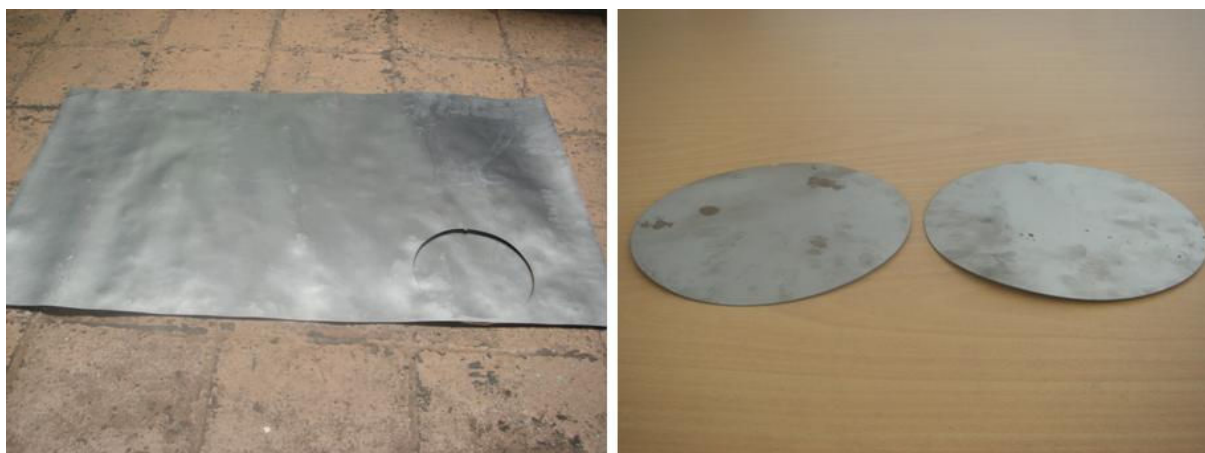
Zhotovení vzorků z plechů tloušťky 2 mm proběhlo bez komplikací, povrchová koroze vzniklá ve vodní lázni byla obroušena smirkovými kotouči (viz. úprava tahových tyčí kapitola 8.2.3 a obrázek Obr. 8.13). Na následujícím obrázku 9.1 jsou v levé části ukázány vzorky před očištěním a v pravé části již jedna obroušená sada s rozměry střední části.



Obr. 9.1: Nařezané vzorky a obroušená zkušební sada s rozměry

b) Zhotovení vzorků pro DMP - $t = 0,7$ mm

Na tomto místě je bohužel nutné konstatovat, že zhotovení vzorků pro zjištění DMP z polotovaru tloušťky 0,7 mm neproběhlo dle původních představ. Při vlastní výrobě vzorků řezáním vodním paprskem se vyskytly obdobné problémy jako při zhotovení tahových tyčí (viz. kapitola 8.2.4). Vlivem vysokého zvlnění plechů nebyla firma (S-plasma s.r.o.) schopna touto technologií vzorky zhotovit, a proto se pokusila, stejně jako u již zmíněných tahových tyčí, použít technologii řezání laserovým paprskem. Po opětovných pokusech však ani za použití této technologie nebyly vzorky zhotoveny, neboť při přejezdech řezací hlavy docházelo k nekontrolovaným posunům zvlněného plechu. Na obrázku Obr. 9.2 je vlevo zobrazen jeden ze dvou plechů, u nichž byl proveden pokus o vyříznutí vzorků laserem a vpravo jediné dva zhotovené rondely.

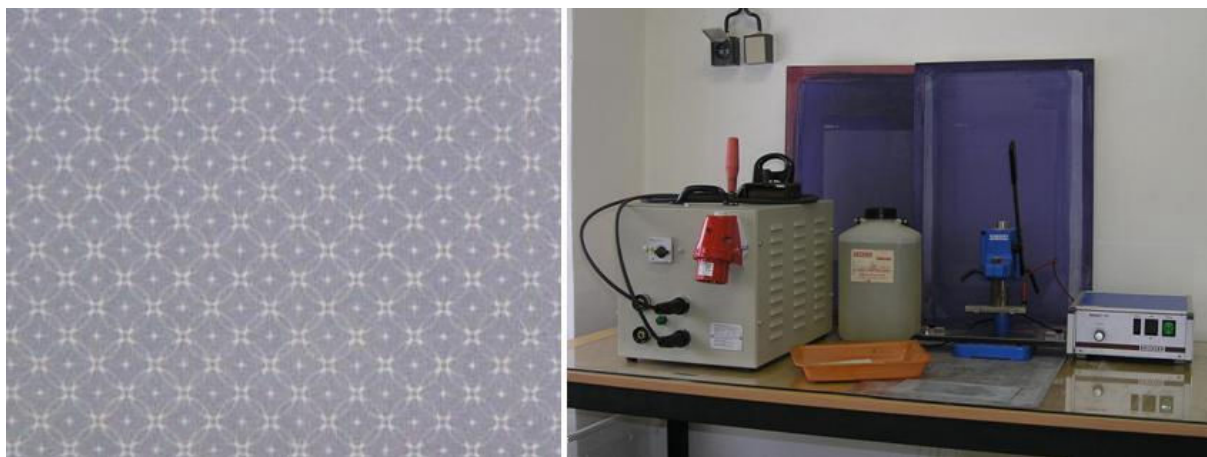


Obr. 9.2: Pokus o zhotovení vzorků a výsledné rondely

Jelikož v blízkém okolí Technické Univerzity v Liberci není jiná firma schopná případně vyrobit z pevnostních plechů požadované vzorky, je bohužel tato práce ve své experimentální části ochuzena o původně plánované tři diagramy mezních přetvoření (pro tři rychlosti zatěžování a tuto tloušťku plechu 0,7 mm) a jejich výsledné porovnání se zbývajících třemi DMP zhotovenými z polotovaru tloušťky 2 mm.

9.1.2. Nanesení deformační sítě

Pro potřeby experimentu byla z důvodu dostupnosti a jednoduchosti použita metoda elektrochemického (elektrolytického) leptání. Metoda je relativně snadno proveditelná v laboratorních podmínkách i v podmínkách lisovny a spočívá ve výrobě deformačních sítí elektrolytickým leptáním vzorku přes speciální textilní šablonu s vytvořeným požadovaným obrazem sítě. Při použití této metody odpadá případná složitá manipulace s velkými přístřihy. Vzhledem k velikosti přístřihů a charakteru materiálu (vysokopevnostní ocel s nižší tažností) byla vybrána šablona s jemnější textilní sítí firmy Erichsen s kruhovými elementy o vnějším průměru 2 mm a středovými značkami. Na obrázku Obr. 9.3 je znázorněn detail zvolené sítě a zařízení pro její vyleptání.



Obr. 9.3: Detail deformační sítě a zařízení pro její výrobu

Postup výroby sítě byl následující. Důkladně odmaštěný vzorek, ležící na vodivé podložce připojené k jedné elektrodě zdroje, byl překryt šablonou se sítí. Průchodem elektrického proudu z druhé elektrody (kterou tvořil přítlačný váleček), přes savý materiál napuštěný elektrolytem (firmy Erichsen) a přiloženou šablonu byla do povrchu vzorku vyleptána deformační síť. Okamžitě po vytvoření sítě následovalo očištění povrchu

neutralizačním roztokem Neutralyt taktéž od firmy Erichsen a nanesení tenkého olejového filmu z důvodu zabránění koroze elektrolytem porušeného povrchu. Tento postup byl užit na všech vzorcích. Na obrázku Obr. 9.4 je znázorněna jedna sada vzorků s vytvořenou deformační sítí a v pravé části zvětšený detail vyleptané sítě.



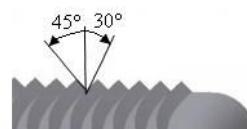
Obr. 9.4: Sada vzorků pro zjištění DMP s vyleptanou deformační sítí a detail sítě

9.1.3. Tažení vzorků

Jak již bylo zmíněno v kapitole 9.1.1, bylo rozhodnuto o zhotovení tří diagramů mezních přetvoření lišících se rychlostí zatěžování sad vzorků. Pro první diagram DMP1 byla zvolena rychlost $v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$, pro diagram DMP2 rychlost $v_2 = 17,78 \text{ m.s}^{-1}$ a pro poslední DMP3 rychlost $v_3 = 22,5 \text{ m.s}^{-1}$. Různých rychlostí bylo docíleno užitím různých zařízení a postupů, což je podrobněji popsáno v následujících podkapitolách.

a) DMP1 - $v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$

Pro tažení vzorků prvního diagramu mezních přetvoření byl použit modernizovaný hydraulický lis CBA 300/63. Na lisu byl instalován jednoúčelový tažný nástroj pro vypínání tvarových přístřihů. Horním beranem byl vzorek přidržován v nástroji a vypínání bylo realizováno pomocí polokulového tažníku upnutého do spodního hydraulicky ovládaného pístu, který slouží při klasickém tažení jako vyhazovač. Rychlost tohoto pístu byla právě zmíněných $2,08 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$. Následující obrázek Obr. 9.5 ukazuje rozložený nástroj upnutý na hydraulickém lisu se spodním tažníkem v horní poloze a detail tažnice.



Obr. 9.5: Rozložený tažný nástroj a detail tažnice

Na počátku měření byl nejprve každý vzorek opatřen ze spodní strany dvojitou vrstvou lubrikantu (AP193-607117 od firmy PFINDER CHEMIE) a polyethylenové fólie pro eliminaci tření mezi tažníkem a vzorkem (lom pak nastává na vrcholku kulového vrchlíku vzorku). Vzorek byl vložen sítí nahoru mezi dva drážkované prstence, z nichž jeden sloužil jako tažnice, a stlačen horní částí nástroje upnutého k beranu lisu. Následně bylo realizováno vypínání zvolenou rychlostí až do počátku vzniku trhliny. Po tažení došlo k odjetí beranu do horní úvrati, rozložení nástroje a vyndání zkušebního vzorku, který byl následně očištěn od zbylého maziva a tažných fólií. Všechny takto deformované vzorky prvního DMP byly přeneseny do laboratoře pro vyhodnocení deformačních sítí. Následující obrázek Obr. 9.6 znázorňuje jednu sadu deformovaných vzorků a detail vzniklé trhliny.



Obr. 9.6: Sada deformovaných vzorků a detail trhliny

b) DMP2 - $v_2 = 17,78 \text{ m.s}^{-1}$ a DMP3 - $v_3 = 22,5 \text{ m.s}^{-1}$

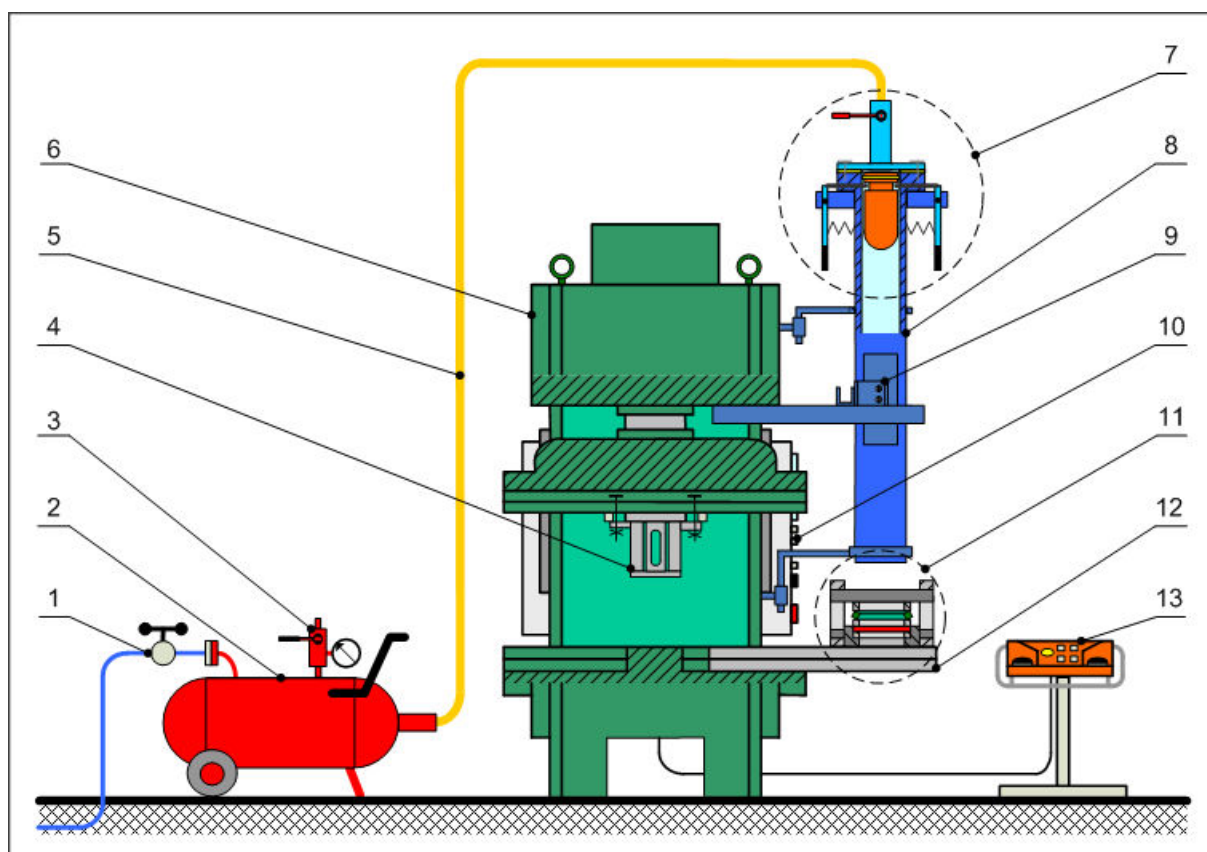
Pro možnost posouzení vlivu rychlosti zatěžování na tvar DMP u zvoleného materiálu bylo nutné provést také zkoušky za vysokých rychlostí (značně převyšujících rychlost DMP1). Zvoleny byly dvě rychlosti, a to $v_2 = 17,78 \text{ m.s}^{-1}$ (64 km.h^{-1}), jejíž velikost odpovídá čelní bariérové zkoušce a rychlost $v_3 = 22,5 \text{ m.s}^{-1}$ (81 km.h^{-1}), jakožto předpokládaná krajní mez při nárazu vozidla do překážky. Současně musely být obě rychlosti bezpečně proveditelné na zkušebních zařízeních katedry, což zvolené hodnoty splňují. Pro vlastní experiment byl použit rychlostní přípravek upevněný na modernizovaném hydraulickém lisu CBA 300/63. Celé zařízení je znázorněno na obrázku Obr. 9.7.



Obr. 9.7: Hydraulický lis CBA 300/63 s upnutým rychlostním dělem

- **konstrukce rychlostního přípravku a postup měření**

Sestava rychlostního přípravku se skládá z několika hlavních částí, jejichž schematické rozmístění je zobrazeno na následujícím obrázku Obr. 9.8.

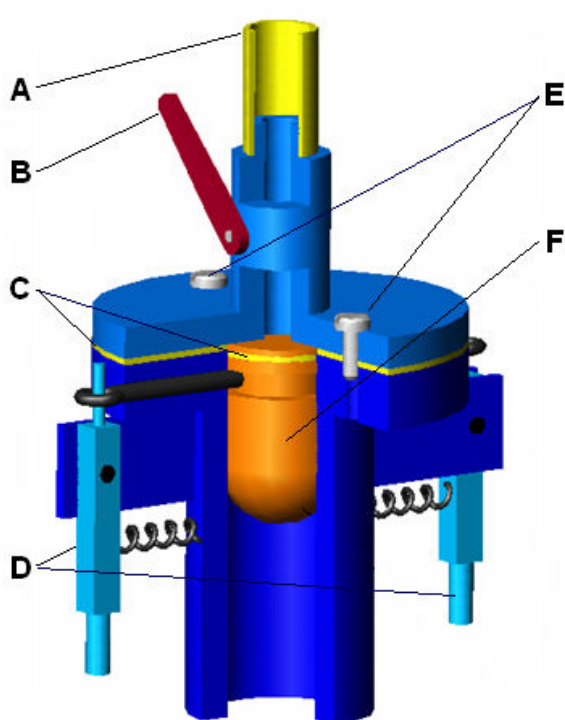


Obr. 9.8: Schéma rychlostního zařízení

Vysvětlivky k pozicím na obrázku Obr. 9.8:

- 1 ... Přívod vzduchu z centrálního zásobníku (cca 30 m³ $p_{\max} = 0,8$ MPa) přes redukční ventil do tlakové nádoby.
- 2 ... Pojízdňá tlaková nádoba.
- 3 ... Manometr pro nastavení požadovaného tlaku a výpustný ventil.
- 4 ... Nástroj upnutý k beranu a sloužící ke stlačení talířové pružiny rychlostního nástroje.
- 5 ... Hadice pro dopravu vzduchu mezi tlakovou nádobou a zkušebním přípravkem.
- 6 ... Modernizovaný hydraulický lis CBA300/63.
- 7 ... Hlavice se vzduchovým ventilem a utěsněný tažník se spouštěcím mechanismem.
- 8 ... Trubka rychlostního přípravku.
- 9 ... Hlavní ukotvení rychlostního děla k lisu.
- 10 ... Hlavní ovládací panel lisu.
- 11 ... Stlačený a vysunutý nástroj s bočnicemi držícími v předpětí talířovou pružinou.
- 12 ... Vodící T profily držící nástroj pod trubkou.
- 13 ... Mobilní ovládací pult lisu.

Experimentální zařízení vstřeluje tažník do zkušební vzorku za pomoci stlačeného vzduchu, a tím docílí vysokých testovacích rychlostí a dopadových energií. Rychlost tažníku je regulována nepřímo, a to hodnotou tlaku nastavenou redukčním ventilem tlakové nádoby. Určení přesných hodnot rychlostí je blíže popsáno v další podkapitole nazvané „stanovení rychlosti tažníku“. Dopadovou rychlost a energii tažníku je možno měnit velikostí tlaku vzduchu nebo použitím tažníků s různou hmotností. Hlavní částí pneumatického děla je trubka upnutá k hydraulickému lisu. Její horní konec je opatřen hlavicí s přívodem tlakového vzduchu přes ovládací ventyl a spouštěcím zařízením tažníku. Detail hlavice (viz také pozice 7 na Obr. 9.8) je ukázán na obrázku Obr. 9.9.

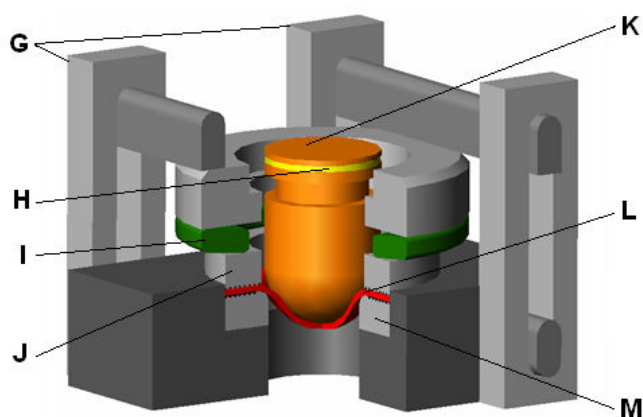


Obr. 9.9: Detail hlavice rychlostního děla

Vysvětlivky k pozicím na obrázku Obr. 9.9:

- A ... Hadice přivádějící vzduch z tlakové nádoby.
- B ... Spouštěcí páka vzduchového ventilu.
- C ... Těsnění mezi trubkou a hlavicí a těsnění tažníku.
- D ... Spouštěcí páky s pojistnými pružinami a aretačními kolíky držícími tažník.
- E ... Šrouby kotvící a utěsňující hlavicí k tělesu trubky.
- F ... Utěsněný tažník v zaaretované poloze.

Pod trubkou se nachází vlastní nástroj držený dvěma T profily zasunutými v pracovním stolu hydraulického lisu. Konstrukce rychlostního nástroje je zcela rozebíratelná, skládající se ze základního bloku opatřeného uprostřed otvorem pro průchod tažníku. Do této základní desky je souose s otvorem vkládán kalený rýhovaný prstenec s tažnou hranou. Mezi tento kroužek, plnící funkci tažnice a přidržovací prstenec je vkládán vzorek. Celý nástroj je v předpětí držen pomocí talířové pružiny fixované ve stlačeném stavu čtyřmi bočnicemi a dvěma příčníky. Předepjatá talířová pružina dosahuje při maximálním stlačení jmenovité síly 2780 kN, což je u většiny vzorků dostačující hodnota pro správnou funkci přidržovače. Provedení celého rychlostního nástroje s vloženým vzorkem (viz také pozice 11 na Obr. 9.8) je detailně znázorněno na obrázku Obr. 9.10.



Obr. 9.10: Detail nástroje použitého pro rychlostní zkoušky

Vysvětlivky k pozicím na obrázku Obr. 9.10:

G ... Bočnice s vloženými profily držícími celý nástroj v předepjatém stavu.

H ... Těsnění tažníku (viz také pozice C na předchozím obrázku Obr. 9.9).

I ... Talířová pružina vytvářející předpětí v nástroji.

J ... Drážkovaný prstenec sloužící jako přidržovač vzorku.

K ... Tažník znázorněný v dolní poloze při zatěžování vzorku.

L ... Deformovaný vzorek.

M ... Druhý drážkovaný prstenec mající funkci tažnice.

Vlastní měření probíhalo takto. Po vložení vzorku (opatřeného opět dvěma vrstvami fólií a maziva) na tažnici (deformační síť směrem dolů) byl svrchu přiložen druhý drážkovaný

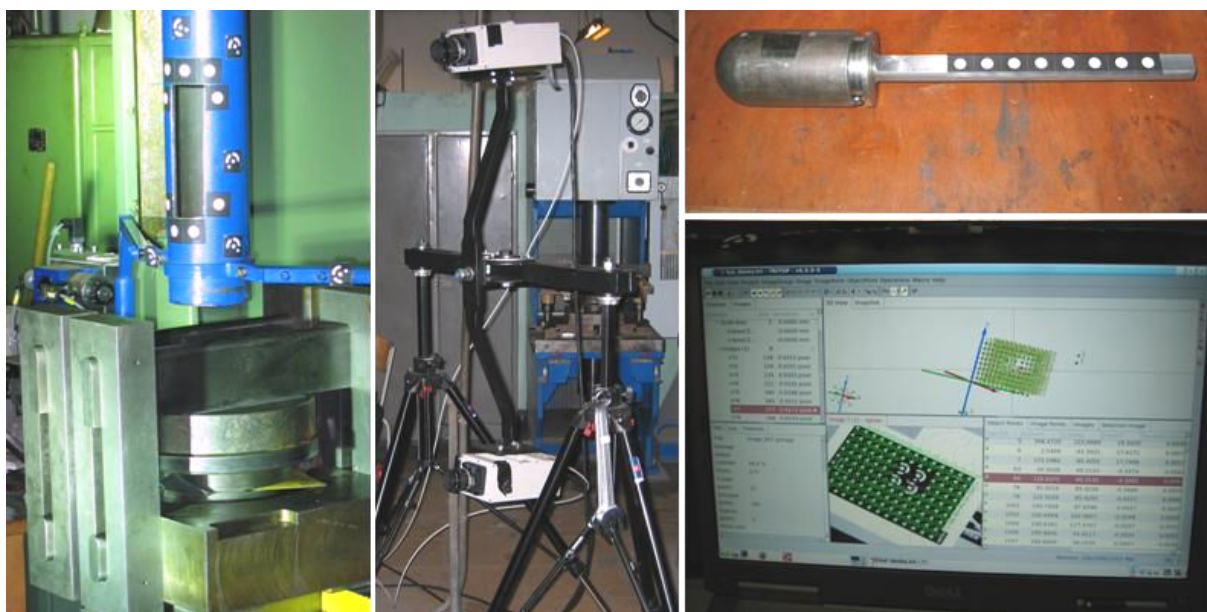
prstenec a na něj talířová pružina. Pro zlepšení tření v oblasti přidržovače byl někdy také vkládán mezi prstence a zkušební vzorek brusný papír. Na talířovou pružinu byl položen vrchní prstenec a takto sestavený nástroj byl stlačen nástrojem upnutým k beranu hydraulického lisu. Ve stlačené poloze byly přiloženy bočnice a příčné profily pro zajištění předpětí pružiny. Teprve po úplné kompletaci byl nástroj odlehčen a vysunut pod rychlostní dělo. Síla předpětí pružiny se ovládala velikostí jejího stlačení (tlak lisu), při větším stlačení byly vnější profily vypodloženy, a tím byl zaručen dostatečný tlak na přidržovač. Po přesném vycentrování nástroje pod trubkou, pro docílení jejich naprosté souososti, byl otevřen přívod vzduchu z centrálního rozvodu do tlakové láhve a ta naplněna až na manometrem nastavený požadovaný tlak. Pod nástroj byl umístěn doraz zabraňující případnému propadnutí a poškození tažníku. Tažník byl na polokulové ploše opatřen mazivem, vložen do hlavice děla, důkladně zaaretován a nakonec utěsněn v dutině trubky dotažením šroubů odklopné části hlavice. Jakmile byly ukončeny tyto přípravné úkony, byl otevřen vzduchový ventil hlavice a stlačením aretačních pák uvolněn tažník. Po experimentu byl uzavřen přívod vzduchu, tažník byl vyndán z nástroje, nástroj přesunut pod lis kde byl stlačen, byly odebrány profily a bočnice a nástroj byl odlehčen. Po rozložení zbylé části nástroje byl zkušební vzorek vyndán z tažnice, očištěn a na jeho místo vložen nový. Tento postup byl aplikován na všech vzorcích obou zvolených rychlostí, avšak pro každý diagram bylo použito jiné hodnoty tlaku nastavené na manometru tlakové nádoby. Na obrázku Obr. 9.11 jsou zobrazeny dvě sady vzorků po provedené zkoušce, vlevo je sada pro DMP2 a v pravo pro DMP3.



Obr. 9.11: Dvě sady vzorků po provedené zkoušce, vlevo pro DMP2 a v pravo pro DMP3.

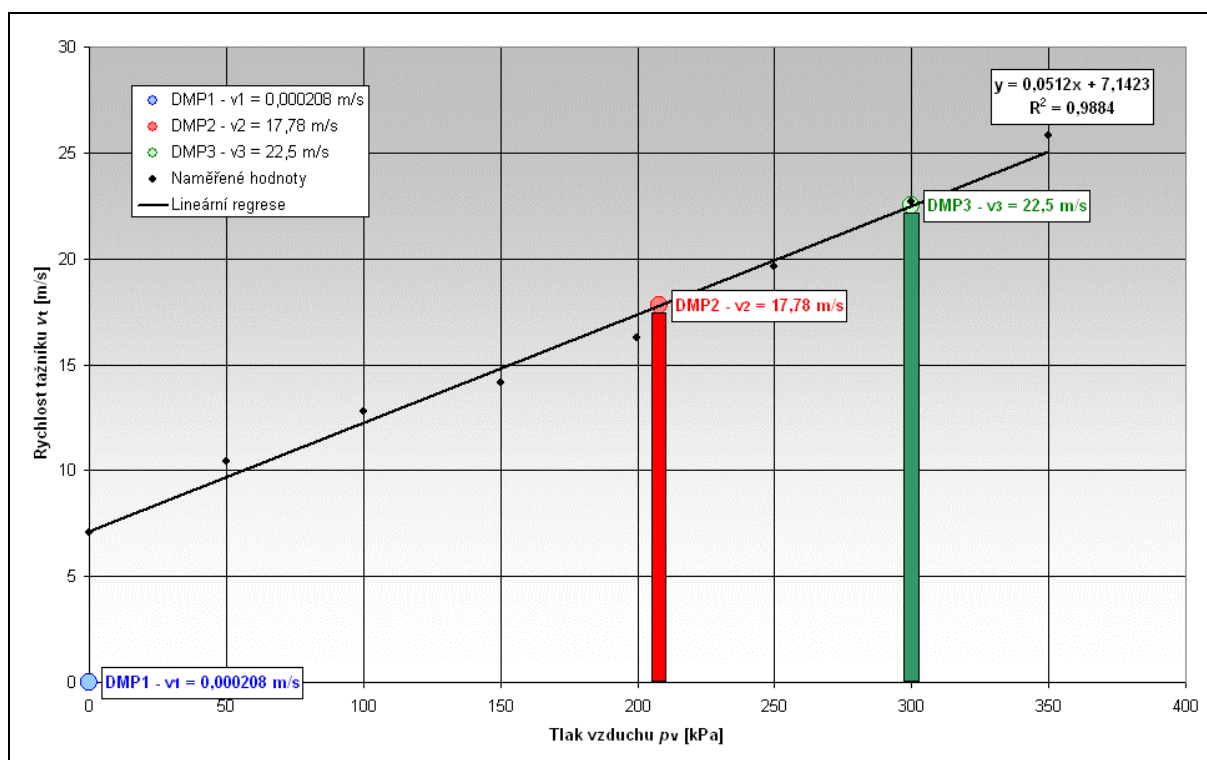
- **stanovení rychlosti tažníku**

Bylo již řečeno, že nastavení rychlosti tažníku probíhá nepřímo přes hodnotu tlaku vzduchu v tlakové nádobě. Přesné hodnoty dopadových rychlostí tažníku odpovídající velikostem nastaveného tlaku v tlakové nádobě jsou známy, neboť byla provedena řada snímání dopadajícího tažníku dvojicí rychlostních kamer. Upravené dělo pro rychlostní snímání je spolu s detailem snímacích kamer, testovacím tažníkem a obrazovkou ovládacího programu zobrazeno na obrázku Obr. 9.12.



Obr. 9.12: Snímání dopadové rychlosti tažníku vysokorychlostními kamerami

Nasnímané hodnoty rychlostí byly společně s příslušnými nastavenými tlaky vyneseny do grafu (Obr. 9.13) a proloženy regresní křivkou. Z jejího průběhu je patrné, že dopadová rychlost tažníku vykazuje vzhledem k nastavenému tlaku vzduchu lineární závislost. S využitím rovnice regrese použitého proložení byly nakonec dopočítány hledané hodnoty tlaků pro zvolené rychlosti $v_2 = 17,78 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (DMP2) a $v_3 = 22,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (DMP3). Hledané tlaky měly po zaokrouhlení hodnoty $p_2 = 208 \text{ kPa}$ a $p_3 = 300 \text{ kPa}$. Zjištěné hodnoty dopadové rychlosti tažníku v_t a příslušného nastaveného tlaku vzduchu p_v jsou zpracovány v tabulce Tab. 9.1, kde jsou též zaznamenány dopočítané nekorigované hodnoty tlaků pro plánované rychlosti testování. První hodnota tlaku $p_v = 0 \text{ kPa}$ značí volný pád tažníku bez užití tlakového vzduchu [5].



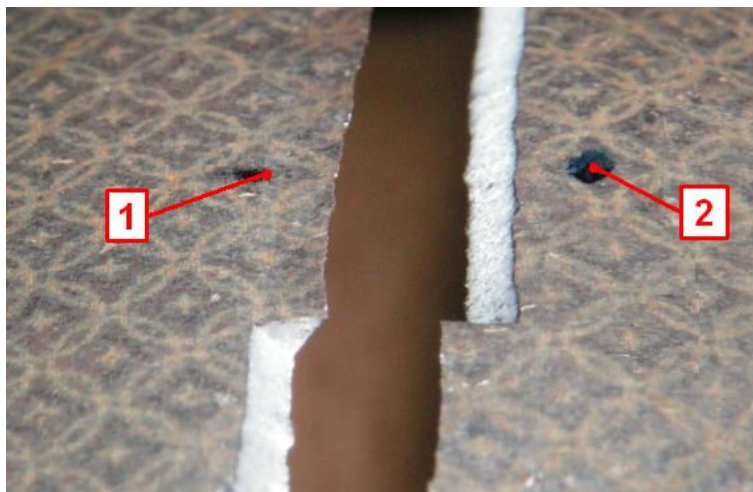
Obr. 9.13: Závislost rychlosti tažníku na tlaku vzduchu

Tab. 9.1: Hodnoty tlaku vzduchu a odpovídající rychlosti tažníku

	Hodnoty zjištěné rychlostními kamerami								DMP2	DMP3
$p_v \text{ [kPa]}$	0	50	100	150	200	250	300	350	207,76	299,96
$v_t \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$	7,09	10,41	12,79	14,16	16,24	19,61	22,71	25,80	17,78	22,50

9.1.4. Měření deformovaných elementů

Vyhodnocení deformovaných elementů proběhlo shodným způsobem u všech vzorků tří testovaných rychlostí zatěžování. Na začátku měření byly nejprve vybrány vhodné elementy na jednotlivých vzorcích. S přihlédnutím ke způsobům definování mezního přetvoření (viz. kapitola 4.4.1) byly vybírány takové elementy deformační sítě, které těsně sousedily se vzniklým lomem, ale nebyly jím zasaženy. Vlivem tvaru trhliny, která vždy probíhala pod úhlem 45° a nikoliv kolmo k ploše výlisku, vyhovovaly stanovenému kritériu mezního přetvoření hned dvě skupiny elementů. Vše je dobře patrné z následného obrázku Obr. 9.14. První skupinu tvořily elementy nacházející se na jedné straně trhliny pracovní označené jako „hrot trhliny“ (pozice 1) a druhou elementy na protilehlé straně pojmenované „okraj trhliny“ (pozice 2).



Obr. 9.14: Tvar trhliny a zvolené elementy

Z předchozího obrázku Obr. 9.14 je jasně patrný rozdíl ve velikosti obou typů elementů. Element označený pozicí 1 má ve směru rovnoběžném s trhlinou přibližně stejný rozměr jako element 2, ale jeho protažení směrem kolmo k trhlině je větší. Elementy ležící na hrotu trhliny se také nachází již v oblasti lokálního ztenčení materiálu. Pro vytvoření jasné představy o rozdílu v dosažené velikosti deformace u elementů nacházejících se na hrotu a na okraji trhliny bylo provedeno u všech tří diagramů mezních přetvoření vyhodnocení obou typů elementů. Z obrázku také vyplývá, že trhlina neměla u všech vzorků v celé délce konstantní průběh a zejména u vzorků širších stop docházelo ke skokové změně úhlu lomu o 90° (z $+45^\circ$ na -45°). Proměření vybraných elementů, splňujících zvolenou definici mezní deformace, bylo provedeno na dílenském mikroskopu firmy Zeiss (zobrazeném dříve na obrázku Obr. 4.12) propojeném se stolním PC postupem blíže popsáním již v kapitole 4.4.4. Měřeny byly délky hlavních os elipticky zdeformovaných kruhových elementů. Při znalosti původního rozměru kruhového elementu (vnější vyleptaný průměr = 2,1 mm) byly ze zjištěných délek dle vztahu (4.17) dopočítány hledané hodnoty logaritmických deformací v hlavním (podélném) φ_1 a vedlejším (příčném) směru φ_2 . Získaná přetvoření byla importována do programu Statistica 6.0, kde byla pásma vypočtených bodů proložena v obou větvích regresními polynomickými křivkami druhého stupně (křivkami mezních přetvoření KMP) a byly k nim také sestrojeny konfidenční a toleranční intervaly. Sestrojené diagramy mezních přetvoření DMP1, DMP2 a DMP3 pro tři různé zkušební rychlosti jsou graficky zpracovány v následující kapitole 9.2.

Zjištěné rozměry elips a dopočítaná přetvoření v obou směrech všech tří DMP jsou zpracovány v příloze PŘÍLOHA 7.

9.2. DMP materiálu Docol 1200M

V této kapitole jsou zpracovány výsledky výše popsanych měření. Pro každou ze zvolených rychlostí zatěžování ($v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$, $v_2 = 17,78 \text{ m.s}^{-1}$, $v_3 = 22,5 \text{ m.s}^{-1}$) byl z vyhodnocených deformací vybraných elementů sestrojen diagram mezních přetvoření v souřadnicích φ_1 - φ_2 . Každý z grafů, zhotovených pro jednu testovací rychlost, obsahuje dvě pásma bodů. Jedno pásmo odpovídá elementům ležícím na hrotu trhliny a druhé elementům na okraji trhliny. Dále grafy obsahují statistické vyhodnocení těchto dat provedené postupem uvedeným v kapitole 4.4.5 s úrovní spolehlivosti 0,9. Oba soubory bodů jsou proloženy v levé i pravé větvi regresními polynomickými křivkami druhého stupně, křivkami mezních přetvoření, dle vztahu (4.20). V grafech jsou znázorněny plnými čarami. Rovnice proložení jsou zobrazeny pod grafem a barevně odpovídají příslušným regresním křivkám. Jednotlivé regresní koeficienty (a , b , c) aproximačních rovnic jsou vždy přehledně uvedeny v tabulce pod příslušným diagramem mezních přetvoření. Přesnost odhadu parametrů základního souboru je v grafu vyjádřena oboustrannými konfidenčními intervaly danými rovnicí (4.21) a znázorněnými přerušovanými čarami. Konfidenční interval je vždy podél regresní křivky konstantní. Pravděpodobnost výskytu bodů základního souboru udávají oboustranné toleranční intervaly (tečkované čáry) dané vztahem (4.22) [2, 5].

Ke každému grafu je nakonec zpracována tabulka s vyhodnocením rozdílnosti deformací zjištěných z elementů na hrotu a okraji trhliny. Znázorněna je minimální $\varphi_{1\min}$, maximální $\varphi_{1\max}$ a průměrná φ_{1P} hodnota deformace každého měřeného souboru. Je též spočten rozdíl průměrných hodnot $\Delta\varphi_{1P}$ (φ_{1P} hrotu – φ_{1P} okraje) a průměrný pokles deformace v procentech $\Delta\varphi_{1P\%}$ daný pro náš případ vytvořeným vztahem (9.1). Dále jsou spočteny průměrné hodnoty intenzity deformace φ_P obou souborů a jejich vzájemný rozdíl $\Delta\varphi_P$ s vyjádřením poklesu v procentech $\Delta\varphi_{P\%}$. Intenzity deformace byly spočteny dle vztahu (5.10). Poslední hodnotou je mezní přetvoření φ_{1K} popsané v kapitole 4.4.2 a definované interpolačním polynomem (4.19), který porovnává hlavní deformace tří sousedících elementů na levé a pravé straně trhliny.

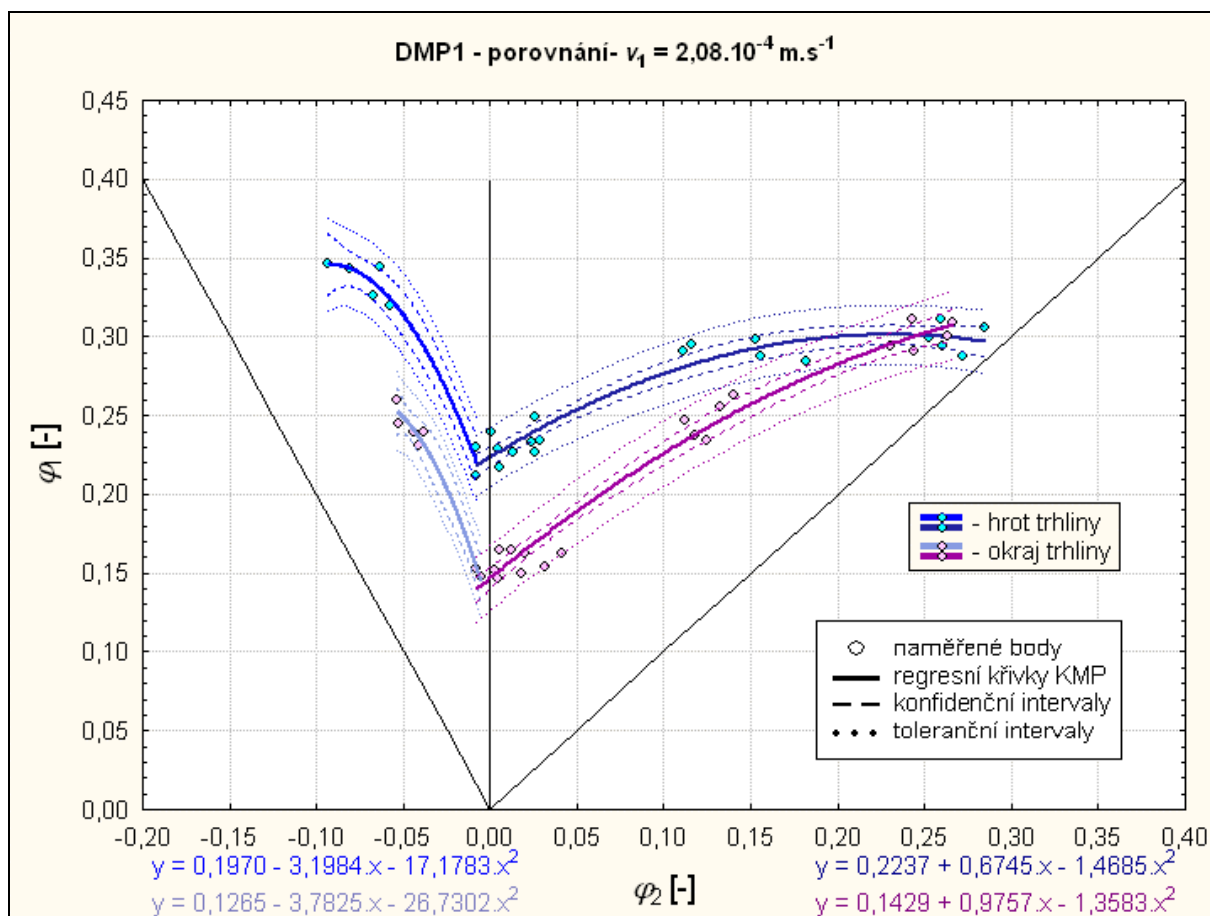
$$\Delta\varphi_{1P\%} = \frac{(\varphi_{1PH} - \varphi_{1PO}) \cdot 100}{\varphi_{1PH}} [\%] \quad (9.1)$$

kde je:

φ_{1PH} ... průměrná hodnota deformace φ_1 elementů na hrotu trhliny [-]

φ_{1PO} ... průměrná hodnota deformace φ_1 elementů na okraji trhliny [-]

9.2.1. DMP1 - $v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$



Obr. 9.15: Diagram mezních přetvoření DMP1

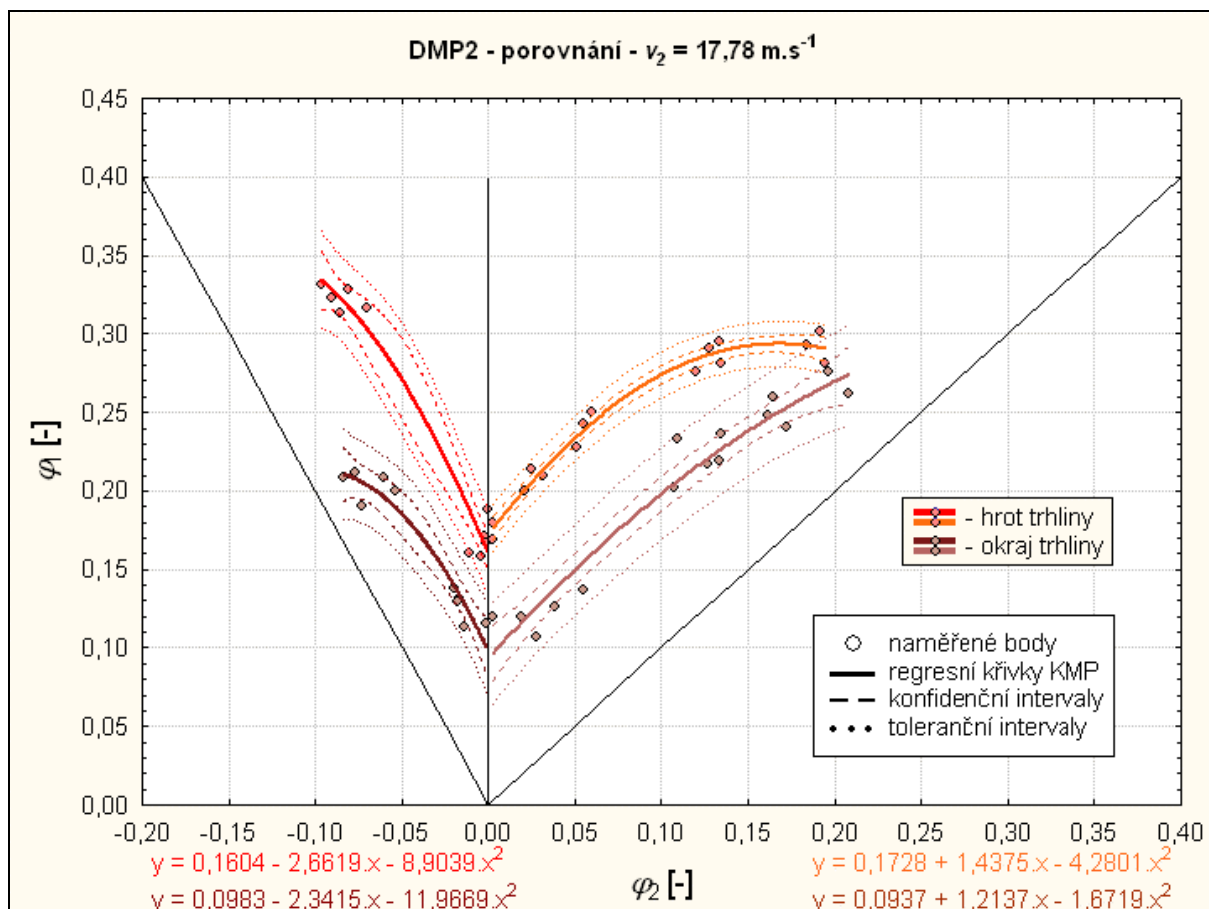
Tab. 9.2: Regresní koeficienty aproximačních rovnic DMP1

DMP1 $v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$	Levá větev			Pravá větev		
	a	b	c	a	b	c
Hrot trhliny	-17,1783	-3,1984	0,1970	-1,4685	0,6745	0,2237
Okraj trhliny	-26,7302	-3,7825	0,1265	-1,3583	0,9757	0,1429

Tab. 9.3: Vyhodnocení odlišnosti naměřených deformací φ_1 na hrotu a okraji trhliny

DMP1	$\varphi_{1\max} [-]$	$\varphi_{1\min} [-]$	$\varphi_{1P} [-]$	$\Delta\varphi_{1P} [-]$	$\Delta\varphi_{1P\%} [\%]$	$\varphi_{1P} [-]$	$\Delta\varphi_{1P} [-]$	$\Delta\varphi_{1P\%} [\%]$	$\varphi_{1K} [-]$
Hrot	0,346	0,212	0,277	0,057	20,438	0,182	0,040	22,081	0,206
Okraj	0,311	0,146	0,220			0,142			

9.2.2. DMP2 - $v_2 = 17,78 \text{ m.s}^{-1}$



Obr. 9.16: Diagram mezních přetvoření DMP2

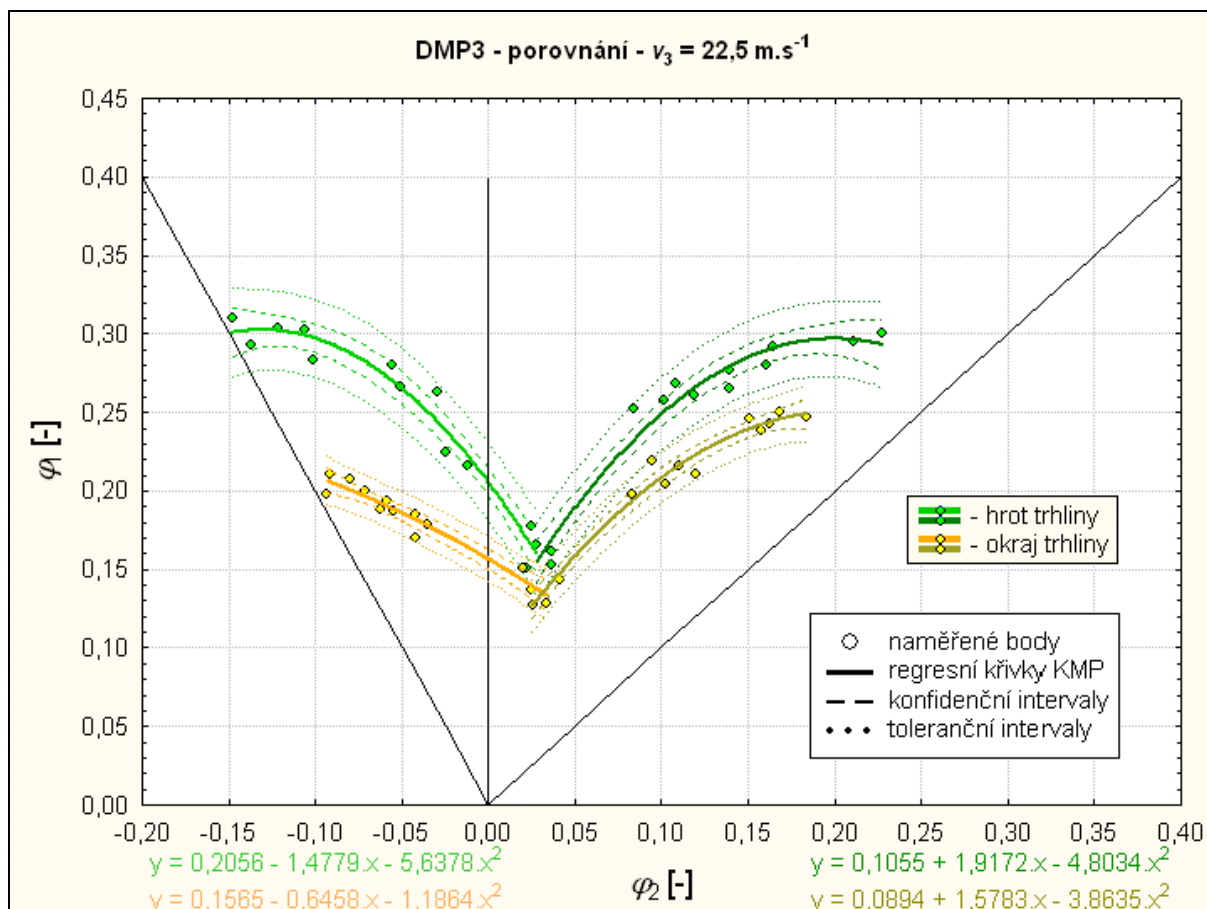
Tab. 9.4: Regresní koeficienty aproximačních rovnic DMP2

DMP2 $v_2 = 17,78 \text{ m.s}^{-1}$	Levá větev			Pravá větev		
	a	b	c	a	b	c
Hrot trhliny	-8,9039	-2,6619	0,1604	-4,2801	1,4375	0,1728
Okraj trhliny	-11,9669	-2,3415	0,0983	-1,6719	1,2137	0,0937

Tab. 9.5: Vyhodnocení odlišnosti naměřených deformací φ_1 na hrotu a okraji trhliny

DMP2	$\varphi_{1\max} [-]$	$\varphi_{1\min} [-]$	$\varphi_{1P} [-]$	$\Delta\varphi_{1P} [-]$	$\Delta\varphi_{1P\%} [\%]$	$\varphi_{1P} [-]$	$\Delta\varphi_{1P} [-]$	$\Delta\varphi_{1P\%} [\%]$	$\varphi_{1K} [-]$
Hrot	0,332	0,158	0,247	0,061	24,573	0,162	0,040	24,739	0,115
Okraj	0,276	0,107	0,186			0,122			

9.2.3. DMP3 - $v_3 = 22,5 \text{ m.s}^{-1}$



Obr. 9.17: Diagram mezních přetvoření DMP3

Tab. 9.6: Regresní koeficienty aproximačních rovnic DMP3

DMP3 $v_3 = 22,5 \text{ m.s}^{-1}$	Levá větev			Pravá větev		
	a	b	c	a	b	c
Hrot trhliny	-5,6378	-1,4779	0,2056	-4,8034	1,9172	0,1055
Okraj trhliny	-1,1864	-0,6458	0,1565	-3,8635	1,5783	0,0894

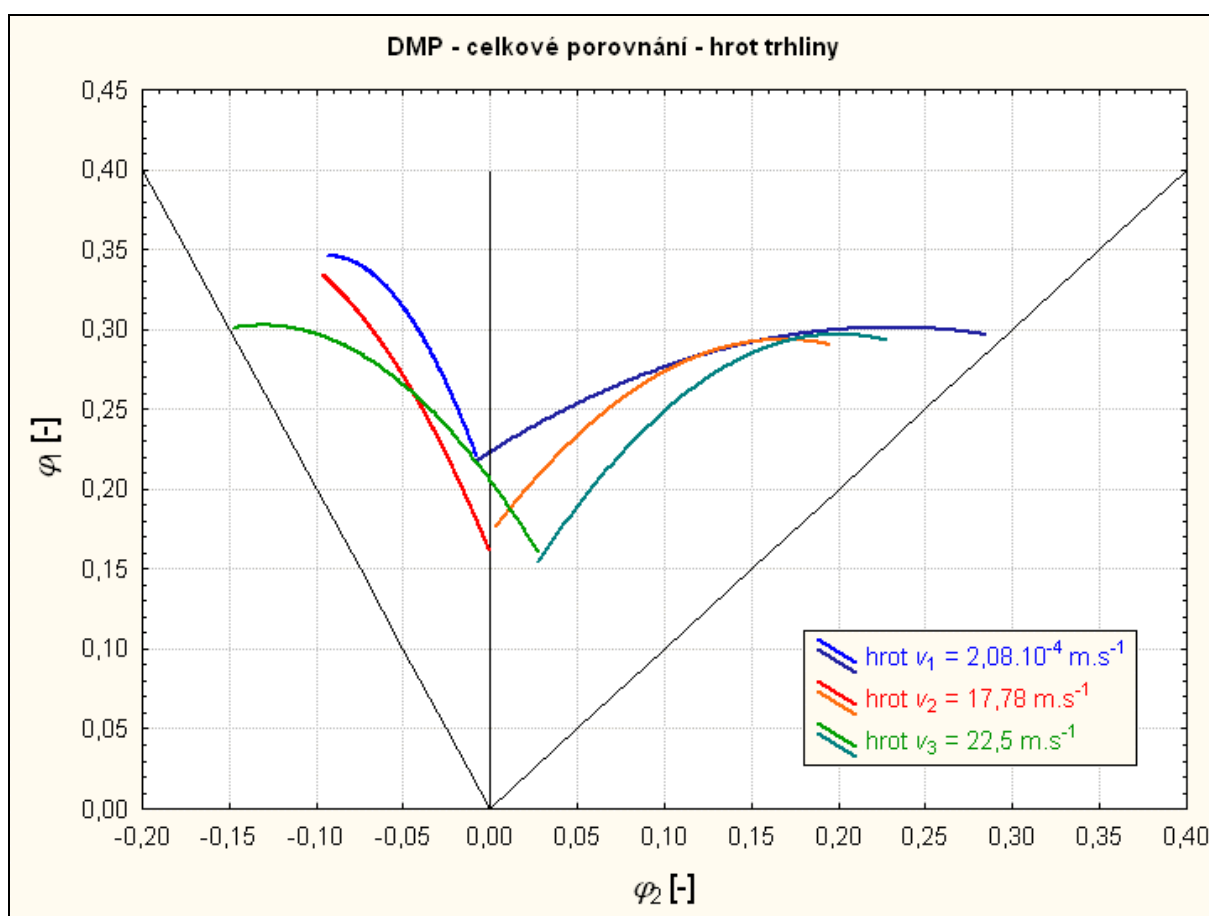
Tab. 9.7: Vyhodnocení odlišnosti naměřených deformací ϕ_1 na hrotu a okraji trhliny

DMP3	$\phi_{1\max} [-]$	$\phi_{1\min} [-]$	$\phi_{1P} [-]$	$\Delta\phi_{1P} [-]$	$\Delta\phi_{1P\%} [\%]$	$\phi_{1P} [-]$	$\Delta\phi_{1P} [-]$	$\Delta\phi_{1P\%} [\%]$	$\phi_{1K} [-]$
Hrot	0,310	0,151	0,252	0,057	22,586	0,170	0,039	22,825	0,063
Okraj	0,251	0,127	0,195			0,131			

9.2.4. Dílčí zhodnocení

V předchozích třech kapitolách jsou zpracovány výsledky experimentálního měření diagramů mezních přetvoření při zvolených rychlostech zatěžování. Pro názornější porovnání vlivu rychlosti zatěžování na tvar KMP v jednotlivých DMP byly vytvořeny souhrnné grafy (oprotěné od bodových řad, konfidenčních a tolerančních intervalů) slučující regresní křivky všech tří diagramů. Barevné značení jednotlivých křivek odpovídá předchozím kapitolám.

První z komplexních diagramů, znázorněný na obrázku Obr. 9.18, představuje porovnání tří regresních křivek, které byly zjištěny z elementů ležících na hrotu trhliny.

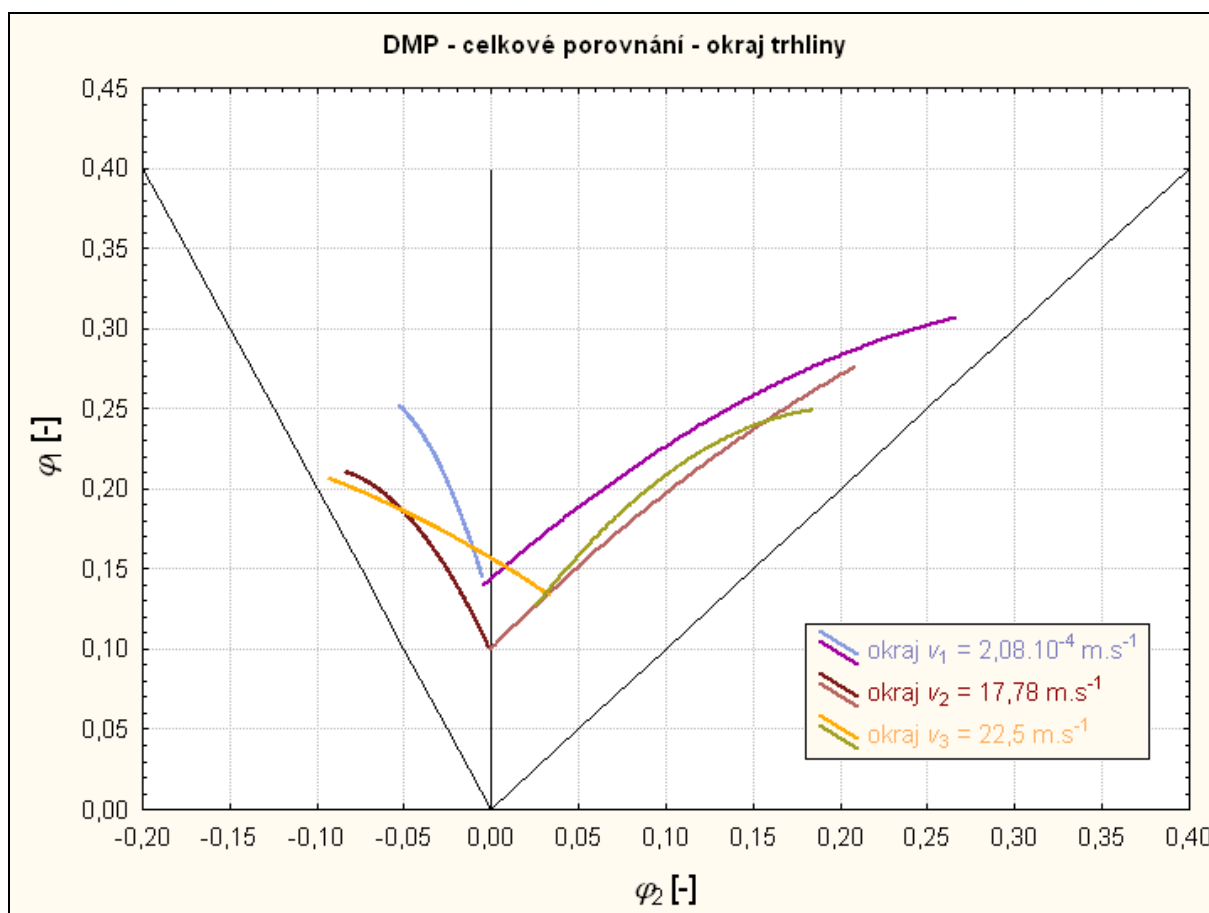


Obr. 9.18: Porovnání regresních křivek zjištěných z elementů ležících na hrotu trhliny

Charakter KMP je pro první dvě rychlosti zatěžování (v_1 , v_2) obdobný, pouze s rostoucí rychlostí došlo k posuvu celé levé větve a tudíž i minima KMP k nižším hodnotám φ_1 . Pravá větev přitom v oblasti rovnoměrného dvouosého vypínání ($m_\varphi = 1$ - plný rondel) kopíruje průběh předchozí nižší rychlosti v_1 . U regresních křivek třetí rychlosti je zajímavé, že již nedošlo k dalšímu posuvu jejich středu (oblast $m_\varphi = 0$) směrem k nižším hodnotám hlavní

deformace, ale k jeho posuvu z oblasti nulové deformace do kladných hodnot φ_2 . Levá KMP doznala poklesu v oblasti nejuzší stopy ($m_\varphi = -1/2$), zatímco pravá stále kopíruje tvar předchozích dvou rychlostí a dosahuje tak obdobných maximálních hodnot přetvoření φ_1 .

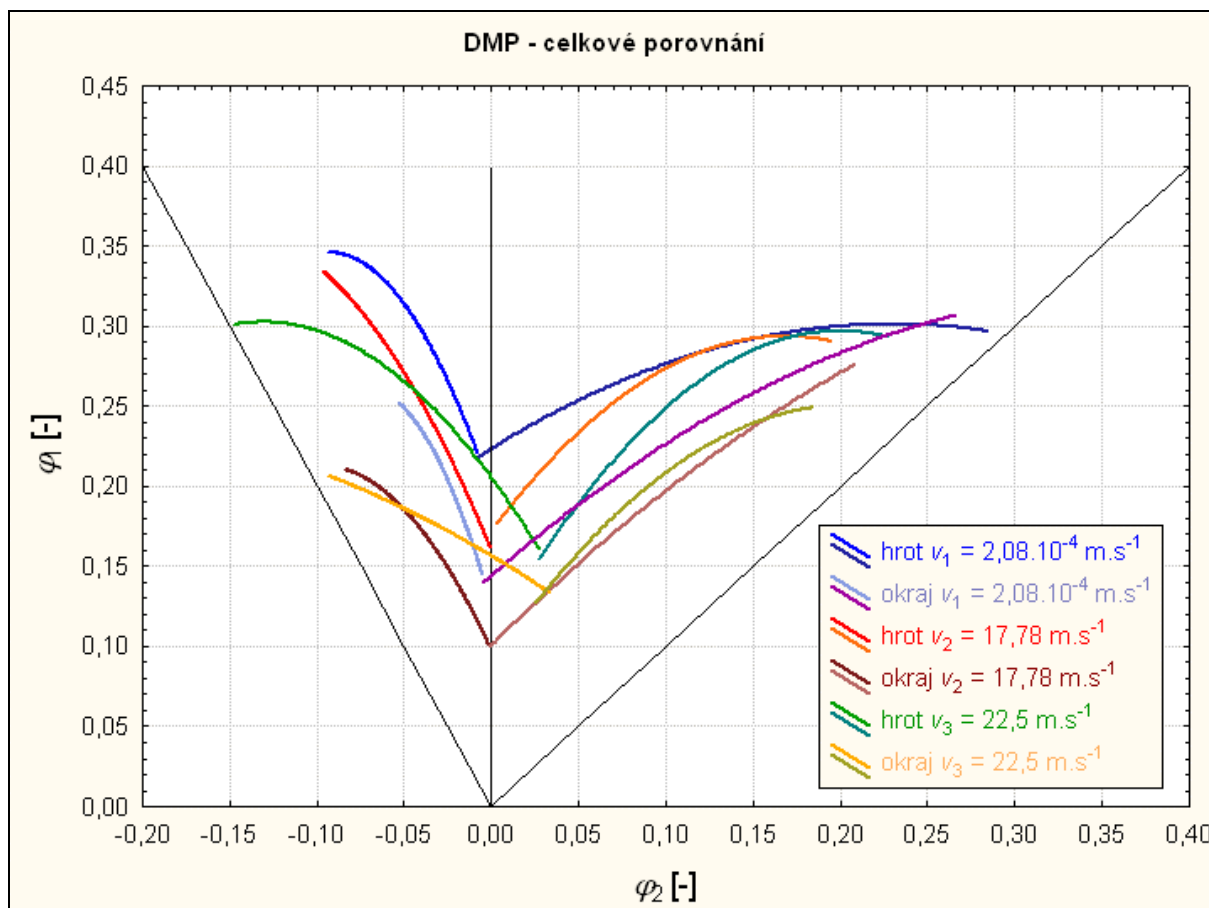
Druhý diagram, znázorněný na obrázku Obr. 9.19, je obdobou předchozího DMP a představuje porovnání tří regresních křivek zjištěných z elementů ležících na okraji trhliny.



Obr. 9.19: Porovnání regresních křivek zjištěných z elementů ležících na okraji trhliny

Průběh křivek rychlostí zatěžování v_1 a v_2 je zde podobný jako v předchozím případě, avšak nyní byl jejich pokles shodný v obou větvích. Regresní křivky třetí rychlosti se od předchozích dvou svým průběhem odlišují. Nedošlo již k dalšímu poklesu středu křivek ($m_\varphi = 0$) směrem k nižším hodnotám hlavní deformace (naopak k mírnému nárůstu), pouze nastal posuv jejich minima do kladných hodnot deformace φ_2 . Pravá větev má téměř totožný průběh s odpovídající větví rychlosti v_2 , levá větev z minima pozvolna stoupá až do oblasti záporných deformací φ_2 , kde v maximu hodnot φ_1 dosahuje deformací levé větve rychlosti v_2 (oblast $m_\varphi = -1/2$).

Poslední komplexní DMP, znázorněný na obrázku Obr. 9.20, slučuje předchozí dva grafy (hrot trhliny a okraj trhliny) v jeden výsledný DMP, a tudíž obsahuje všechny experimentálně zjištěné regresní křivky za všech testovaných rychlostních podmínek. Hodnoty regresních koeficientů všech KMP jsou zpracovány v tabulce Tab. 9.8.



Obr. 9.20: Celkové porovnání všech regresních křivek

Tab. 9.8: Regresní koeficienty všech zjištěných KMP

Docol 1200M		Levá větev			Pravá větev		
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Hrot trhliny	DMP1	-17,1783	-3,1984	0,1970	-1,4685	0,6745	0,2237
	DMP2	-8,9039	-2,6619	0,1604	-4,2801	1,4375	0,1728
	DMP3	-5,6378	-1,4779	0,2056	-4,8034	1,9172	0,1055
Okraj trhliny	DMP1	-26,7302	-3,7825	0,1265	-1,3583	0,9757	0,1429
	DMP2	-11,9669	-2,3415	0,0983	-1,6719	1,2137	0,0937
	DMP3	-1,1864	-0,6458	0,1565	-3,8635	1,5783	0,0894

Výsledné statistické porovnání jednotlivých DMP je provedeno v tabulce Tab. 9.9. Jsou zde souhrnně zpracovány výsledné dílčí hodnoty z tabulek Tab. 9.3, Tab. 9.5 a Tab. 9.7. Jednotlivé parametry vyjadřují vzájemnou odlišnost souborů hlavních deformací (pokles dosažených deformací), zjištěných z elementů na hrotu a okraji trhliny.

Tab. 9.9: Statistické porovnání KMP na hrotu a okraji trhliny

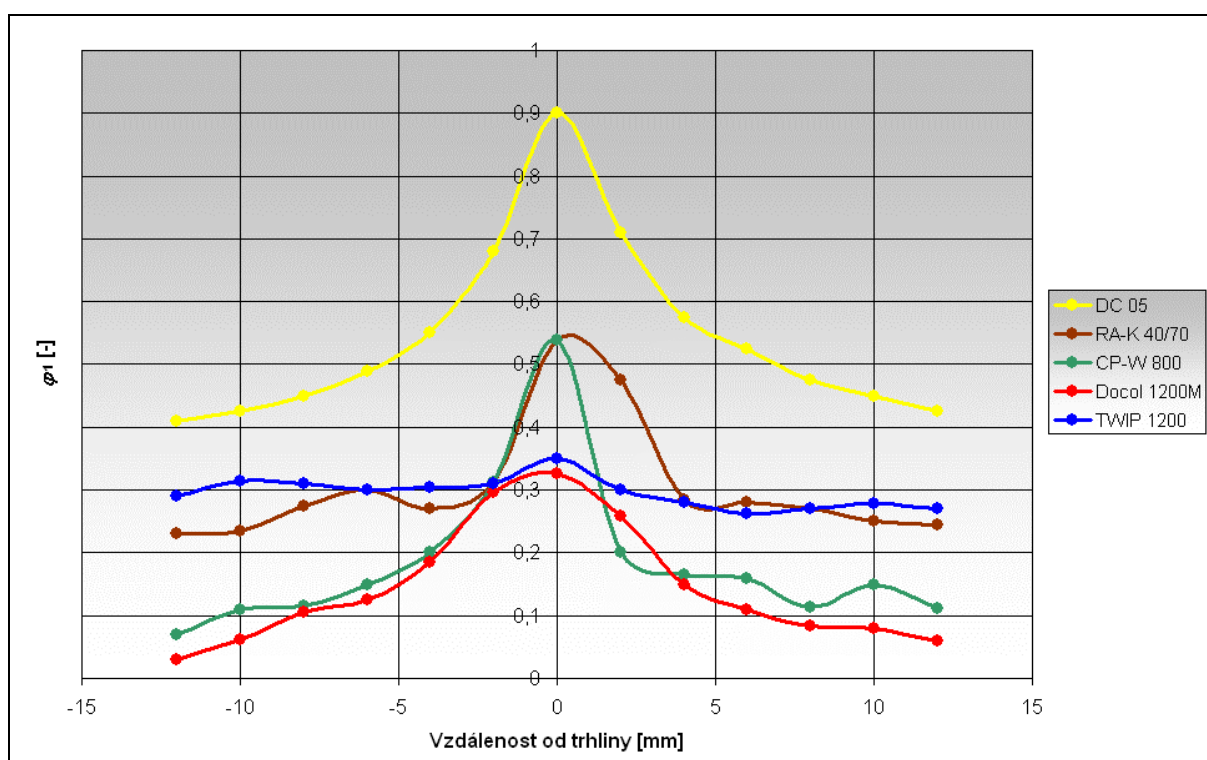
Hrot - Okraj	$\Delta\varphi_{IP}$ [-]	$\Delta\varphi_{IP\%}$ [%]	$\Delta\varphi_P$ [-]	$\Delta\varphi_{P\%}$ [%]	φ_{IK} [-]
DMP1	0,057	20,438	0,040	22,081	0,206
DMP2	0,061	24,573	0,040	24,739	0,115
DMP3	0,057	22,586	0,039	22,825	0,063

Průměrný pokles deformace $\Delta\varphi_{IP}$ mezi hrotem a okrajem je ve všech třech měřených DMP téměř totožný, zatímco tato hodnota vyjádřená v procentech $\Delta\varphi_{IP\%}$ vykazuje větší výkyvy. Hodnoty průměrného poklesu intenzity deformace $\Delta\varphi_P$ jsou opět ve všech třech diagramech shodné, u procentuálního vyjádření $\Delta\varphi_{P\%}$ je viditelný větší rozptyl hodnot. Při vzájemném porovnání průměrných hodnot deformací a intenzit deformací je také vidět jejich velikostní podobnost, a to zejména u poklesů vyjádřených v procentech. Poslední zobrazenou veličinou je mezní přetvoření φ_{IK} , jehož hodnota s rostoucí rychlostí zkoušky výrazně klesá. Při nárůstu rychlosti z $v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ na $v_2 = 17,78 \text{ m.s}^{-1}$ (tedy téměř o $17,78 \text{ m.s}^{-1}$) došlo k poklesu φ_{IK} o hodnotu 0,091. Rozdílu rychlostí $v_2 = 17,78 \text{ m.s}^{-1}$ a $v_3 = 22,5 \text{ m.s}^{-1}$ (nárůst rychlosti o $4,72 \text{ m.s}^{-1}$) potom odpovídá pokles mezní deformace o hodnotu 0,052.

9.3. Rozložení deformace v okolí trhliny

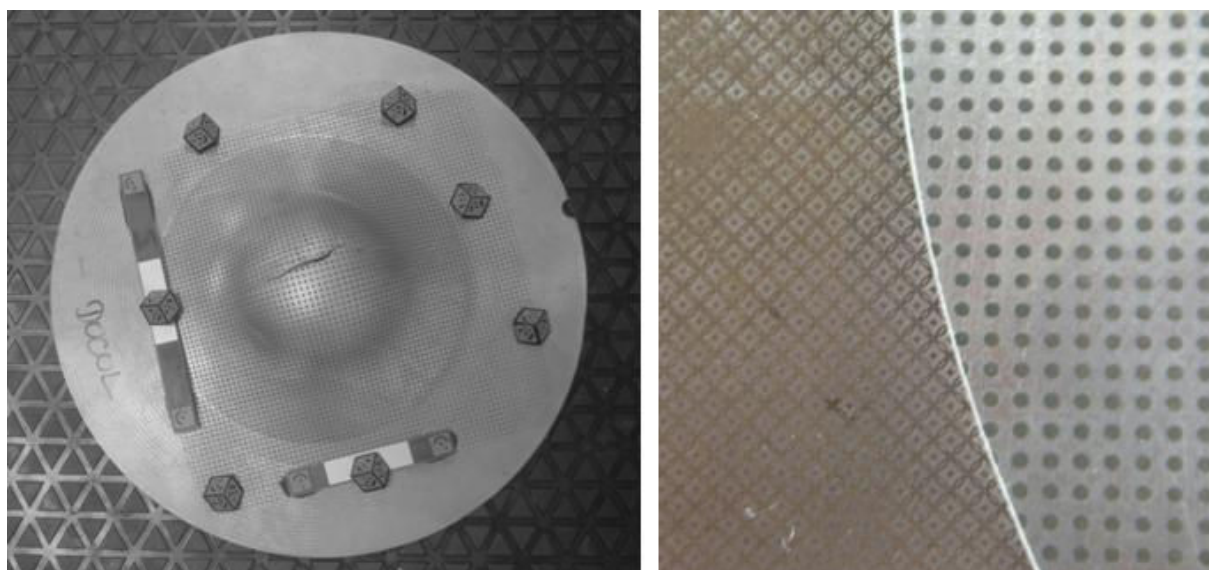
Z porovnání výsledných hodnot diagramů mezních přetvoření podrobně popsanych v předchozí kapitole je patrné, že u zvoleného vysokopevnostního materiálu Docol 1200M velmi záleží na správné volbě vhodných elementů. Při zvolení oblasti hrotu trhliny byly zjištěny hodnoty hlavních deformací elementů v průměru o více než 20 % vyšší než na okraji trhliny. Tento skok v dosažených hodnotách je způsoben rozložením deformace v okolí trhliny jednotlivých vzorků. Každý materiál má tento průběh odlišný, některé vykazují plochou charakteristiku s pozvolným nárůstem deformace směrem k trhlíně, u jiných dochází ke koncentraci deformací v okolí trhliny a zbytek materiálu je téměř nedeformován. Toto je také případ zvoleného materiálu Docol 1200M.

Následující obrázek Obr. 9.21 znázorňuje několik grafů (závislost hlavní deformace na vzdálenosti elementu od trhliny) různých materiálů používaných pro automobilové karosérie. Znázorněn je průběh materiálu DC 05, RA-K 40/70, CP-W 800, Docol 1200M a TWIP 1200. Průběh testovaného materiálu byl zjištěn dílenským mikroskopem (vzorky rychlosti v_1 a tloušťky 2 mm). Většina znázorněných materiálů vykazuje podobný strmý nárůst deformace v blízkosti trhliny, výjimku tvoří ocel TWIP 1200 se svou plochou charakteristikou s pozvolna narůstající deformací [5].



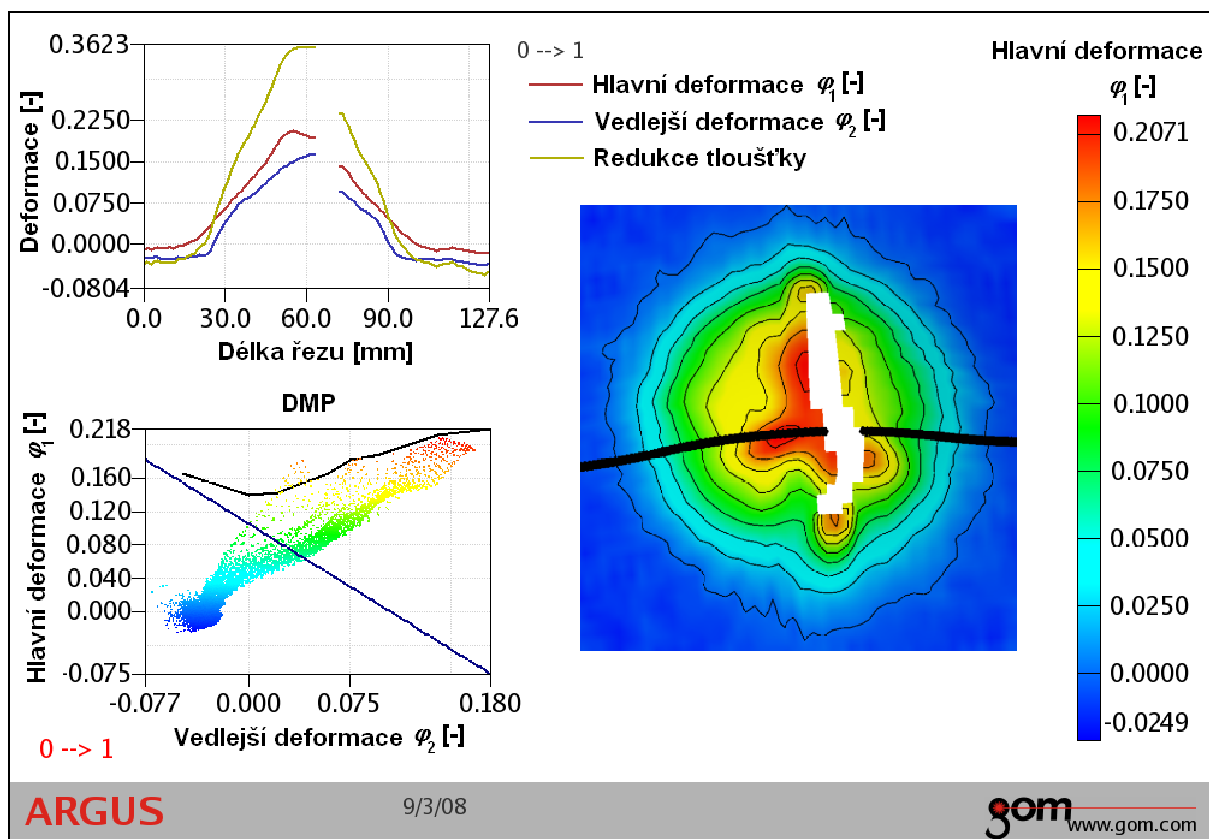
Obr. 9.21: Porovnání deformací v okolí trhliny

Přesnější vyhodnocení průběhu deformace v okolí trhliny bylo provedeno u materiálu Docol 1200M optickým systémem ARGUS od německé firmy GOM, jehož bližší specifikace byla uvedena již v kapitole 4.4.4. Pro toto měření bylo zapotřebí na zkušebním rondelu elektrolyticky zhotovit speciální bodovou síť. Připravený vzorek byl deformován do počátku vzniku trhliny rychlostí $v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Obrázek Obr. 9.22 představuje deformovaný rondel připravený k vyhodnocení a porovnání bodové sítě se sítí s kruhovými elementy, která byla použita pro zjištění DMP. Po korekcích bylo provedeno nasnímání deformovaného vzorku kamerou systému ARGUS a v ovládacím programu provedeno celkové vyhodnocení. Grafický výstup zjištěných veličin je znázorněn na obrázku Obr. 9.23.



Obr. 9.22: Měřicí prostor systému ARGUS a porovnání deformačních sítí

V následujícím obrázku (Obr. 9.23) je v pravé části znázorněn nasnímaný vzorek s rozložením hlavní deformace (rozlišení barvami a vrstevnicemi) a naznačeným řezem. Levá část obsahuje dva grafy. Horní představuje průběh deformací a redukci tloušťky materiálu v závislosti na délce řezu, dolní znázorňuje DMP pro oblast řezu v souřadnicích φ_1 a φ_2 .



Obr. 9.23: Grafické vyhodnocení vzorku systémem ARGUS

Z rozložení hlavní deformace na zkušebním rondelu a z průběhu deformace v provedeném řezu vyplývá, že v oblasti blízko trhliny opravdu dochází u tohoto materiálu k prudkému nárůstu deformace. Tímto zjištěním jsou jednak potvrzeny výsledky manuálního měření průběhu deformace na dílenském mikroskopu a také vysvětleny odlišnosti křivek mezních přetvoření zjištěných z elementů na hrotu a okraji trhliny.

9.4. Modelový výpočet sil a napětí při průhybu rondelu

Matematickou analýzou napjatosti a sil při zatěžování rotačně symetrických desek se podrobně zabývala kapitola 6. v teoretické části Disertační práce. Před praktickou aplikací uvedených teoretických poznatků na použitém zkušebním vzorku bylo nejprve zapotřebí stanovit jistá zjednodušení:

- deska rotačně symetrická (plný rondel),
- rovnoměrně po celém obvodu uložena v neposuvném vetknutí (ideální přidržovač),
- zatížení uprostřed desky osamělou silou (počáteční kontakt tažníku),
- použity zjednodušené výpočty pro tenké desky a membrány (pro $\mu = 0,3$).

a) Výpočet dle teorie tenkých desek

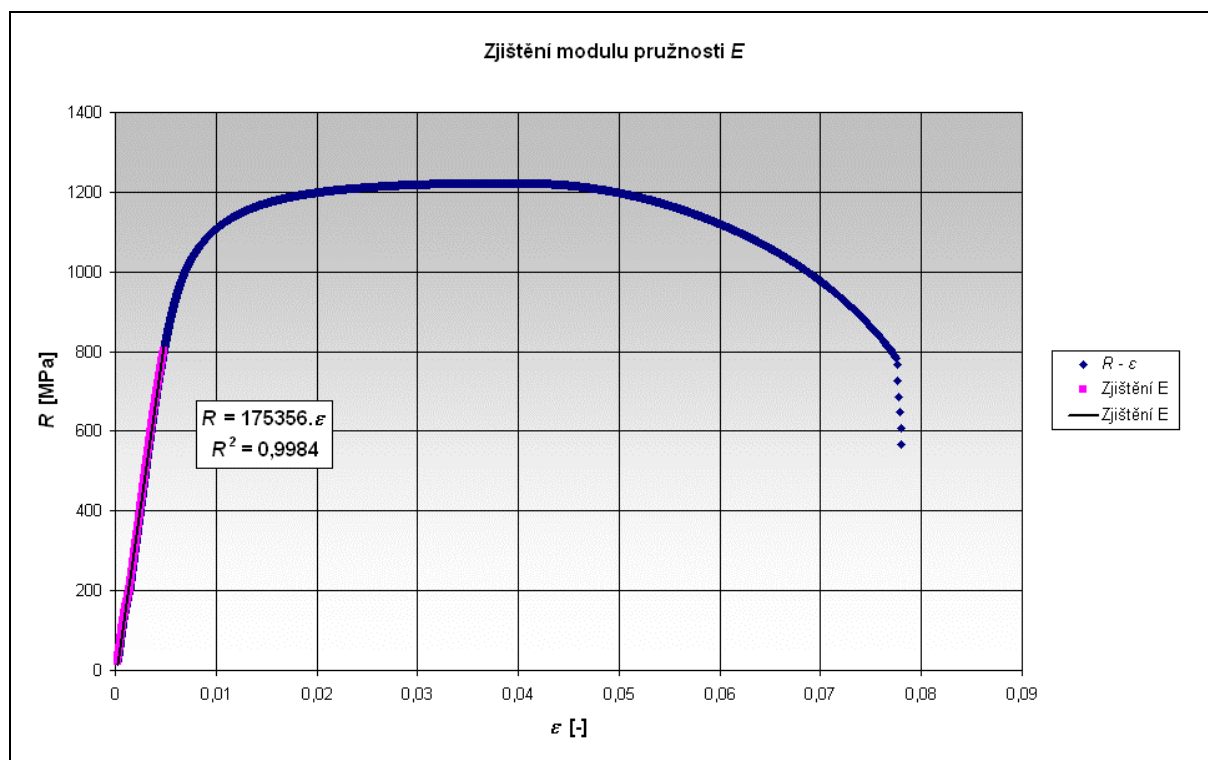
Závislost zátěžné síly na průhybu byla dopočtena ze vzorce (6.24), kde neznámé parametry ν a Π_2 byly určeny výrazy (6.25) a (6.26). Z tabulky Tab. 6.2 byly pro naše vstupní podmínky určeny konstanty K a L . Pro výpočet byl zvolen plný rondel ($\varnothing 210$ mm) tloušťky 2 mm. Vlastní průměr neupnuté části desky činil 120 mm (průměr tažnice), tedy poloměr desky $r = 60$ mm.

Základní mechanické hodnoty byly použity z tahové zkoušky (rychlost 10 mm/min, směr odebrání 0° a číslo zkoušky 3). Zjištěná napětí mají velikost $R_{p0,2} = 1048,81$ MPa, $R_m = 1223,01$ MPa ($\sigma_m = 1269,60$ MPa) a odpovídající síly $F_{p0,2} = 26618,90$ N a $F_m = 31040,00$ N. Tyto hodnoty napětí a sil jsou součástí výsledků uveřejněných v podkapitole d) Vyhodnocení.

Také byla zjištěna hodnota modulu pružnosti v tahu E , z aproximace lineární části tahového diagramu, jak je znázorněno na obrázku Obr. 9.24. Lineární regrese ve tvaru $R = E \cdot \varepsilon$ ukazuje hledanou hodnotu modulu pružnosti v tahu $E = 175356$ MPa. Všechny zjištěné parametry jsou zpracovány v tabulce Tab. 9.10.

Tab. 9.10: Vstupní hodnoty

Parametr	Poloměr	Tloušťka	Modul	Konstanty	
	r [m]	h [m]	E [MPa]	K [-]	L [-]
Hodnota	0,06	0,002	175356	0,443	0,217



Obr. 9.24: Zjištění modulu pružnosti v tahu

Neznámé průhyby w byly ve vzorcích nahrazeny postupnou iterací řady hodnot s krokem daným velikostí průhybu 0,05 mm. Po dosazení parametru Π_2 (pro osamělou sílu) do výrazu (6.24) byly získány dvě rovnice. První ve tvaru (9.2) pro malé průhyby (zanedbání $v^3 = v$) a druhá (9.3) pro průhyby velké.

$$F = \frac{\left(\frac{w}{h}\right) \cdot (1 + K) \cdot E \cdot h^4}{L \cdot r^2} \text{ [N]} \quad (9.2)$$

$$F = \frac{\left[\left(\frac{w}{h}\right) + K \cdot \left(\frac{w}{h}\right)^3\right] \cdot E \cdot h^4}{L \cdot r^2} \text{ [N]} \quad (9.3)$$

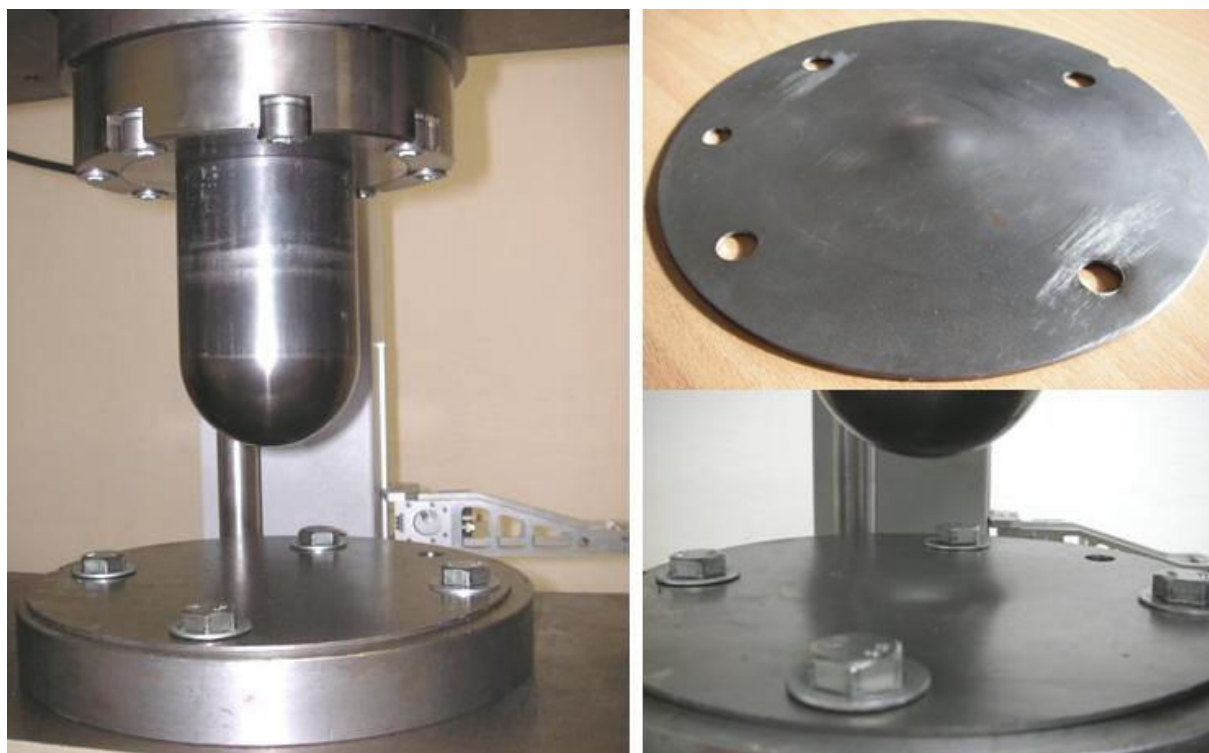
b) Výpočet dle teorie membrán

Tento výpočet byl proveden obdobně jako u teorie tenkých desek s použitím stejných hodnot (viz. Tab. 9.10). Úpravou vzorce (6.28), dle parametru Π_2 , na tvar pro osamělou sílu (9.4) byla vyjádřena závislost síly na průhybu.

$$F = \frac{\left(\frac{w}{h}\right)^3 \cdot E \cdot h^4}{0,28 \cdot r^2} \text{ [N]} \quad (9.4)$$

c) Experimentální zjištění závislosti průhybu na zatížení

Jelikož hydraulický lis CBA 300/63 (použitý v měřeních DMP) nedokáže snímat závislost síly na průhybu vzorku, byl experiment proveden na trhacím stroji TIRAtest 2300 ovládaném pomocí softwaru LabNET. Zkušební vzorek, odpovídajících rozměrů (viz úvod kapitoly 9.4), byl přišroubován (šrouby plnily funkci přidržovače) k tažnici, upnuté na příčnici v horním pracovním prostoru stroje, a zatížen polokulovým tažníkem (rychlost 10 mm/min). Zkouška byla ukončena po dosažení průhybu 10 mm. Měřicí zařízení (před a po zkoušce) je společně s detailem deformovaného vzorku znázorněno na obrázku Obr. 9.25.



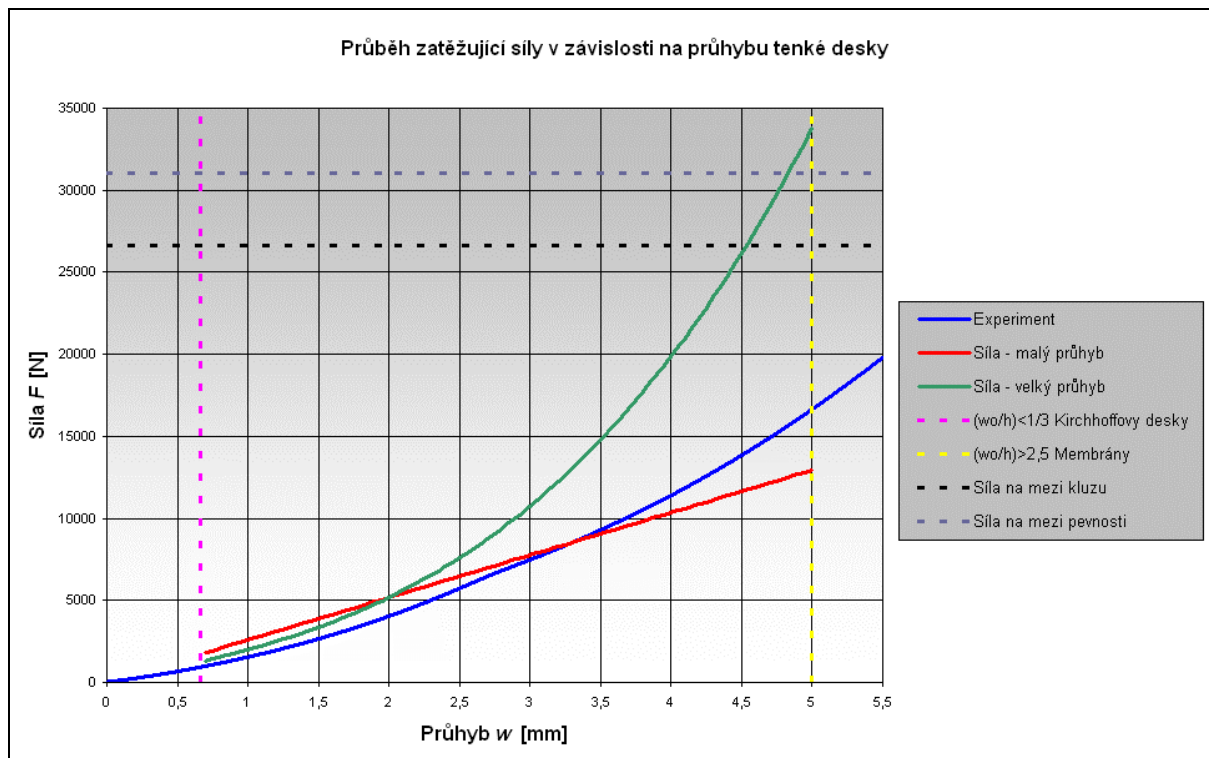
Obr. 9.25: Zjištění závislosti průhybu vzorku na zátěžné síle

d) Vyhodnocení

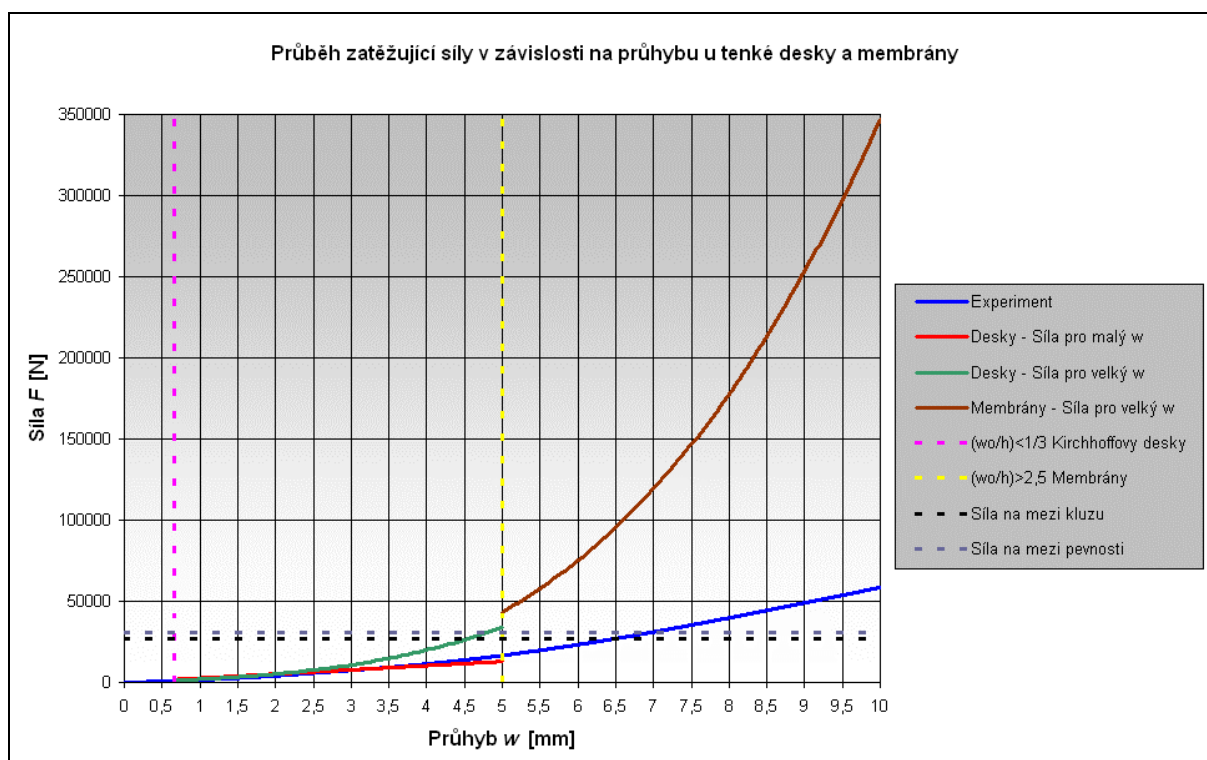
Výsledné závislosti zjištěných hodnot jsou zpracovány na obrázcích Obr. 9.26 a Obr. 9.27. První představuje závislosti zátěžné síly na průhybu (pro malé a velké deformace) spočtené dle teorie tenkých desek a druhý doplňuje tyto křivky o průběh zátěžné síly spočtené dle teorie membrán. Oba grafy též obsahují hledanou závislost obou veličin (síly a průhybu) zjištěnou experimentálním měřením.

Pro představu o výši zjištěných hodnot jsou v grafech přerušovanými čarami znázorněny hodnoty síly na mezi pevnosti a na mezi kluzu a také hranice platnosti příslušných výpočtových modelů. Přechod mezi Kirchhoffovými deskami a deskami tenkými představuje hodnota daná výrazem (6.31). Hranici mezi tenkými deskami a membránami byla dopočítána z rovnice (6.32).

Z prvního obrázku Obr. 9.26 je patrné, že experimentálně zjištěná závislost není lineární, přesto se svými hodnotami blíží spíše přímkovému průběhu spočtenému dle vztahů pro malý průhyb. Odlišnost experimentálního průběhu a křivky pro velké průhyby je výrazná, což je nejspíše zaviněno řadou zjednodušení zavedených při výpočtu a také užitím univerzálních konstant neodrážejících konkrétní technologické podmínky.



Obr. 9.26: Závislost zátěžné síly na průhybu tenké desky



Obr. 9.27: Závislost zátěžné síly na průhybu tenké desky a membrány

Na druhém obrázku Obr. 9.27 je patrný navazující průběh vypočtených hodnot zátěžných sil pro tenké desky (počítaných ze vztahů pro velké průhyby) a membrány. Jestliže v případě porovnání experimentálních hodnot s výpočty dle teorie tenkých desek (velkých průhybů) došlo k odchylkám, tak z předchozího obrázku je jasně vidět, že v případě porovnání experimentu s výpočtem dle teorie membrán můžeme hovořit o dvou naprosto odlišných křivkách.

Pro výpočet výsledného napětí na obvodu desky $\sigma_{r,t}$, daného součtem ohybového a membránového napětí, byly proto použity vztahy pro tenké desky. Tyto vztahy platí, v našem případě, do průhybu 5 mm, a proto byla pro výpočet použita právě tato krajní hodnota použitelná i pro experimentálně zjištěný průběh. Úpravou vzorců (6.22) a (6.23) vznikly hledané výrazy pro membránové (9.5) a ohybové napětí (9.6).

$$\sigma'_{r,t} = \frac{\left(\frac{w}{h}\right)^2 \cdot S \cdot E \cdot h^2}{r^2} \text{ [MPa]} \quad (9.5)$$

$$\sigma''_{r,t} = \frac{\left(\frac{w}{h}\right) \cdot |R| \cdot E \cdot h^2}{r^2} \text{ [MPa]} \quad (9.6)$$

Konstanty byly odečteny z tabulky Tab. 6.1 a mají hodnotu $S = 1,232$ a $|R| = 1,778$, průhyb byl zvolen $w = 5$ mm (pro experimentálně zjištěnou sílu $F = 16650,90$ N) a ostatní rozměry byly použity z tabulky Tab. 9.10. Hledané hodnoty napětí jsou tyto:

- membránové napětí na obvodu desky $\sigma'_{r,t} = 1497,22$ MPa,
- ohybové napětí na obvodu desky $\sigma''_{r,t} = 864,31$ MPa,
- celkové napětí na obvodu desky $\sigma_{r,t} = 2361,53$ MPa.

Pokud porovnáme mez pevnosti vzorku $R_m = 1223,01$ MPa ($\sigma_m = 1269,60$ MPa) s vypočtenými napětími, zjistíme, že tato hodnota byla překročena, přesto nedošlo k porušení vzorku. Ačkoliv měl tento vzorek malé rozměry (rondel $\varnothing 210$ mm), tak je více než pravděpodobné, že by za obdobných zátěžných podmínek (použitá síla, průhyb a rychlost zatěžování) obstál i mnohem větší výrobek (výtažek karosářského typu) zhotovený z testovaného materiálu. V takovém případě by se tato experimentálně-početní metoda nechala využít jako levná, rychlá a přijatelně přesná alternativa ke CRASH testu dané součásti. Otázkou ovšem zůstává praktická použitelnost vzorců pro model tenké desky, neboť jejich platnost by měla být omezena oblastí malých (pružných) deformací. Pro výpočet napětí při větší hodnotě experimentálně zjištěného průhybu by bylo zapotřebí nejprve ověřit platnost stávajících vztahů nebo případně nalézt vztahy jiné.

Závěrem lze tedy říci, že testovaný materiál Docol 1200M a zvolené parametry vzorku lépe odpovídají teorii tenkých desek a teorie membrán (určená pro velké deformace a zanedbávající ohybová napětí) není pro matematický popis tažení tohoto materiálu vhodná. Toto tvrzení je také podpořeno mechanickými hodnotami (zejména menší tažností) daného materiálu, získanými z tahových zkoušek, a uvedenými již v kapitole 8.2. Metodu výpočtu, sil a napětí dle tenkých desek a malých průhybů, lze tedy pro její jednoduchost, rychlost a přijatelnou přesnost pro náš případ doporučit.

10. DISKUZE VÝSLEDKŮ DISERTAČNÍ PRÁCE

Diskuze výsledků disertační práce navazuje na dílčí zhodnocení uvedená v kapitolách 8.2.5. a 9.2.4 a souhrnně prezentuje zjištěné poznatky. Experimentální část předkládané disertační práce se zabývá výzkumem vlastností a chování testovaného vysokopevnostního materiálu Docol 1200M (provedeného ve dvou tloušťkách 2 mm a 0,7 mm) za různých rychlostních podmínek.

Nejprve byly zkoumány změny vnitřní struktury této martenzitické oceli, ke kterým došlo v závislosti na použité rychlosti zatěžování. Kromě protažení zrn v okolí trhliny ve směru působení tahové síly a mírnému procentuálnímu nárůstu podílu martenzitu v materiálu však tyto testy neprokázaly žádné významné rozdíly v dosažených strukturách.

Porovnání základních mechanických hodnot obou rozměrů testovaného materiálu bylo provedeno pomocí tří rychlostních sérií tahových zkoušek v každém směru na směr válcování plechu (0° , 45° , 90°). Nejprve byly na trhačím stroji TIRAtest 2300 realizovány statické zkoušky tahem rychlostí $v = 10$ mm/min a následně zkoušky za vyšší rychlosti $v = 600$ mm/min. Také proběhlo u obou polotovarů zjištění koeficientu normálové anizotropie r_α a z proložení tahových křivek polynomem druhého stupně byl určen modul monotónního zpevnění C a exponent deformačního zpevnění n . Nakonec byly na zařízení SOKOL 400 provedeny extrémní tahové zkoušky rychlostí $v = 24000$ mm/min tedy $v = 0,4$ m/s. Všechny tyto testy ukázaly jak velmi jsou výsledné mechanické hodnoty a tedy i grafické průběhy tahových zkoušek tohoto materiálu závislé na velikosti zkušební rychlosti.

V tabulce Tab. 10.1 jsou zobrazeny směrově střední hodnoty x_s nejdůležitějších mechanických hodnot (napětí a tažností) spolu s jejich vzájemným statistickým porovnáním. Ve dvou řádcích pod sebou jsou vždy pro obě testované tloušťky polotovaru a jednu zkušební rychlost zobrazeny hodnoty hledané mechanické veličiny. Pod nimi (okrová barva) je také ve dvou řádcích provedeno jejich vzájemné statistické porovnání. Spočten je rozdíl Δx (kde x je testovaná veličina) těchto hodnot uvedený v absolutní hodnotě a také je uvedeno procentuální vyjádření tohoto rozdílu $\Delta x\%$ spočtené dle upraveného vztahu (9.1), který nyní obsahuje rozdíl Δx násobený 100% a podělený vyšší z porovnávaných hodnot. Mezi sousední hodnoty jedné veličiny zjištěné u jedné tloušťky polotovaru za různých rychlostí jsou vždy vloženy dva sloupce (modrá barva) statistického porovnání těchto hodnot. Opět je spočten rozdíl sousedních hodnot Δvx uvedený v absolutní hodnotě (kde x je označení porovnávaných rychlostí (1-6), (6-24)) a procentuální vyjádření tohoto rozdílu $\Delta vx\%$.

Tab. 10.1: Porovnání výsledných směrově středních hodnot napětí a tažností

Rychlost zatěžování		10 [$\frac{\text{mm}}{\text{min}}$]	Rozdíl Δv (1-6)	Rozdíl % Δv (1-6)%	600 [$\frac{\text{mm}}{\text{min}}$]	Rozdíl Δv (6-24)	Rozdíl % Δv (6-24)%	24000 [$\frac{\text{mm}}{\text{min}}$]
$t = 2 \text{ mm}$	$R_{p0,2} [\text{MPa}]$	1069,98	7,46	0,70	1062,53	-	-	-
$t = 0,7 \text{ mm}$		1108,69	31,93	2,88	1076,77	-	-	-
Rozdíl	$\Delta R_{p0,2} [\text{MPa}]$	38,71	24,47	63,21	14,24	-	-	-
Rozdíl %	$\Delta R_{p0,2} \% [\%]$	3,49	2,17	62,12	1,32	-	-	-
$t = 2 \text{ mm}$	$R_m [\text{MPa}]$	1233,03	13,01	1,04	1246,04	18,73	1,48	1264,77
$t = 0,7 \text{ mm}$		1285,01	22,63	1,76	1262,38	90,92	6,72	1353,31
Rozdíl	$\Delta R_m [\text{MPa}]$	51,98	35,64	68,56	16,35	72,19	81,54	88,54
Rozdíl %	$\Delta R_m \% [\%]$	4,05	2,75	67,99	1,29	5,25	80,21	6,54
$t = 2 \text{ mm}$	$A_{50 \text{ mm}} [\%]$	6,92	0,33	4,80	6,58	2,18	33,03	4,41
$t = 0,7 \text{ mm}$		5,05	0,42	7,67	5,47	0,95	17,41	4,52
Rozdíl	$\Delta A_{50 \text{ mm}} [\%]$	1,86	0,75	40,37	1,11	1,00	90,01	0,11
Rozdíl %	$\Delta A_{50 \text{ mm}} \% [\%]$	26,94	10,06	37,36	16,87	14,42	85,45	2,46
$t = 2 \text{ mm}$	$A_g [\%]$	2,64	0,25	9,64	2,38	-	-	-
$t = 0,7 \text{ mm}$		2,84	0,49	17,25	2,35	-	-	-
Rozdíl	$\Delta A_g [\%]$	0,20	0,17	82,50	0,03	-	-	-
Rozdíl %	$\Delta A_g \% [\%]$	7,05	5,58	79,16	1,47	-	-	-

Z hodnot uvedených v tabulce vyplývá řada skutečností, avšak popsány jsou dále jen ty nejvýznamnější. Díky tabulce lze získat přehled o maximálních a minimálních směrově středních hodnotách napětí a tažností zjištěných v jednotlivých rychlostních testech. Pro informaci uvádím maximální hodnotu meze pevnosti $R_m = 1353,31 \text{ MPa}$ a tažnosti $A_{50 \text{ mm}} = 6,92 \%$. Pokud porovnáme odpovídající si napětí obou polotovarů, zjistíme, že hodnoty vykazují pouze odchylky $1,3 \div 6,5 \%$. U tažností je tento rozdíl mezi oběma tloušťkami výraznější a pohybuje se mezi $1,5 \div 27 \%$. S rostoucí hodnotou testovací rychlosti se rozdíl snižuje. Meze kluzu a meze pevnosti nedoznaly vlivem různé rychlosti zatěžování větších výkyvů, průměrný rozdíl hodnot se pohybuje v rozmezí $0,7 \div 6,7 \%$. S nárůstem testovací rychlosti došlo k většímu poklesu tažnosti $A_{50 \text{ mm}}$. Při změně rychlosti z 10 na 600 mm/min doznala sice pokles pouze 4,8 % u polotovaru 2 mm a 7,7 % u 0,7 mm, avšak při změně rychlosti z 600 na 24000 mm/min to bylo již 33% a 17%. Obdobný pokles nastal i u tažnosti A_g při změně z 10 na 600 mm/min a to o 9,6 % u plechu 2 mm a o 17 % u 0,7 mm.

Pokud provedeme porovnání zjištěných směrově středních mechanických hodnot testovaného materiálu Docol 1200M $t = 2$ mm s některými, již dříve na Katedře strojírenské technologie odzkoušenými, karosářskými materiály (hlubokotažná ocel DX 05 $t = 0,82$ mm, TRIP ocel RA-K 40/70 $t = 1,5$ mm a vícefázová ocel CPW 800 $t = 2,1$ mm), zjistíme, že jeho parametry odpovídají předpokladům stanoveným v kapitole 8.1.2 pro martenzitické oceli a také parametrům udávaným výrobcem. Ze statické zkoušky tahem určené vysoké hodnoty meze kluzu (Docol 1200M $R_{p0,2} = 1069,98$ MPa, DX 05 $R_{p0,2} = 154,47$ MPa, RA-K 40/70 $R_{p0,2} = 461,43$ MPa, CPW 800 $R_{p0,2} = 731,70$ MPa) a meze pevnosti (Docol 1200M $R_m = 1233,03$ MPa, DX 05 $R_m = 280,40$ MPa, RA-K 40/70 $R_m = 762,73$ MPa, CPW 800 $R_m = 868,11$ MPa), společně s nízkou hodnotou tažnosti (Docol 1200M $A_{50\text{ mm}} = 6,92$ %, DX 05 $A_{80\text{ mm}} = 44,06$ %, RA-K 40/70 $A_{50\text{ mm}} = 28,69$ %, CPW 800 $A_{50\text{ mm}} = 15,86$ %), jednoznačně řadí zvolený materiál mezi vysokopevnostní martenzitické oceli [2, 5].

Další velká část měření spočívala ve zjištění mezní deformace materiálu Docol 1200M při různých stavech napjatosti a různých testovacích rychlostech. Provedeny byly tři skupiny měření pro tři zvolené testovací rychlosti $v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4}$ m.s⁻¹, $v_2 = 17,78$ m.s⁻¹ a $v_3 = 22,5$ m.s⁻¹. Zatěžování sad různě širokých vzorků (různé stavy napjatosti) opatřených deformační sítí bylo provedeno do okamžiku vzniku trhliny. Nejprve proběhlo měření pomalou zátěžnou rychlostí ($v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4}$ m.s⁻¹), provedené na hydraulickém lisu CBA300/63 a teprve následně testování dvěma extrémními rychlostmi ($v_2 = 17,78$ m.s⁻¹ a $v_3 = 22,5$ m.s⁻¹) realizované na speciálním pneumatickém dělu. Po testech proběhlo vyhodnocení deformovaných elementů sítě, zvoleny byly dvě skupiny elementů označené „hrot trhliny“ a „okraj trhliny“. Vizualizace hodnot deformací v hlavním φ_1 a vedlejším směru φ_2 obou jmenovaných skupin byla realizována pomocí diagramů mezních přetvoření, jeden diagram pro každou použitou rychlost zatěžování (DMP1, DMP2 a DMP3).

Porovnání těchto diagramů je provedeno v následující tabulce Tab. 10.2. Jsou zde souhrnně zpracovány výsledné hodnoty maximální, minimální a průměrné deformace a také průměrné intenzity deformace uvedené již v tabulkách Tab. 9.3, Tab. 9.5 a Tab. 9.7. Dále tabulka obsahuje vzájemné porovnání těchto parametrů u jednotlivých diagramů mezních přetvoření (modrá barva), vyjádřené absolutním rozdílem sousedních hodnot příslušných diagramů $\Delta(1-2, 2-3$ nebo $1-3)$ a opět také hodnotou tohoto rozdílu uvedenou v % $\Delta(1-2, 2-3$ a $1-3)\%$ a spočtenou dle známého upraveného vztahu (9.1).

Tab. 10.2: Porovnání hodnot diagramů mezních přetvoření

Hrot trhliny	DMP1	Rozdíl $\Delta(1-2)$	Rozdíl % $\Delta(1-2)\%$	DMP2	Rozdíl $\Delta(2-3)$	Rozdíl % $\Delta(2-3)\%$	DMP3	Rozdíl $\Delta(1-3)$	Rozdíl % $\Delta(1-3)\%$
$\varphi_{lmax} [-]$	0,346	0,014	4,046	0,332	0,022	6,627	0,310	0,036	10,405
$\varphi_{lmin} [-]$	0,212	0,054	25,472	0,158	0,007	4,430	0,151	0,061	28,774
$\varphi_{lP} [-]$	0,277	0,030	10,830	0,247	0,005	1,984	0,252	0,025	9,025
$\varphi_P [-]$	0,182	0,020	10,989	0,162	0,008	4,706	0,170	0,012	6,593
Okraj trhliny	DMP1	Rozdíl $\Delta(1-2)$	Rozdíl % $\Delta(1-2)\%$	DMP2	Rozdíl $\Delta(2-3)$	Rozdíl % $\Delta(2-3)\%$	DMP3	Rozdíl $\Delta(1-3)$	Rozdíl % $\Delta(1-3)\%$
$\varphi_{lmax} [-]$	0,311	0,035	11,254	0,276	0,025	9,058	0,251	0,060	19,293
$\varphi_{lmin} [-]$	0,146	0,039	26,712	0,107	0,020	15,748	0,127	0,019	13,014
$\varphi_{lP} [-]$	0,220	0,034	15,455	0,186	0,009	4,615	0,195	0,025	11,364
$\varphi_P [-]$	0,142	0,020	14,085	0,122	0,009	6,870	0,131	0,011	7,746

Pokud blíže pohlédneme na zjištěné statistické hodnoty zjistíme, že vlivem rostoucí zátěžné rychlosti došlo v obou souborech deformací vybraných elementů (hrot a okraj trhliny) ke značným změnám dosažených hodnot, zejména mezi dvěma prvními diagramy DMP1 a DMP2, kde pokles některých veličin (φ_{lmin}) činí téměř 27 %. Rozdíly v hodnotách druhého a třetího diagramu nejsou tak výrazné, což naznačuje, že daný materiál již na nárůst rychlosti nereaguje dalším poklesem hodnot hlavních deformací, a tím nedochází k dalšímu posunu křivek mezních přetvoření. Poslední dva sloupce poté představují celkové rozdíly hodnot mezi DMP1 a DMP3.

Posledními částmi experimentu jsou výzkumy rozložení deformace v okolí trhliny a modelové výpočty závislosti zátěžných sil na průhybu kruhové desky (rondelu). První jmenovaný výzkum prokázal, že velmi záleží (zejména u materiálu Docol 1200M) na správné volbě vhodných elementů sítě v okolí trhliny, což se poté velmi odrazí na dosažených výsledných deformacích. Výsledkem druhé části jsou dva grafy Obr. 9.26 a Obr. 9.27 (oba sestaveny pro plech tloušťky 2 mm, poloměr desky 60 mm a mechanické hodnoty materiálu Docol 1200M). První představuje závislosti sil na průhybu (pro malé a velké deformace) vypočtené dle teorie tenkých desek a druhý tyto křivky doplňuje o průběh vypočtený dle teorie membrán. Oba grafy též obsahují experimentálně zjištěnou závislost hledaných veličin (síly a průhybu). Jelikož pro hraniční hodnotu průhybu (mezi výpočtem dle teorie tenkých desek a membrán) $w = 5$ mm byla experimentem zjištěna zátěžná síla o velikosti $F = 16650,90$ N, která se nejvíce blíží síle získané výpočtem dle teorie tenkých desek a

malých průhybů $F = 12930,11$ N (síla pro desky a velké průhyby $F = 33770,16$ N a síla pro membrány $F = 43402,78$ N), lze říci, že náš případ (použitý materiál, technologické podmínky) nejlépe matematicky popisuje právě tato desková teorie. V posledním kroku bylo také spočteno membránové ($\sigma'_{r,t} = 1497,22$ MPa) a ohybové napětí ($\sigma''_{r,t} = 864,31$ MPa) na obvodu desky. Po sečtení obou těchto hodnot bylo získáno výsledné napětí na obvodu desky ($\sigma_{r,t} = 2361,53$ MPa). Porovnáním zátěžné síly, zjištěné experimentem $F = 16650,90$ N (pro $w = 5$ mm), a vypočteného napětí na obvodu desky s mechanickými hodnotami vzorku ($F_{p0,2} = 26618,90$ N, $F_m = 31040,00$ N, $R_{p0,2} = 1048,81$ MPa, $\sigma_m = 1269,60$ MPa), zjistíme, že velikost síly nepřekročila příslušnou mez kluzu ani mez pevnosti zatímco hodnotu napětí ano. I přes tyto zdánlivě nepříznivé okolnosti nedošlo k porušení vzorku, a tak lze říci, že by za obdobných zátěžných podmínek (použitá síla, pružné deformace a rychlost zatěžování) mohl obstát i větší výtah karosářského typu, zhotovený z testovaného materiálu.

Vzhledem ke všem zjištěným poznatkům uvedeným v experimentální části této disertační práce je možné konstatovat, že u materiálu Docol 1200M má zkušební rychlost (rychlost nárazu na překážku) velký vliv na jeho výsledné hodnoty, zejména mechanické. Materiál si s rostoucí rychlostí udržuje vysoké hodnoty napětí, avšak tažnosti a hlavní deformace v diagramech mezních přetvoření značně klesají. Vzhledem k těmto poznatkům by měl být materiál užit pro nepřliš členité výrobky, které při svém zhotovení zcela nevyčerpají jeho schopnost deformace bez porušení. Při větších deformacích či vyšší členitosti součásti by bylo vhodné netvářet materiál zastudena, ale použít poloohřev či tváření zatepla.

11. DOPORUČENÍ PRO DALŠÍ VÝZKUM

V disertační práci byla provedena celá řada měření vlivu rychlosti na zvolený pevnostní materiál Docol 1200M. Hlavní pozornost byla věnována výzkumu změn mechanických vlastností při rychlostních tahových zkouškách a zjištění maximálních hodnot deformací pro různé stavy napjatosti zvoleného materiálu.

Pro tahové zkoušky prováděné za vysokých rychlostí byla vytvořena nová metodika práce, neboť doposud nebyly provedeny jiné podobné testy pevnostních materiálů a současně bylo užito i nestandardního trhacího zařízení SOKOL 400. Obdobně bylo zapotřebí stanovit i optimální aproximační podmínky pro zjištění konstant C a n . Nově byla tedy vytvořena také metodika tohoto vyhodnocení, speciálně určená pro zvolený materiál. Zjištění DMP bylo provedeno již osvědčenými a na katedře prověřenými metodami a postupy.

Aby bylo možno ještě lépe posoudit a zhodnotit zjištěné poznatky o testovaném materiálu a zejména o jeho chování za proměnných rychlostních podmínek, měla by být v budoucnu proměřena jednak větší škála mechanických zkoušek (například ohyb, vrubová houževnatost) a jednak také zhotoven vyšší počet diagramů mezních přetvoření. Tyto DMP by měly rovnoměrně pokrýt celou oblast možných nárazových rychlostí, a tak vytvořit jasnější představu o tom, zda již opravdu další nárůst rychlosti testu nevede k poklesu křivek mezních přetvoření v oblasti hlavních deformací, jak je, díky současným poznatkům, uvedeno v diskuzi výsledků této práce. Zajímavý by byl také výzkum DMP při různé velikosti předdeformace zkušebních vzorků, a to jak ve směru působícího následného zatížení, tak i ve směru opačném. Neméně zajímavé by bylo zjištění reálných průhybů vzorků v průběhu zatěžování a jejich napěťových poměrů. Tyto výsledky by mohly být porovnány s hodnotami vypočtenými dle teorie tenkých desek nebo membrán a hodnotami z numerických simulací.

Získané výsledky experimentálních měření, uvedených v této disertační práci, budou použity jako vstupní parametry pro numerické simulace CRASH testů automobilů, jejichž nosné části karosérie jsou (například práh vozu Škoda Roomster) a nebo v budoucnu budou zhotoveny z testovaného materiálu Docol 1200M. Tímto se zvýší bezpečnost automobilové karoserie, což je velmi důležité jak pro vlastní osádku automobilu, tak i pro celkovou bezpečnost provozu. Získáním dalších případných dat z výše jmenovaných doporučených zkoušek by došlo k zpřesnění celé simulace a bylo by možné provádět komplexnější analýzy chování výrobků z tohoto materiálu při rázových účincích.

12. ZÁVĚR

Vznik předkládané disertační práce, nazvané „Vliv rychlosti přetvoření na mezní deformace pevnostních plechů“, byl mimo jiné iniciován potřebami automobilového průmyslu dostatečně poznat chování zvoleného pevnostního materiálu v podmínkách napodobujících svými rychlostními parametry nákladné bariérové zkoušky (CRASH testy).

V technické praxi jsou pro zjištění základních mechanických hodnot běžně prováděny statické zkoušky tahem, které samozřejmě svými rychlostními parametry naprosto neodpovídají reálným podmínkám při nárazu vozidla na překážku. Stejně tak případné diagramy mezních přetvoření, zjištěné pouhým vypínáním vzorků na hydraulickém lisu, neodráží reálnou situaci. Jediným východiskem (před provedením vlastního CRASH testu) v těchto případech bývá počítačová simulace, která ovšem vyžaduje řadu vstupních hodnot odpovídajících svými parametry simulovanému ději.

Problémy při testování karosérií mohou zejména nastat při užití některých pevnostních materiálů, které sice vykazují vysoké hodnoty napětí, ale jejich schopnost deformace za studena je omezená. To je případ i testovaného materiálu Docol 1200M. Proto bylo velmi důležité určit přesné hodnoty hledaných mechanických veličin a simulačních konstant za různých rychlostních podmínek, co možná nejvěrněji odrážejících reálné děje.

Celá práce byla z výše uvedených důvodů zaměřena jak v teoretické, tak i experimentální části, na komplexní charakteristiku problematiky pevnostních plechů s bližším zaměřením na zvolený materiál. V teoretické části se disertační práce zabývá stručným přehledem problematiky karosářských plechů používaných v dnešní době v automobilovém průmyslu. Zejména hlavními vlivy působícími na proces tažení a metodami zkoumajícími vhodnost materiálů pro daný výrobek.

Cílem experimentální části disertační práce bylo zhodnotit vlastnosti a chování vysokopevnostního materiálu Docol 1200M za různých rychlostních podmínek. Zkoumány byly dvě tloušťky tohoto materiálu, a to plechy 2 mm a 0,7 mm. Vlastní výzkum byl rozdělen do několika částí. V první etapě bylo provedeno ověření základních mechanických hodnot zkoušeného materiálu tahovými zkouškami, a to statickou zkouškou tahem ($v = 10 \text{ mm/min}$) a dvěma rychlostními zkouškami ($v = 600 \text{ mm/min}$ a $v = 24000 \text{ mm/min}$). Součástí tohoto měření bylo také vyhodnocení změn vnitřní struktury materiálu v závislosti na zátěžných rychlostech. Druhá část měření spočívala ve zjištění mezní deformace tohoto materiálu při různých stavech napjatosti a testovacích rychlostech. Proběhlo měření pomalou zátěžnou rychlostí ($v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$), provedené na hydraulickém lisu CBA300/63 a

testování dvěma extrémními rychlostmi ($v_2 = 17,78 \text{ m.s}^{-1}$ a $v_3 = 22,5 \text{ m.s}^{-1}$), realizované na pneumatickém dělu. Zatěžování sad různě širokých vzorků opatřených deformační sítí bylo provedeno do okamžiku vzniku trhliny, konečná grafická vizualizace zjištěných hodnot deformací byla realizována pomocí diagramů mezních přetvoření. Třetí, a také poslední část, tvořily dva experimenty. Pomocí optického systému ARGUS bylo na vybraném rondelu, zhotoveném z materiálu Docol 1200M $t = 2 \text{ mm}$, změřeno rozložení deformace v okolí trhliny, které prokázalo silnou koncentraci deformace na vrcholu zkušební vzorku. Tento test potvrdil rozdílnost křivek mezních přetvoření experimentálně zjištěných, za stejných rychlostních podmínek, z deformací elementů na hrotu a okraji trhliny. Nakonec bylo provedeno měření závislosti průhybu kruhové desky na zátížení. Tato data byla následně porovnána s vypočtenými hodnotami dle teorie tenkých desek a membrán. Bylo zjištěno, že naše podmínky (způsob zatěžování, rozměry polotovaru a vlastnosti materiálu) nejlépe popisuje metoda výpočtu dle teorie tenkých desek a malých průhybů, která tak může být použita (při zachování technologických podmínek a platnosti dané teorie) pro přibližné výpočty karosářských výlisků.

Výsledné hodnoty zkoušeného materiálu uveřejněné v této práci zlepší bezpečnost pasažérů díky zpřesnění vstupních dat určených pro navrhování výztužných dílů automobilů a simulačních programů bariérových testů (software PAM CRASH), potýkajících se s nepřesnostmi způsobenými nezahrnutím reálného procesu zpracování materiálů do výpočtu.

Disertační práce vznikla za podpory výzkumného záměru MŠMT ČR - MSM 4674788501 a GAČR 101/07/P113.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BLAŠČÍK, F., - POLÁK, K.: Teória tvárnenia, ALFA Bratislava a SNTL Praha, 1985, str.144-350.
- [2] BOČEK, J.: Vliv rychlosti deformace na velikost mezního přetvoření, Diplomová práce, TUL, Liberec, 2005, 62 stran.
- [3] BUCHAR, Z.: Diagramy mezních přetvoření tenkých hlubokotažných plechů, Kandidátská disertační práce, TUL, Liberec, 1987, str. 16-120.
- [4] BUCHAR, Z.: Komplexní analýza přetvoření výlisků nepravidelných tvarů, Habilitační práce, TUL, Liberec 1996, str. 19-38.
- [5] DOUBEK, P.: Výzkum deformačního chování vysokopevnostních plechů při vyšších rychlostech deformace, Disertační práce, TUL, Liberec, 2004, 166 stran.
- [6] JANATKA, J.: Pružnost a pevnost II, ČVUT a SNTL, Praha, 1957, str.143-166.
- [7] JAREŠ, V.: Základní zkoušky kovů a jejich teorie, Academia, Praha, 1966, str. 86-91.
- [8] KOLNEROVÁ, M.: Vliv technologických podmínek na vznik zadírání pozinkovaných plechů při tažení, Disertační práce, TUL, Liberec, 2005, str. 104-109.
- [9] KOVÁRNÍK, L.-DOUBEK, P.-SOLFRONK, P.-KOLNEROVÁ, M.: Moderní digitální technika při analýze deformace plechových výlisků, Mezinárodní vědecká konference Forming 2004, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Štrbské Pleso, 2004, str. 241-246, ISBN 80-227-2091-7.
- [10] KRÍŽ, V.-VÁVRA, P.: Strojírenská příručka, svazek 3, J – Materiál a jeho zkoušení, SCIENTIA, spol. s r.o., Praha, 1993, str 145-191, ISBN 80-85827-23-9.
- [11] MACHEK, V.: Tenké ocelové pásy a plechy válcované zastudena, SNTL, Praha, 1987, str. 169-173.
- [12] MICHALEC, J.: Pružnost a pevnost II, ČVUT, Praha, 1994, str. 89-102, ISBN 80-01-01087-2.
- [13] SCHNEIEDER, Z.: Vypracování metodiky zkoušení vrubové houževnatosti u plechů, Bakalářská práce, TUL, Liberec, 2007, str. 34-36.
- [14] STOROŽEV, M., V. - POPOV, J., A.: Teória tvárnenia kovov, ALFA Bratislava a SNTL Praha, 1978, str. 65-202.
- [15] ŠUBRT, L.: Teorie desek a skořepin, ČVUT, Praha, str. 4-42, 1991, ISBN 80-01-00603-4.
- [16] TMĚJ, J.: Tváření kovů (Vybrané statě z teorie), VŠST, Liberec, 1977, str. 80-98.

-
- [17] Zkouška tahem pro kovové materiály, Norma, 2004, ČSN EN 10002-1.
- [18] Ploché výrobky válcované za studena z hlubokotažných ocelí k tváření za studena - Technické dodací podmínky, Stanovení součinitele normálové anizotropie a exponentu deformačního zpevnění, Norma, 2004, ČSN EN 10130+A1.
- [19] Aktualizace názvů a označování mechanických parametrů, Statická zkouška tahem, Norma, 2007, ČSN EN 10002-1.
- [20] Aktualizace názvů a označování mechanických parametrů, Rázové zkoušky v ohybu, Norma, 2007, ČSN EN 10045-1.
- [21] Gom: Optical Measuring Techniques ARGUS, [06.12.2006]
<<http://www.gom.com/EN/measuring.systems/argus/system/system.html>>
- [22] Mcae Systems: ARGUS, [06.12.2006]
<<http://www.mcae.cz/katalog.php?lang=cs&id=146>>
- [23] MM Průmyslové spektrum: Hydromechanické tváření, [08.01.2008]
<<http://www.mmspektrum.com/clanek/hydromechanicke-tvareni-vnejsim-vodnim-pretlakem>>
- [24] MM Průmyslové spektrum: Sendvičové konstrukce, [08.01.2008]
<<http://www.mmspektrum.com/clanek/sendvicove-konstrukce>>
- [25] MM Průmyslové spektrum: Tailored blanks, [08.01.2008]
<<http://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-tailored-blanks>>
- [26] MM Průmyslové spektrum: Tváření plechů, [08.01.2008]
<<http://www.mmspektrum.com/clanek/o-modernim-tvareni-plechu-poprve>>
- [27] Msol: ARGUS, [06.12.2006]
<<http://www.msol.co.jp/mda/gom/argus/argus.html>>
- [28] Petrol CZ: ULSAC [10.01.2008]
<<http://www.petrol.cz/noviny/clanek.asp?id=2032>>
- [29] Simcar: Samonosná karosérie, [04.01.2008]
<<http://www.simcar.cz/slovník/samonosna-karoserie.html>>
- [30] SSAB: Docol, [29.11.2007]
<http://www.ssabdirect.com/templates/ArticlePage____6248.aspx>
- [31] Thyssen Krupp: Tailored Blanks, [29.11.2007]
<<http://www.thyssenkrupptailoredblanks.it/default.asp?page=7&titolo=1&lingua=inglese>>
- [32] Thyssen Krupp: Martensitic-phase steel, [29.11.2007]
-

-
- <<http://www.thyssenkrupp-steel.com/auto/en/publikationen/index.jsp?catcode=tkscsauto.pub.produktinformationen>>
- [33] TMS: Metallic Foams, [08.01.2008]
<<http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0012/Banhart-0012.html>>
- [34] Wikipedia: Samonosná karosérie, [04.01.2008]
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Samonosn%C3%A1_karoserie>
- [35] World Auto Steel: ULSAB, [08.01.2008]
<<http://www.ulsab.org>>
- [36] World Auto Steel: ULSAB-AVC, [08.01.2008]
<<http://www.ulsab.org>>
- [37] World Auto Steel: ULSAC, [08.01.2008]
<<http://www.ulsab.org>>
- [38] World Auto Steel: ULSAS, [08.01.2008]
<<http://www.ulsab.org>>

PUBLIKAČNÍ ČINNOST K TÉMATU PRÁCE

1. BOČEK J.: Vliv rychlosti deformace na velikost mezního přetvoření, Diplomová práce, TUL, Květen 2005, Liberec, 62 stran.
2. BOČEK J., DOUBEK P., KOLNEROVÁ M., KOVÁRNÍK L.: Vliv rychlosti deformace na velikost mezního přetvoření. Strojírenská technologie, časopis pro vědu, výzkum a výrobu, Zvláštní číslo, Prosinec 2005, Ústí nad Labem, str. 17-20, ISSN 1211-4162.
3. BOČEK J., DOUBEK P., KOLNEROVÁ M., KOVÁRNÍK L.: Vliv rychlosti deformace na velikost mezního přetvoření. Nové poznatky v technologiích a technologické informace '05, Leden 2006, Ústí nad Labem, str. 14-15 CD, ISBN 80-7044-743-5.
4. BOČEK J., DOUBEK P., KOLNEROVÁ M., KOVÁRNÍK L.: Vliv rychlosti deformace na diagramy mezních přetvoření. Mezinárodní konference PRO-TECH-MA, Červen 2006, Košice, str. 43-48, MSM 4674788501, ISSN 1335-2393.
5. BOČEK J., DOUBEK P., KOLNEROVÁ M., KOVÁRNÍK L.: Experimentální zjištění diagramů mezních přetvoření při vyšších rychlostech deformace. Mezinárodní konference FORM 2006, Září 2006, Brno, str. 8 CD, MSM 4674788501, ISBN 80-214-3231-4.
6. BOČEK J.: Processes of findings by limit deformation. Mezinárodní baťova doktorandská konference, Duben 2007, Zlín, str. 251 CD, MSM 4674788501, ISBN 978-80-7318-529-9.
7. BOČEK J.: Modern processes of determination by limit deformation. 1. medzinárodná konferencia mladých výskumníkov a doktorandov ERIN 2007, Duben 2007, Bratislava, str. 118 CD, MSM 4674788501, ISBN 978-80-227-2636-8.
8. BOČEK J., DOUBEK P., KOLNEROVÁ M., KOVÁRNÍK L.: Experimental determination of limiting transformation with higher strain rate. 16. mezinárodní konference metalurgie a materiálů METAL 2007, Květen 2007, Hradec nad Moravicí, str. 53 CD, MSM 4674788501, ISBN 978-80-86840-33-8.
9. BOČEK, J.: Experimental tests of bodywork sheets. 10. MEDZINÁRODNÁ KONFERENCIA TECHNOLOGIA 2007, Září 2007, Bratislava, str. 69 CD, MSM 4674788501, ISBN 978-80-227-2712-9.



10. BOČEK, J.: Modern experimental testing methods of bodywork sheets. Strojírenská technologie, časopis pro vědu, výzkum a výrobu, Zvláštní číslo, Prosinec 2007, Ústí nad Labem, MSM 4674788501, ISSN 1211-4162.
11. BOČEK, J.: Modern experimental testing methods of bodywork sheets. Nové poznatky v technologiích a technologické informace 2008, Leden 2008, Ústí nad Labem, MSM 4674788501, ISBN 978-80-7044-969-1.
12. BOČEK, J.: Vliv rychlosti deformace na diagram mezních přetvoření hlubokotažného materiálu. Posterová výstava MSV, Září 2008, Brno, MSM 4674788501, Poster.

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA 1: Tahová zkouška – Docol 1200M – $t = 2 \text{ mm}$ – 10 mm/min

P1 - 1/3	Protokol pro směr 0°	P- 1 -
P1 - 2/3	Protokol pro směr 45°	P- 2 -
P1 - 3/3	Protokol pro směr 90°	P- 3 -

PŘÍLOHA 2: Tahová zkouška – Docol 1200M – $t = 2 \text{ mm}$ – 600 mm/min

P2 - 1/3	Protokol pro směr 0°	P- 4 -
P2 - 2/3	Protokol pro směr 45°	P- 5 -
P2 - 3/3	Protokol pro směr 90°	P- 6 -

PŘÍLOHA 3: Tahová zkouška – Docol 1200M – $t = 2 \text{ mm}$ – 24000 mm/min

P3 - 1/3	Protokol pro směr 0°	P- 7 -
P3 - 2/3	Protokol pro směr 45°	P- 8 -
P3 - 3/3	Protokol pro směr 90°	P- 9 -

PŘÍLOHA 4: Tahová zkouška – Docol 1200M – $t = 0,7 \text{ mm}$ – 10 mm/min

P4 - 1/3	Protokol pro směr 0°	P- 10 -
P4 - 2/3	Protokol pro směr 45°	P- 11 -
P4 - 3/3	Protokol pro směr 90°	P- 12 -

PŘÍLOHA 5: Tahová zkouška – Docol 1200M – $t = 0,7 \text{ mm}$ – 600 mm/min

P5 - 1/3	Protokol pro směr 0°	P- 13 -
P5 - 2/3	Protokol pro směr 45°	P- 14 -
P5 - 3/3	Protokol pro směr 90°	P- 15 -

PŘÍLOHA 6: Tahová zkouška - Docol 1200M - $t = 0,7 \text{ mm}$ – 24000 mm/min

P6 - 1/3	Protokol pro směr 0°	P- 16 -
P6 - 2/3	Protokol pro směr 45°	P- 17 -
P6 - 3/3	Protokol pro směr 90°	P- 18 -

PŘÍLOHA 7: Diagramy mezních přetvoření

P7 - 1/3	Tab. 1: Soubory naměřených hodnot pro DMP1 - $v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$	P- 19 -
P7 - 2/3	Tab. 2: Soubory naměřených hodnot pro DMP2 - $v_2 = 17,78 \text{ m.s}^{-1}$	P- 20 -
P7 - 3/3	Tab. 3: Soubory naměřených hodnot pro DMP3 - $v_3 = 22,5 \text{ m.s}^{-1}$	P- 21 -



PŘÍLOHA 1: Tahová zkouška – Docol 1200M – $t = 2 \text{ mm}$ – 10 mm/min

P1 - 1/3 Protokol pro směr 0°

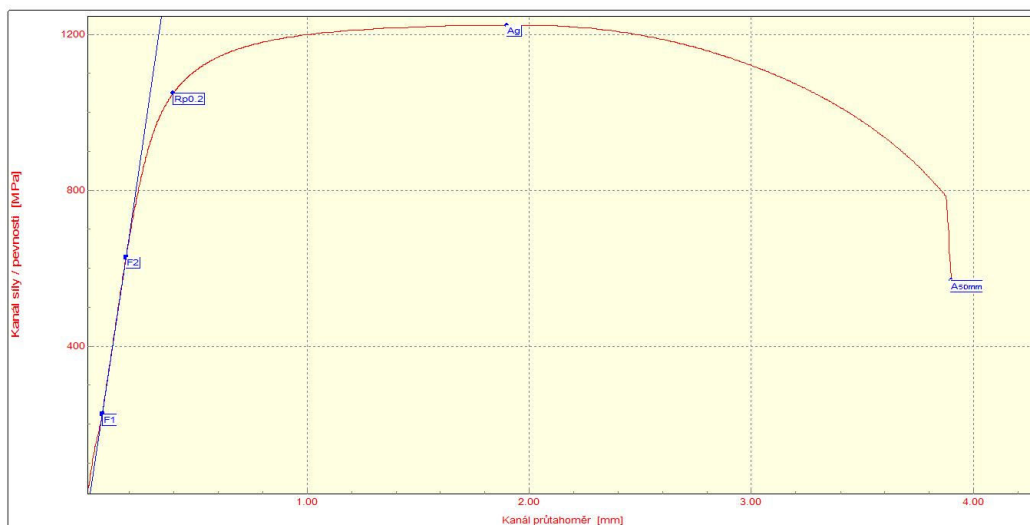
ZKOUŠKA TAHEM

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : Docol 1200M - $t = 2 \text{ mm}$
Norma : ČSN EN 10002-1
Směr odebrání vzorku : 0°
Rychlost zatěžování : 10 mm/min
Vypracoval : Ing. Jan Boček
Datum zkoušky : 20.03. 2008

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A50mm %
1	1070.92	1233.00	2.72	3.30
2	1084.15	1246.38	2.96	7.62
3	1048.81	1223.01	3.11	7.47
4	1066.34	1227.50	2.77	3.42
5	1103.31	1263.86	2.96	3.56



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

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

<http://www.ksp.tul.cz>



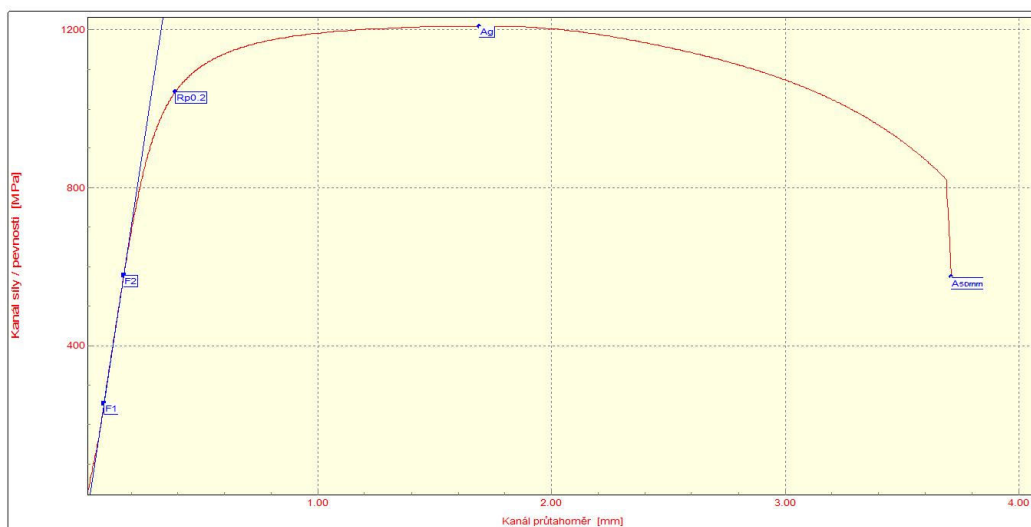
ZKOUŠKA TAHEM

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : Docol 1200M - t = 2 mm
Norma : ČSN EN 10002-1
Směr odebrání vzorku : 45°
Rychlost zatěžování : 10 mm/min
Vypracoval : Ing. Jan Boček
Datum zkoušky : 20.03. 2008

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A50mm %
1	1043.24	1209.25	2.72	7.09
2	1023.38	1211.26	2.21	3.63
3	1075.79	1229.53	1.79	3.76
4	1072.39	1231.10	2.29	6.78
5	1045.19	1220.35	2.60	7.11



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

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

<http://www.ksp.tul.cz>



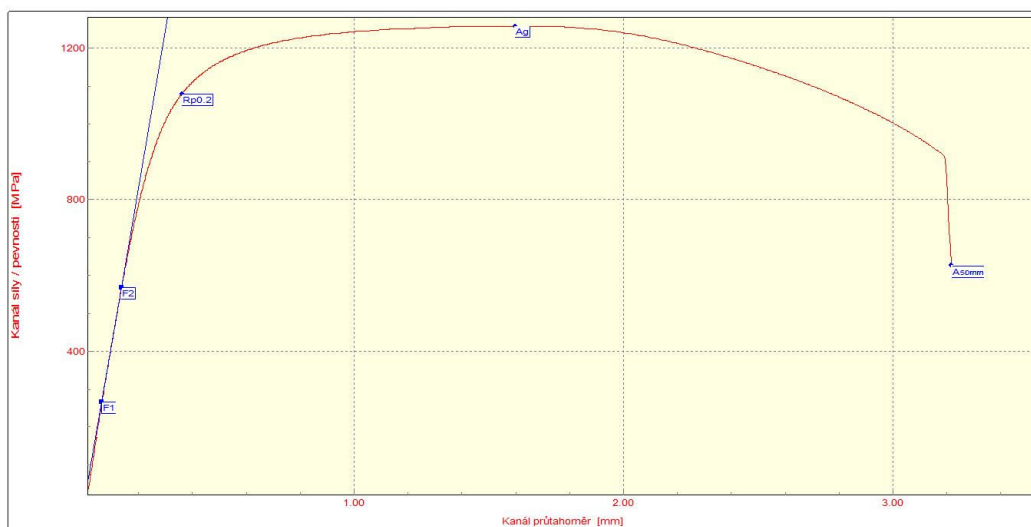
ZKOUŠKA TAHEM

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : Docol 1200M - t = 2 mm
Norma : ČSN EN 10002-1
Směr odebrání vzorku : 90°
Rychlost zatěžování : 10 mm/min
Vypracoval : Ing. Jan Boček
Datum zkoušky : 20.03.2008

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A50mm %
1	1081.39	1240.69	1.92	4.34
2	1155.09	1264.16	2.36	2.94
3	1092.88	1252.96	2.40	6.43
4	1078.85	1257.90	2.59	6.13
5	1097.92	1248.13	2.30	5.84



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

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

<http://www.ksp.tul.cz>



PŘÍLOHA 2: Tahová zkouška – Docol 1200M – $t = 2 \text{ mm}$ – 600 mm/min

P2 - 1/3 Protokol pro směr 0°

ZKOUŠKA TAHEM

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : Docol 1200M - $t = 2 \text{ mm}$
Směr odebrání vzorku : 0°
Rychlost zatěžování : 600 mm/min
Vypracoval : Ing. Jan Boček
Datum zkoušky : 31.03. 2008

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A50mm %
1	1052.09	1244.02	2.17	6.64
2	1053.02	1253.23	2.63	6.70
3	1056.97	1255.55	2.62	6.61
4	1061.21	1257.42	2.35	3.20
5	1064.27	1254.56	2.45	3.41



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

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

<http://www.ksp.tul.cz>



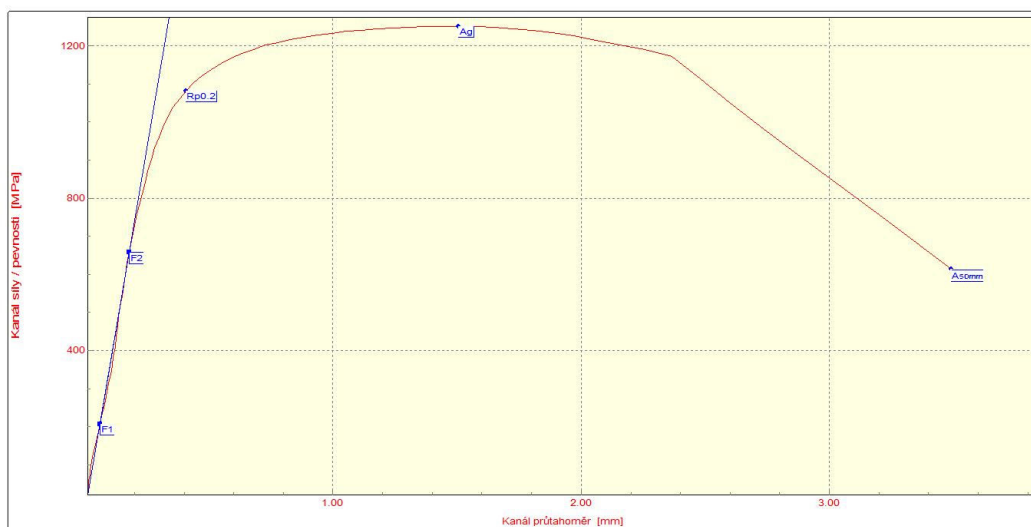
ZKOUŠKA TAHEM

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : Docol 1200M - t = 2 mm
Směr odebrání vzorku : 45°
Rychlost zatěžování : 600 mm/min
Vypracoval : Ing. Jan Boček
Datum zkoušky : 31.03. 2008

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A50mm %
1	1082.96	1251.42	2.34	6.65
2	1042.08	1230.47	2.44	6.54
3	1048.34	1230.53	1.52	2.22
4	1049.65	1221.57	1.61	2.92
5	1041.50	1239.27	2.79	7.33



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

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

<http://www.ksp.tul.cz>



ZKOUŠKA TAHEM

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : Docol 1200M - t = 2 mm
Směr odebrání vzorku : 90°
Rychlost zatěžování : 600 mm/min
Vypracoval : Ing. Jan Boček
Datum zkoušky : 31.03. 2008

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A50mm %
1	1081.02	1264.73	2.01	3.31
2	1100.33	1276.45	2.07	3.00
3	1092.29	1264.94	1.53	2.93
4	1087.29	1235.23	1.75	5.88
5	1072.94	1268.10	2.26	6.13



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

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

<http://www.ksp.tul.cz>



PŘÍLOHA 3: Tahová zkouška – Docol 1200M – $t = 2 \text{ mm}$ – 24000 mm/min

P3 - 1/3 Protokol pro směr 0°

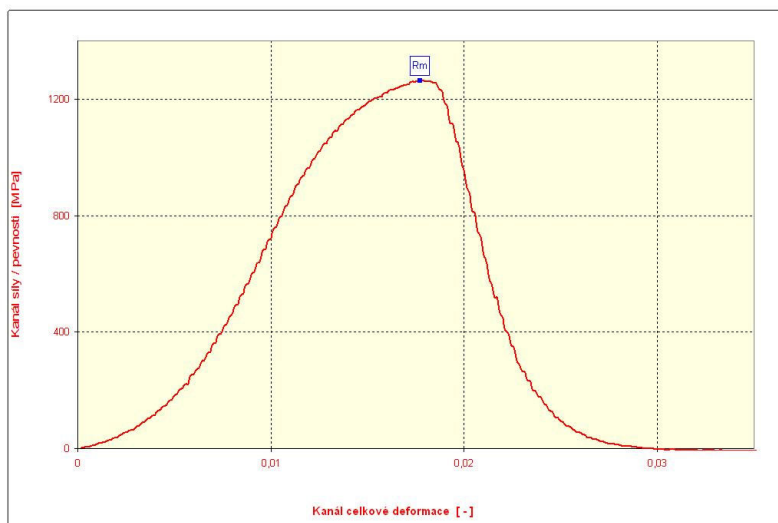
ZKOUŠKA TAHEM

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : Docol 1200M - $t = 2 \text{ mm}$
Směr odebrání vzorku : 0°
Rychlost zatěžování : 24000 mm/min
Vypracoval : Ing. Jan Boček
Datum zkoušky : 31.03. 2008

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rm MPa	A50mm %
1	1282.66	6.16
2	1263.69	3.90
3	1280.82	3.00
4	1271.58	0



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

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

<http://www.ksp.tul.cz>



ZKOUŠKA TAHEM

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : Docol 1200M - t = 2 mm

Směr odebrání vzorku : 45°

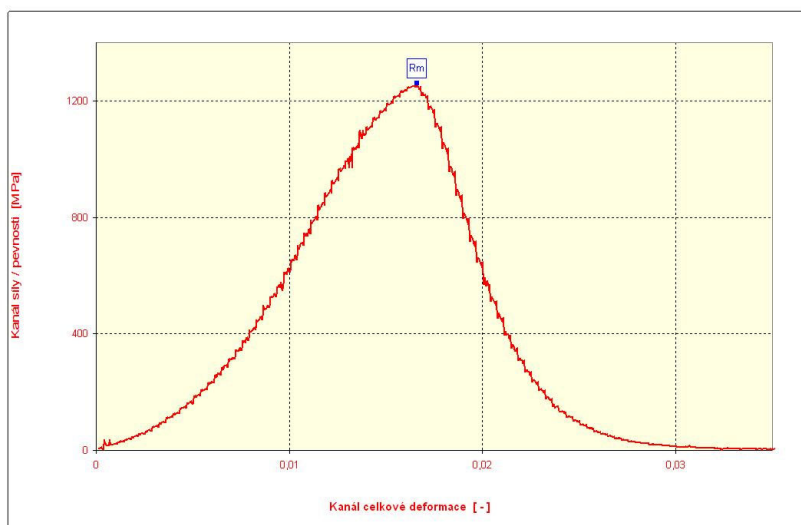
Rychlost zatěžování : 24000 mm/min

Vypracoval : Ing. Jan Boček

Datum zkoušky : 31.03. 2008

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rm MPa	As0mm %
1	1259.22	4.35
2	1264.63	2.44
3	1242.51	3.53
4	1242.81	2.76
5	1252.81	5.12



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



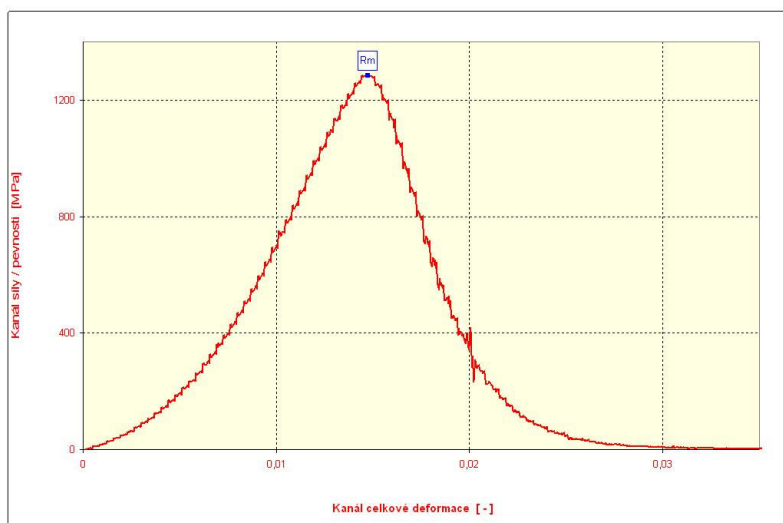
ZKOUŠKA TAHEM

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : Docol 1200M - t = 2 mm
Směr odebrání vzorku : 90°
Rychlost zatěžování : 24000 mm/min
Vypracoval : Ing. Jan Boček
Datum zkoušky : 31.03. 2008

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rm MPa	A50mm %
1	1282.88	2.74
2	1266.55	5.08
3	1283.35	4.27
4	1284.85	4.46
5	1280.32	2.42



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

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

<http://www.ksp.tul.cz>



PŘÍLOHA 4: Tahová zkouška – Docol 1200M – $t = 0,7$ mm – 10 mm/min

P4 - 1/3 Protokol pro směr 0°

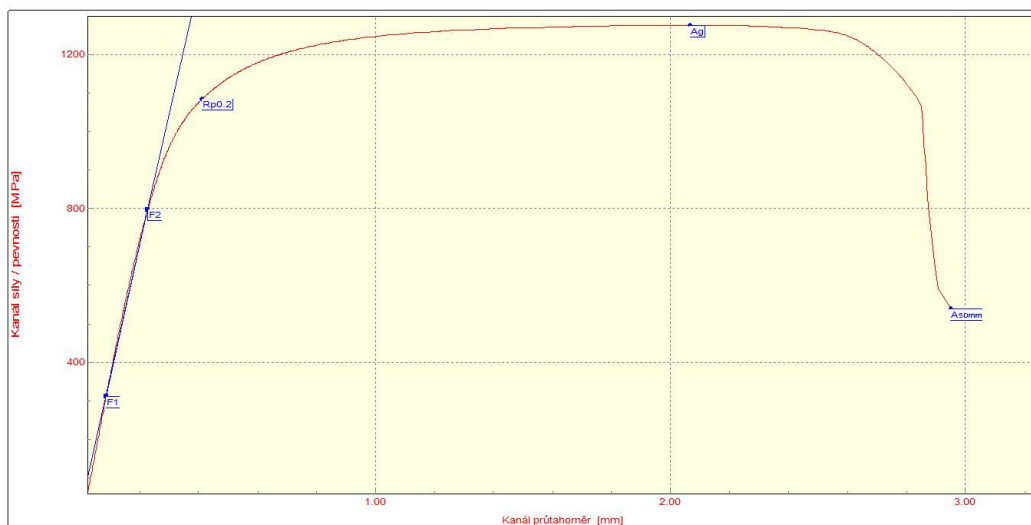
ZKOUŠKA TAHEM

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : Docol 1200M - $t = 0,7$ mm
Norma : ČSN EN 10002-1
Směr odebrání vzorku : 0°
Rychlost zatěžování : 10 mm/min
Vypracoval : Ing. Jan Boček
Datum zkoušky : 14.04. 2008

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A50mm %
1	1134.94	1326.70	3.10	3.88
2	1121.64	1296.56	3.02	5.13
3	1097.39	1269.75	2.93	4.89
4	1084.36	1275.67	3.40	5.60
5	1129.93	1281.51	3.25	5.64



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

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

<http://www.ksp.tul.cz>



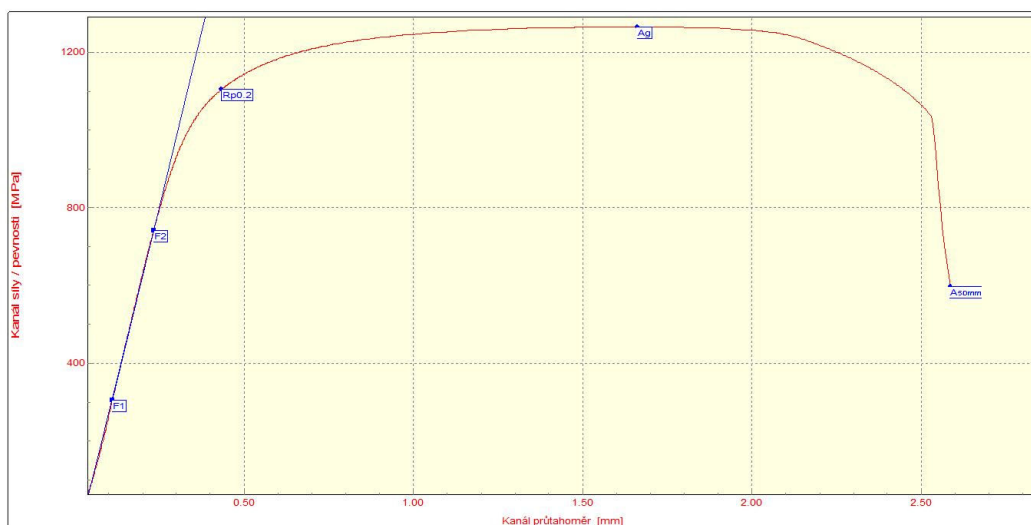
ZKOUŠKA TAHEM

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : Docol 1200M - t = 0,7 mm
Norma : ČSN EN 10002-1
Směr odebrání vzorku : 45°
Rychlost zatěžování : 10 mm/min
Vypracoval : Ing. Jan Boček
Datum zkoušky : 14.04. 2008

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A50mm %
1	1074.48	1262.05	2.57	4.01
2	1116.85	1269.90	2.24	2.93
3	1105.60	1266.12	2.56	4.79
4	1099.60	1272.39	2.74	5.22



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

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

<http://www.ksp.tul.cz>



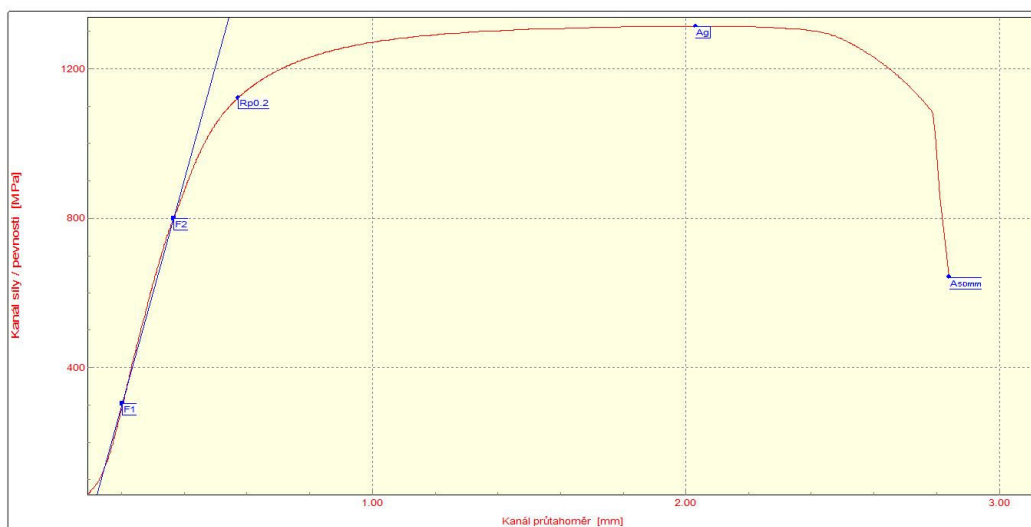
ZKOUŠKA TAHEM

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : Docol 1200M - t = 0,7 mm
Norma : ČSN EN 10002-1
Směr odebrání vzorku : 90°
Rychlost zatěžování : 10 mm/min
Vypracoval : Ing. Jan Boček
Datum zkoušky : 14.04. 2008

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A50mm %
1	1071.42	1309.79	3.01	5.01
2	1133.41	1311.16	2.01	2.56
3	1146.94	1318.28	2.15	3.94
4	1139.03	1321.46	2.67	4.60
5	1123.43	1313.25	2.99	5.05



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

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

<http://www.ksp.tul.cz>



PŘÍLOHA 5: Tahová zkouška – Docol 1200M – $t = 0,7$ mm – 600 mm/min

P5 - 1/3 Protokol pro směr 0°

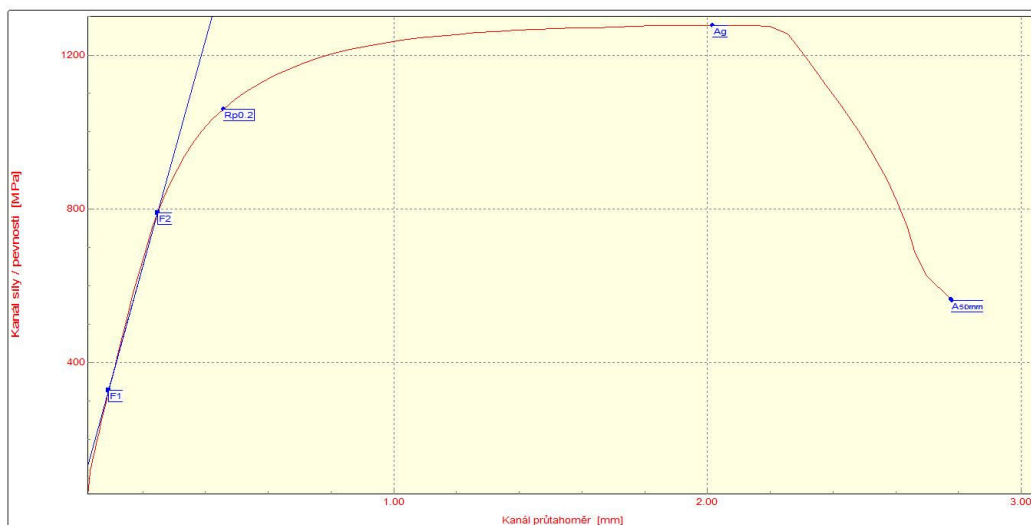
ZKOUŠKA TAHEM

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : Docol 1200M - $t = 0,7$ mm
Směr odebrání vzorku : 0°
Rychlost zatěžování : 600 mm/min
Vypracoval : Ing. Jan Boček
Datum zkoušky : 14.04. 2008

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A50mm %
1	1094.85	1291.07	2.46	5.49
2	1105.09	1275.71	3.01	6.39
3	1124.03	1305.32	2.45	5.79
4	1093.29	1296.41	2.84	6.27
5	1058.47	1276.30	3.21	5.21



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

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

<http://www.ksp.tul.cz>



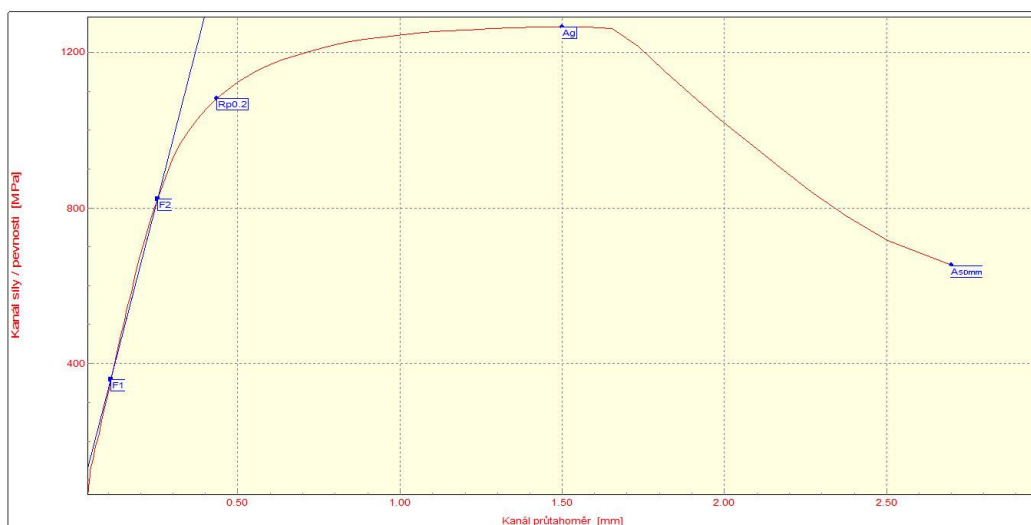
ZKOUŠKA TAHEM

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : Docol 1200M - t = 0,7 mm
Směr odebrání vzorku : 45°
Rychlost zatěžování : 600 mm/min
Vypracoval : Ing. Jan Boček
Datum zkoušky : 14.04. 2008

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A50mm %
1	1065.62	1235.84	2.14	5.68
2	1038.71	1203.76	1.90	3.34
3	1059.24	1236.37	2.76	6.29
4	1081.98	1266.43	2.22	5.00



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

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

<http://www.ksp.tul.cz>



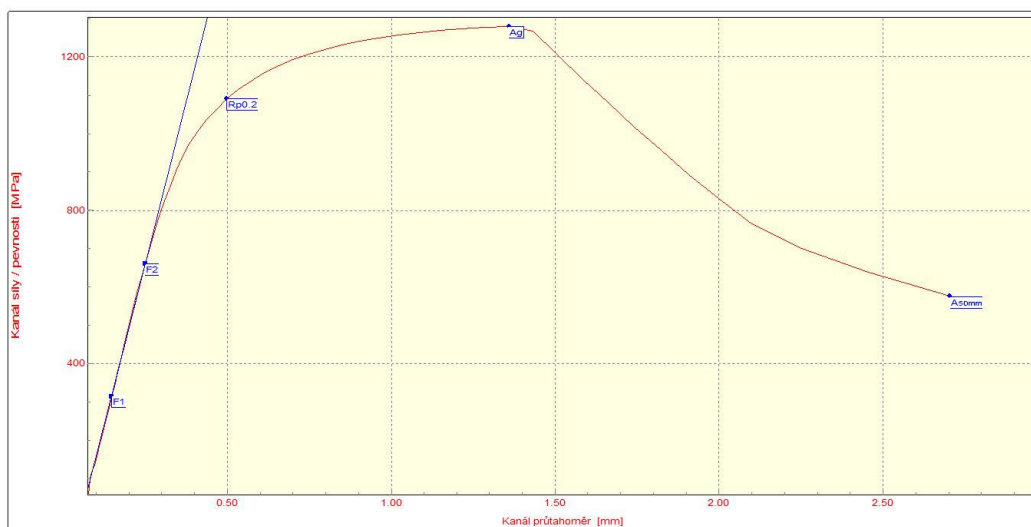
ZKOUŠKA TAHEM

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : Docol 1200M - t = 0,7 mm
Směr odebrání vzorku : 90°
Rychlost zatěžování : 600 mm/min
Vypracoval : Ing. Jan Boček
Datum zkoušky : 14.04. 2008

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A50mm %
1	1098.81	1300.21	1.49	4.27
2	1078.22	1280.59	2.18	4.65
3	1104.92	1291.50	1.61	3.10
4	1072.98	1295.34	1.84	5.12
5	1090.79	1279.21	1.86	4.96



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

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

<http://www.ksp.tul.cz>



PŘÍLOHA 6: Tahová zkouška - Docol 1200M - $t = 0,7$ mm – 24000 mm/min

P6 - 1/3 Protokol pro směr 0°

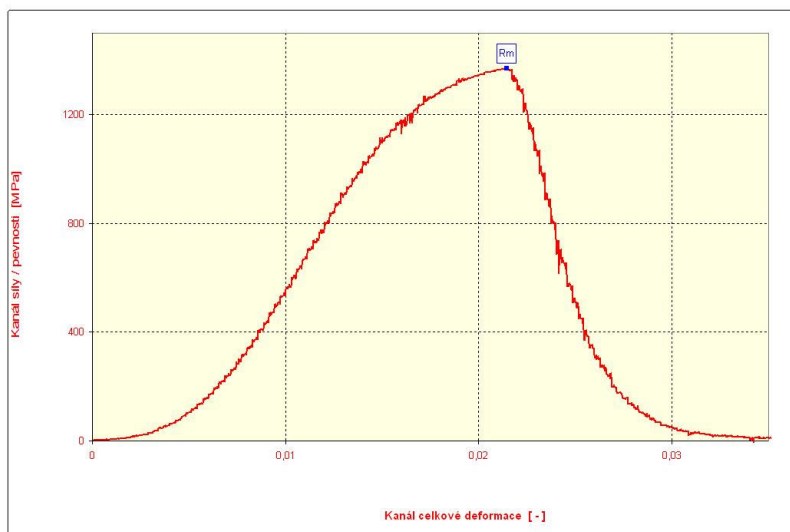
ZKOUŠKA TAHEM

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : Docol 1200M - $t = 0,7$ mm
Směr odebrání vzorku : 0°
Rychlost zatěžování : 24000 mm/min
Vypracoval : Ing. Jan Boček
Datum zkoušky : 14.04. 2008

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rm MPa	A50mm %
1	1352.10	4.23
2	1378.73	4.35
3	1368.67	4.60
4	1376.86	4.48
5	1365.99	3.41



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

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

<http://www.ksp.tul.cz>



ZKOUŠKA TAHEM

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : Docol 1200M - t = 0,7 mm

Směr odebrání vzorku : 45°

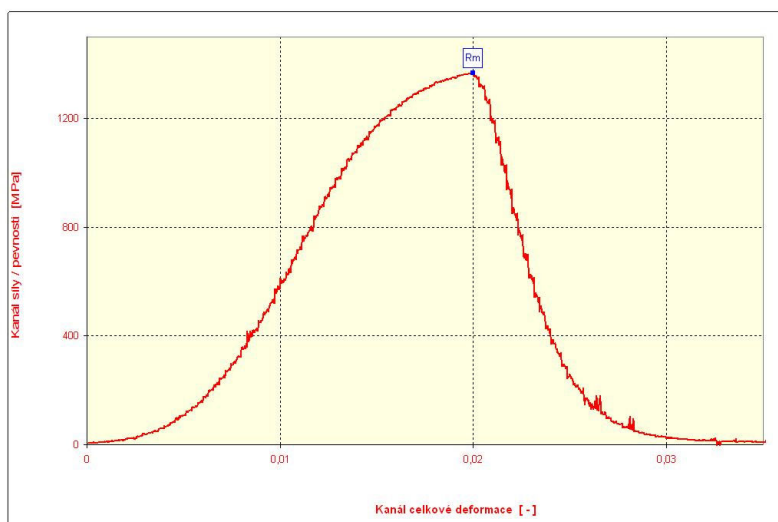
Rychlost zatěžování : 24000 mm/min

Vypracoval : Ing. Jan Boček

Datum zkoušky : 14.04. 2008

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rm MPa	A50mm %
1	1325.56	3.71
2	1346.44	4.73
3	1366.09	4.41
4	1332.89	4.11
5	1309.05	3.74



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>



ZKOUŠKA TAHEM

VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál : Docol 1200M - t = 0,7 mm

Směr odebrání vzorku : 90°

Rychlost zatěžování : 24000 mm/min

Vypracoval : Ing. Jan Boček

Datum zkoušky : 14.04. 2008

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Číslo zkoušky	Rm MPa	A50mm %
1	1360.90	3.19
2	1366.48	5.33
3	1385.30	4.05
4	1374.84	4.59
5	1376.06	5.26



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

PŘÍLOHA 7: Diagramy mezních přetvoření

P7 - 1/3 Tab. 1: Soubory naměřených hodnot pro DMP1 - $v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$

DMP1	Hrot trhliny				Okraj trhliny			
	L_2 [mm]	L_1 [mm]	φ_2 [-]	φ_1 [-]	L_2 [mm]	L_1 [mm]	φ_2 [-]	φ_1 [-]
1. stopa – 30 mm	1,983	2,890	-0,05733	0,31919	2,022	2,668	-0,03785	0,23951
	1,963	2,908	-0,06747	0,32557	1,990	2,723	-0,05380	0,25980
	1,938	2,959	-0,08035	0,34291	2,016	2,644	-0,04074	0,23041
	1,912	2,969	-0,09379	0,34629	1,993	2,682	-0,05239	0,24463
	1,971	2,962	-0,06340	0,34393	2,009	2,668	-0,04430	0,23951
2. stopa – 75 mm	2,084	2,596	-0,00765	0,21203	2,083	2,448	-0,00813	0,15333
	2,083	2,644	-0,00813	0,23036	2,089	2,433	-0,00525	0,14719
	2,101	2,667	0,00048	0,23902	2,109	2,431	0,00428	0,14637
	2,111	2,608	0,00522	0,21665	2,106	2,444	0,00285	0,15170
	2,109	2,641	0,00428	0,22922	2,112	2,476	0,00570	0,16471
3. stopa – 120 mm	2,154	2,635	0,02560	0,22695	2,125	2,477	0,01183	0,16511
	2,156	2,694	0,02632	0,24909	2,167	2,450	0,03141	0,15415
	2,150	2,652	0,02353	0,23338	2,188	2,472	0,04105	0,16301
	2,162	2,654	0,02910	0,23413	2,138	2,439	0,01793	0,14980
	2,128	2,635	0,01325	0,22695	2,142	2,470	0,01980	0,16228
4. stopa – 160 mm	2,454	2,799	0,15578	0,28733	2,350	2,688	0,11248	0,24686
	2,347	2,809	0,11120	0,29089	2,398	2,710	0,13270	0,25501
	2,520	2,790	0,18232	0,28410	2,379	2,654	0,12474	0,23413
	2,359	2,820	0,11630	0,29480	2,417	2,733	0,14059	0,26346
	2,446	2,829	0,15252	0,29799	2,364	2,662	0,11842	0,23714
5. stopa – 210 mm	2,791	2,852	0,28446	0,30608	2,681	2,808	0,24426	0,29054
	2,721	2,865	0,25906	0,31063	2,734	2,836	0,26383	0,30046
	2,756	2,800	0,27184	0,28765	2,740	2,860	0,26607	0,30879
	2,724	2,818	0,26016	0,29409	2,678	2,865	0,24324	0,31063
	2,705	2,832	0,25317	0,29905	2,644	2,817	0,23036	0,29374



P7 - 2/3

Tab. 2: Soubory naměřených hodnot pro DMP2 - $v_2 = 17,78 \text{ m.s}^{-1}$

DMP2	Hrot trhliny				Okraj trhliny			
	L_2 [mm]	L_1 [mm]	φ_2 [-]	φ_1 [-]	L_2 [mm]	L_1 [mm]	φ_2 [-]	φ_1 [-]
1. stopa – 30 mm	1,938	2,916	-0,08035	0,32828	1,991	2,566	-0,05330	0,20041
	1,958	2,882	-0,07003	0,31665	1,931	2,586	-0,08390	0,20818
	1,907	2,926	-0,09641	0,33170	1,976	2,587	-0,06086	0,20864
	1,919	2,900	-0,09013	0,32277	1,945	2,595	-0,07668	0,21165
	1,928	2,871	-0,08529	0,31272	1,952	2,541	-0,07308	0,19060
2. stopa – 75 mm	2,078	2,464	-0,01073	0,16001	2,066	2,396	-0,01632	0,13186
	2,095	2,491	-0,00224	0,17075	2,059	2,411	-0,01972	0,13810
	2,096	2,482	-0,00172	0,16713	2,071	2,351	-0,01391	0,11290
	2,099	2,535	-0,00057	0,18826	2,063	2,389	-0,01778	0,12894
	2,092	2,460	-0,00401	0,15822	2,098	2,358	-0,00095	0,11588
3. stopa – 120 mm	2,105	2,514	0,00238	0,17986	2,105	2,368	0,00238	0,11997
	2,152	2,602	0,02446	0,21434	2,219	2,409	0,05512	0,13727
	2,105	2,487	0,00238	0,16914	2,159	2,338	0,02771	0,10736
	2,144	2,566	0,02074	0,20041	2,140	2,368	0,01887	0,12011
	2,168	2,590	0,03187	0,20972	2,183	2,382	0,03876	0,12601
4. stopa – 160 mm	2,386	2,808	0,12768	0,29058	2,403	2,661	0,13478	0,23673
	2,367	2,767	0,11969	0,27585	2,384	2,610	0,12684	0,21748
	2,219	2,678	0,05512	0,24313	2,401	2,615	0,13395	0,21933
	2,402	2,782	0,13436	0,28129	2,343	2,652	0,10950	0,23338
	2,401	2,821	0,13395	0,29528	2,337	2,571	0,10693	0,20236
5. stopa – 210 mm	2,551	2,780	0,19455	0,28068	2,586	2,728	0,20818	0,26178
	2,544	2,840	0,19180	0,30189	2,476	2,722	0,16471	0,25943
	2,523	2,815	0,18360	0,29303	2,557	2,767	0,19674	0,27583
	2,230	2,697	0,06006	0,25020	2,469	2,691	0,16187	0,24809
	2,211	2,636	0,05151	0,22733	2,494	2,672	0,17195	0,24093



P7 - 3/3

Tab. 3: Soubory naměřených hodnot pro DMP3 - $v_3 = 22,5 \text{ m.s}^{-1}$

DMP3	Hrot trhliny				Okraj trhliny			
	L_2 [mm]	L_1 [mm]	φ_2 [-]	φ_1 [-]	L_2 [mm]	L_1 [mm]	φ_2 [-]	φ_1 [-]
1. stopa – 30 mm	1,811	2,863	-0,14806	0,31007	1,917	2,592	-0,09118	0,21042
	1,888	2,842	-0,10642	0,30257	1,939	2,584	-0,07976	0,20754
	1,860	2,845	-0,12136	0,30376	1,989	2,531	-0,05431	0,18674
	1,899	2,788	-0,10061	0,28339	2,013	2,527	-0,04240	0,18491
	1,832	2,815	-0,13653	0,29303	1,912	2,558	-0,09379	0,19729
2. stopa – 75 mm	2,076	2,606	-0,01149	0,21588	1,981	2,549	-0,05834	0,19376
	2,050	2,629	-0,02419	0,22467	1,974	2,536	-0,06188	0,18865
	1,996	2,741	-0,05079	0,26639	2,013	2,489	-0,04231	0,16988
	1,987	2,778	-0,05531	0,27977	1,956	2,564	-0,07104	0,19980
	2,039	2,733	-0,02948	0,26332	2,027	2,511	-0,03538	0,17874
3. stopa – 120 mm	2,178	2,467	0,03647	0,16115	2,143	2,442	0,02027	0,15088
	2,179	2,446	0,03693	0,15265	2,171	2,388	0,03325	0,12837
	2,158	2,479	0,02747	0,16592	2,189	2,424	0,04151	0,14351
	2,146	2,442	0,02187	0,15088	2,154	2,408	0,02539	0,13686
	2,154	2,508	0,02539	0,17755	2,155	2,384	0,02578	0,12686
4. stopa – 160 mm	2,285	2,703	0,08443	0,25258	2,281	2,560	0,08268	0,19807
	2,475	2,812	0,16430	0,29196	2,367	2,591	0,11969	0,21011
	2,414	2,770	0,13935	0,27691	2,344	2,605	0,10992	0,21564
	2,365	2,725	0,11884	0,26053	2,326	2,576	0,10213	0,20430
	2,340	2,747	0,10821	0,26843	2,309	2,615	0,09488	0,21917
5. stopa – 210 mm	2,594	2,819	0,21126	0,29456	2,523	2,688	0,18351	0,24673
	2,637	2,835	0,22771	0,29999	2,459	2,666	0,15767	0,23864
	2,320	2,718	0,10134	0,25796	2,471	2,677	0,16269	0,24276
	2,415	2,738	0,13976	0,26529	2,443	2,686	0,15134	0,24616
	2,466	2,779	0,16066	0,27999	2,484	2,698	0,16793	0,25065



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 doktorské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiju-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 se svým školitelem disertační práce.

Declaration

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

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

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

I compiled the dissertation on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the dissertation.



Datum / Date: 09.11. 2008

Podpis / Signature:

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

VLIV RYCHLOSTI PŘETVOŘENÍ NA MEZNÍ DEFORMACE
PEVNOSTNÍCH PLECHŮ

THE EFFECT OF THE STRAIN RATE ON THE FORMING
LIMITS OF HIGH-STRENGTH STEEL SHEETS

Ing. Jan Boček

Autoreferát disertační práce



Obor: 2303V002 Strojírenská technologie

Zaměření: Tváření kovů

Školitel: doc. Ing. Mirko Král, CSc.

Předložená doktorská práce byla vypracována v rámci doktorského studia na Katedře strojírenské technologie, Fakultě strojní Technické univerzity v Liberci.

Doktorand: **Ing. Jan Boček**
Technická univerzita v Liberci
Fakulta strojní
Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

Školitel: **doc. Ing. Mirko Král, CSc.**
České vysoké učení technické v Praze
Fakulta strojní
Ústav strojírenské technologie

Oponenti:

prof. Ing. Jan Suchánek, CSc.	České vysoké učení technické v Praze
doc. Ing. Pavel Rumíšek, CSc.	Vysoké učení technické v Brně
doc. Ing. Pavel Vajo, CSc.	Slovenská technická univerzita v Bratislave

ISBN 978-80-7372-442-9

Teze disertační práce byly rozeslány dne 3.3. 2009.



Obhajoba disertační práce se koná dne 3.3. 2009 před komisí pro obhajoby disertačních prací v oboru 2303V002 Strojírenská technologie na Fakultě strojní TU v Liberci od 10:30 hod.

Před obhajobou je možné se s doktorskou prací seznámit na děkanátě Fakulty strojní Technické univerzity v Liberci, Studentská 1, 461 17 Liberec.

Anotace

Cílem disertační práce je vyhodnotit vlastnosti a chování pevnostního materiálu Docol 1200M za různých rychlostních podmínek. Tato ocel je využívána v automobilovém průmyslu pro výztuže karosérií (například práh vozu Škoda Roomster), a proto je velmi důležitý výzkum jejího chování při rychlostech simulujících náraz vozidla na překážku. Experiment je rozdělen do dvou hlavních částí. V první je provedeno ověření základních mechanických hodnot tahovou zkouškou (tři rychlosti $v = 10, 600$ a $24000 \text{ mm.min}^{-1}$). Součástí je také vyhodnocení změn vnitřní struktury v závislosti na zátěžných rychlostech. Druhá část spočívá ve zjištění mezní deformace vzorků opatřených deformační sítí a tažených do okamžiku vzniku trhliny, to při různých stavech napjatosti (různá šíře vzorků) a různých testovacích rychlostech ($v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$, $v_2 = 17,78 \text{ m.s}^{-1}$ a $v_3 = 22,5 \text{ m.s}^{-1}$). Toho je docíleno na hydraulickém lisu CBA300/63 a rychlostním pneumatickým přípravku. Vizualizace zjištěných hodnot je realizována pomocí diagramů mezních přetvoření, získaných při různých deformačních rychlostech.

Annotation

The aim of the Doctoral Thesis is to evaluate the properties and behaviour of a high-strength material Docol 1200M at different strain rates. This steel is used in the car industry for car-body reinforcements (for example the doorsill in Škoda Roomster car), and therefore the research of its behaviour at velocities simulating the crash of the car against a barrier is important. Experiments are divided into two main parts. In the first one a tensile test is used to establish basic mechanical properties at different velocities (10, 600 and 24000 mm.min⁻¹). The evaluation of changes of internal structure due to the respective strain rates is also included. In the second part the forming limits of specimens provided by a strain grid are found. The specimens were deep drawn at different stress states (specimens with a different



width) and by different testing velocities ($2.08 \times 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$, 17.78 m.s^{-1} and 22.5 m.s^{-1}) until a crack became visible. A hydraulic press CBA300/63 and a high speed pneumatic experimental stand were used. Forming Limit Diagrams received at different strain rates are used to present the results.

OBSAH

1. ÚVOD	5
2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	5
3. CHARAKTERISTIKA TESTOVANÉHO MATERIÁLU	6
4. POSTUP EXPERIMENTU	6
4.1. Hodnocení struktury materiálu	7
4.2. Základní mechanické vlastnosti	8
4.2.1. Zkouška tahem - $t = 2 \text{ mm}$	8
4.2.2. Zkouška tahem - $t = 0,7 \text{ mm}$	13
4.2.3. Dílčí výsledky	14
4.3. Diagramy mezních přetvoření	17
4.3.1. Příprava zkušebních vzorků	18
4.3.2. Nanesení deformační sítě	18
4.3.3. Tažení vzorků	18
4.3.4. Měření deformovaných elementů	20
4.3.5. Dílčí výsledky	21
4.4. Rozložení deformace v okolí trhliny	24
4.5. Modelový výpočet sil a napětí při průhybu rondelu	25
5. DISKUZE VÝSLEDKŮ DISERTAČNÍ PRÁCE	29
6. ZÁVĚR	33
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	35
PUBLIKAČNÍ ČINNOST K TÉMATU PRÁCE	37

1. ÚVOD

Automobilový průmysl, zejména odvětví osobních automobilů, je velmi dynamicky se vyvíjející obor, který čelí stálému tlaku okolí po zdokonalování svých výrobních konstrukcí. Tyto požadavky jsou z mnoha různých oborů a často jsou velmi náročné a tedy vyžadují jistý čas na své splnění. Přestože automobil jako dopravní prostředek prošel již od doby svého vzniku obrovským vývojem, stále zde vyvstávají přibližně dva nejpalčivější problémy. Prvním problémem je bezpečnost pasažérů a přepravovaného nákladu. Zadruhé je to spotřeba paliva (která, kromě jiného, úzce souvisí s hmotností vozu) a množství emisí výfukových zplodin. Starší metody konstrukce automobilu, a zejména jeho karosérie, neumožňovaly uspokojivé splnění obou požadavků, neboť pro zvýšení bezpečnosti bylo zapotřebí zvýšit mohutnost konstrukce karosérie, pro splnění druhého požadavku byl postup opačný. Jak je zřejmé bylo zapotřebí vyvinout nové způsoby konstrukce karosérie osobního automobilu, které by byly schopny splnit oba požadavky současně.

Pro řešení této problematiky se nabízí hned několik logických cest. Buď dosud používané ocelové hlubokotažné materiály nahradit jinými vhodnějšími (například slitinami hořčíku, hliníku a kompozitními materiály) nebo nahradit hlubokotažné oceli pevnostními a vysokopevnostními ocelovými plechy za současného využití nových technologií konstrukce karosérie. Ve výsledku se patrně jako nejlepší varianta konstrukce karosérie jeví kombinace obou zmíněných způsobů.

Nyní bych se rád vrátil k současné automobilové produkci a blíže se zmínil o škále materiálů dnes běžně používaných pro výrobu karosérie osobního automobilu. Jak je zřejmé z předchozích vět, bude se tato specifikace týkat materiálů ocelových, neboť právě ty se v současnosti největší měrou využívají pro stavbu automobilové konstrukce. Ocelové materiály můžeme rozdělit na hlubokotažné a vysokopevnostní plechy.

Klasickými materiály jsou hlubokotažné plechy a IF (Interstitials Free) oceli, které dnes již nedostačují svými parametry a jsou postupně nahrazovány plechy se zvýšenými mechanickými vlastnostmi (pevnostními a vysokopevnostními). K základním typům těchto materiálů patří DP (Dual Phase), TRIP (Transformation Induced Plasticity), TWIP (Twinning Induced Plasticity), CP (Complex Phase) a MS (Martensite Steel) oceli. Mechanické hodnoty vysokopevnostních plechů jsou diametrálně odlišné od klasických hlubokotažných materiálů. Meze pevnosti se zde pohybují od 700 MPa až po extrémních 1500 MPa. Z toho vyplývá, že přednostně byly tyto materiály tvářeny za tepla, což je ovšem velice nákladné. Současný výzkum v oblasti pevnostních materiálů je proto zaměřen na zlepšení jejich lisovatelnosti za studena [2, 5, 26].

Proto si tato práce vzala za svůj hlavní cíl poznat a následně popsat vlastnosti a chování zvoleného vysokopevnostního materiálu při zkouškách tváření za studena, a tím tak přispět k hlubšímu poznání této problematiky. Disertační práce je zpracována za podpory firmy Škoda Auto a.s., a tak jejím největším přínosem je uplatnění experimentálně zjištěných hodnot a poznatků, jako směrnic pro konstrukci a simulaci dynamicky namáhaných dílů karosérie, přímo v průmyslové výrobě osobních automobilů.

2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Tato disertační práce tématicky navazuje na řadu měření, která byla a jsou prováděna v dílnách a laboratořích Katedry strojírenské technologie. V návaznosti na proběhlé experimenty si tato práce vzala za svůj cíl zkoumat vlastnosti zvoleného vysokopevnostního materiálu při zkouškách tváření za studena. Materiál je hodnocen zejména ve vztahu k rychlosti deformace zkušební dílu. Rozmezí hodnot zkoušených rychlostí je velké a umožňuje tak co nejkomplexnější pohled na chování zkoušeného materiálu za různých podmínek zatěžování.

Předkládaná disertační práce je tedy, v souladu s předchozím textem, zaměřena ve své experimentální části zejména na tyto následující body:

- Zjištění vlivu rychlosti zatěžování na strukturu vysokopevnostního materiálu, průběh zkoušky tahem a výsledné mechanické hodnoty.
- Zhotovení diagramů mezních přetvoření při různých rychlostech deformací a naznačení výpočtu silových poměrů na modelovém příkladu kruhové desky.
- Komplexní pohled na problematiku lisovatelnosti vysokopevnostního materiálu za studena a popis vlivu vysokých deformačních rychlostí na chování tohoto materiálu.

3. CHARAKTERISTIKA TESTOVANÉHO MATERIÁLU

Disertační práce sleduje chování pevnostních materiálů při tváření za studena. Vzhledem k tomuto omezení nebo spíše právě proto byla zvolena skupina vysokopevnostních materiálů, jejichž mechanické vlastnosti je řadí na samou hranici použitelnosti při tváření za studena a je tedy velmi zajímavé zkoumat jejich chování za těchto podmínek. Dále bylo také při volbě zohledněno, zda je v současné době materiál zaveden ve výrobě a tedy zda mohou být naměřená data okamžitě využita ve výrobním procesu. Na výběr bylo několik vysokopevnostních materiálů s různými vlastnostmi, z nichž byl nakonec po odborné rozpravě s představiteli automobilového průmyslu a zvážení všech uvedených faktorů vybrán jeden materiál s následujícím označením od výrobce: **Docol 1200M**.

Materiál Docol 1200 stupně M je martenzitická ocel vyráběná, firmou SSAB Swedish Steel, za použití speciálního tepelného zpracování na kontinuální žhací lince. Její vysoká pevnost je vytvořena extrémně rychlým vodním ochlazením z vysoké austenitické teploty. Tento pevnostní materiál je charakterizován poměrně dobrou tvárností při extrémně vysoké hodnotě pevnosti a dobrou svařitelností. Plechy z materiálu Docol 1200M jsou vyráběny v šířkách 800÷1500 mm a tloušťkách 0,5÷2,0 mm. Materiál Docol 1200M je dodáván v tolerancích dle evropské normy EN 10 131. Materiálové vlastnosti jsou pochopitelně proměnné jak svitek od svitku, tak i uvnitř vlastního svitku. Základní parametry zvoleného materiálu udávané výrobcem jsou zpracovány v následující tabulce Tab. 1 [30].

Tab. 1: Materiálové hodnoty udávané výrobcem pro Docol 1200M

Chemické složení	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Nb %	Al %
	0,110	0,200	1,600	0,015	0,002	0,015	0,040
Mechanické hodnoty	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]			950 min ÷ (1200 max)			
	Mez kluzu po BH efektu $R_{p0,2}$ [MPa]			1150 min			
	Mez pevnosti R_m [MPa]			1200 min ÷ (1400 max)			
	Tažnost $A_{80\text{ mm}}$ [%]			4 min			

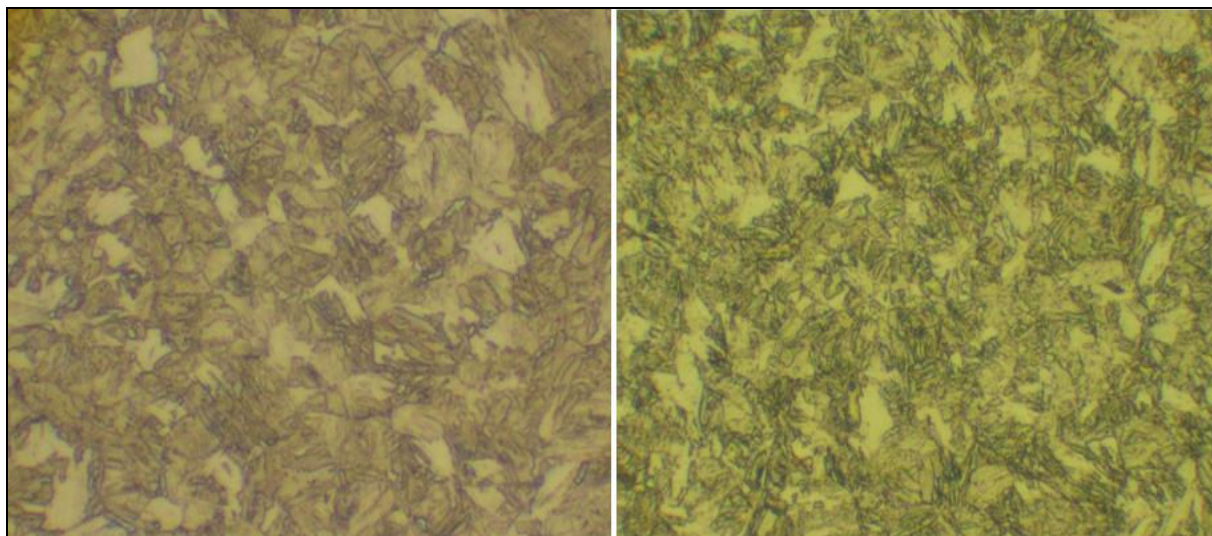
4. POSTUP EXPERIMENTU

Zvolený vysokopevnostní materiál Docol 1200M byl dodán ve dvou tloušťkách plechů a to 2 mm a 0,7 mm. Tabule měly rozměry 2x1090x2000 mm (směr válcování 2000 mm) a 0,7x1125x680 (směr válcování 680 mm). Materiál tloušťky 0,7 mm byl odvinut ze svitků, a proto rovinnost těchto tabulí byla horší. Z obou polotovarů (2 a 0,7 mm) byly nejprve odebrány vzorky pro zjištění struktury materiálu před deformací, poté byly zhotoveny vzorky pro zkoušky tahem a pro zjištění koeficientu normálové anizotropie a nakonec byly vyrobeny sady vzorků pro zjištění vlivu rychlosti na DMP. Některé přetržené tyčky z tahové zkoušky byly také následně využity pro zjištění struktury materiálu po deformaci.

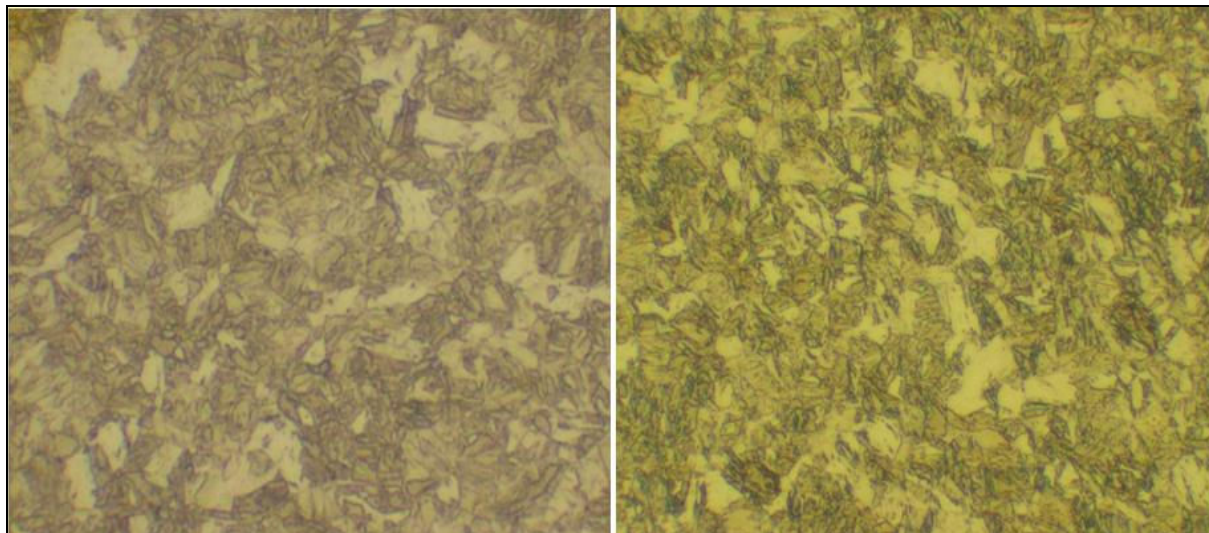
4.1. Hodnocení struktury materiálu

Skupina vysokopevnostních materiálů je specifická svou strukturou, která má za následek uplatnění jiných způsobů zpevnění materiálu během deformace za studena, než je tomu například u hlubokotažných materiálů. Díky tomu je část experimentální části disertační práce věnována také hodnocení struktury zkoušeného materiálu.

Vzorky pro hodnocení vnitřní struktury nedeformovaného materiálu byly odděleny z tabulí plechu (tloušťky 2 mm a 0,7 mm), očištěny, obroušeny a odeslány na České vysoké učení technické v Praze, Fakultu strojní, Ústav strojírenské technologie k provedení analýzy. Později byly na tuto adresu zaslány též přetržené zkušební tahové tyče (2 a 0,7 mm) pro zjištění vnitřní struktury materiálu po deformaci. Připravené vzorky byly zality materiálem VARIDUR 200 do manipulačních těles a obroušeny brusnými kotouči (drsnost 120 až 650) na metalografické brusce MTH KOMPAKT 1031. Mechanicky připravené vzorky s vyleštěnými funkčními povrchy byly naleptány leptadlem Nital (2% roztok kyseliny dusičné v alkoholu) pro zvýraznění struktury, očištěny a vloženy do světelného optického mikroskopu NEOPHOT 21 pro metalografické hodnocení struktury dle ČSN 42 0003.



Obr. 1: Porovnání nedeformované struktury (vlevo) materiálu Docol 1200M tloušťky 2 mm se strukturou po deformaci (vpravo) – zvětšeno 800x



Obr. 2: Porovnání nedeformované struktury (vlevo) materiálu Docol 1200M tloušťky 0,7 mm se strukturou po deformaci (vpravo) – zvětšeno 800x

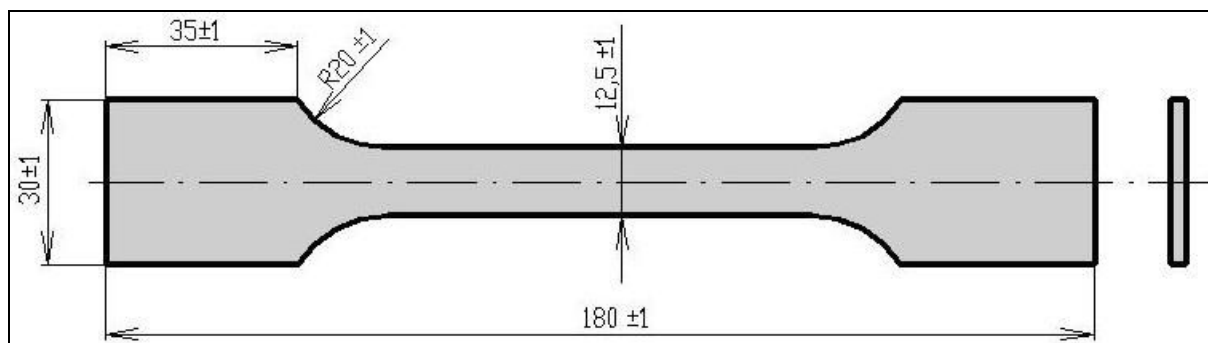
Ze vzájemného porovnání vnitřních struktur dvou tlouštěk (2 mm a 0,7 mm) materiálu Docol 1200M vyplývá, že mezi strukturami nejsou velké rozdíly. Tento jev byl předpokládán, neboť se v obou případech jedná o totožný základní materiál, pouze o jiné tloušťce. Při bližším pohledu na obrázky Obr. 1 a Obr. 2, znázorňující struktury před deformací (levá část obrázků) a po deformaci (pravá část obrázků), je také zřejmé, že základní martenziticko-feritická struktura nedoznala po zatížení radikálních změn, pouze došlo k přeměně malé části feritu na martenzit, a tím k mírnému nárůstu poměru této fáze ve výsledné struktuře.

4.2. Základní mechanické vlastnosti

Pro zjištění mechanických vlastností byla u zvoleného materiálu Docol 1200M (obou měřených tlouštěk $t = 2$ mm a $t = 0,7$ mm) použita zkouška tahem. Dalšími měřeními a výpočty byly také například zjištěny hodnoty normálové anizotropie a ukazatelů tváritelnosti. Pro hlubší poznání chování zvoleného materiálu za různých zatěžujících rychlostních podmínek byla provedena celá řada měření tahových zkoušek rozdělených do několika skupin dle velikosti zátěžné rychlosti. První skupinu tvořily statické zkoušky tahem rychlostí 10 mm/min dle normy ČSN EN 10002-1. Druhou část tvořily zkoušky vyšší rychlostí zatěžování a to 600 mm/min. Poslední třetí skupinu představovaly tahové zkoušky extrémní zátěžovou rychlostí 24000 mm/min. Pro jednotlivé jmenované skupiny experimentů byl užit různý způsob zhotovení a provedení zkušebních vzorků.

4.2.1. Zkouška tahem - $t = 2$ mm

Vzhledem k vysoké pevnosti použitého materiálu, jeho značné tloušťce (2 mm) a snaze o co nejmenší tepelné ovlivnění byla pro zhotovení vzorků na tahovou zkoušku a dále také vzorků pro zjištění koeficientu normálové anizotropie zvolena technologie CNC řezání vodním paprskem. Vyřezání vzorků (0° , 45° a 90° na směr válcování) bylo provedeno firmou S-plasma s.r.o. Následující obrázek Obr. 3 znázorňuje rozměry a tvar zkušební tyče [17].

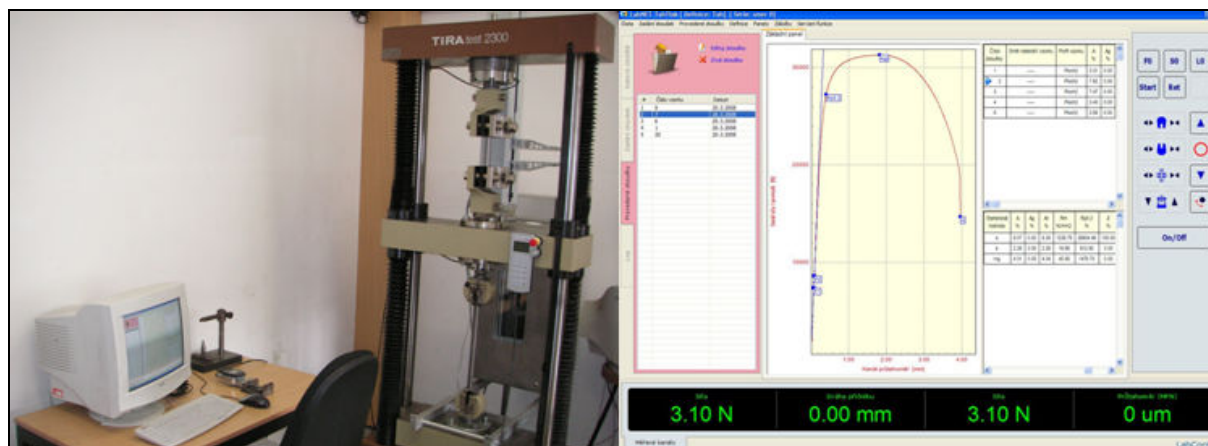


Obr. 3: Normalizovaná zkušební tyč pro zkoušku tahem $L_0 = 50$ mm

Zkušební tyčím byly obroušeny povrchy v měřeném úseku a proměřeny digitálním mikrometrem firmy Mitutoyo. Takto zhotovené vzorky byly následně použity pro zkoušky tahem rychlostí 10 mm/min a 600 mm/min.

a) Zkouška tahem - $t = 2$ mm - 10 mm/min

Statické zkoušky tahem byly provedeny dle normy ČSN EN 10002-1 na modernizovaném trhačím zařízení TIRAtest 2300 opatřeném PC řízením pomocí nového softwaru LabNET (Obr. 4). Ovládací program obsahuje několik základních oken, umožňujících definovat vstupní parametry (rozměry tyče, parametry průběhu zkoušky atd.) a výstupy naměřených hodnot ve formě grafů, tabulek a protokolu. Proměřený vzorek (šířka b_0 a tloušťka t_0) byl vždy upnut do čelistí trhačího stroje, v měřeném úseku ($L_0 = 50$ mm) byl přiložen průtahoměr MFN-A a v programu LabNET nastaveny parametry testu (rychlost posuvu 10 mm/min, výstupní veličiny, způsob ukončení zkoušky dané poklesem síly 50% $F_{\max}$ atd.). Následovala vlastní zkouška. Tento postup byl aplikován na všech tyčích (0° - 5 ks, 45° - 5 ks, 90° - 5 ks na směr válcování) první skupiny měření, celkem tedy 15 vzorků. Některé vzorky praskly mimo průtahoměrem měřenou oblast ($L_0 = 50$ mm). Tento jev se vyskytl u všech měřených sad (ve všech třech směrech). Z naměřených hodnot mezí pevnosti R_m a nevýrazných mezí kluzu $R_{p0,2}$ jednotlivých vzorků byly spočteny v programu Microsoft Excel hodnoty střední, z hodnot tažností $A_{50\text{ mm}}$ a plastických tažností A_g byly pro výpočet středních hodnot použity pouze ty, které náležely tyčím porušeným v měřené oblasti.



Obr. 4: TIRAtest 2300 s detailem programu LabNET.

Z takto získaných mechanických hodnot byly také dopočítány ukazatele tvárivosti a to zásoba plasticity ZP (definovaná vztahem 1), ukazatel hlubokotažnosti UH (daný vztahem 2) a komplexní ukazatel tvárivosti KUT (vzorec 3) [2, 5].

$$ZP = k \cdot (R_m - R_{p0,2}) \cdot \varepsilon \text{ [MPa]} \quad (1)$$

kde je:

k ... koeficient zaplnění plochy (0,6 - 0,9) [-]

$$UH = \frac{R_{p0,2}}{R_m} \quad [-] \quad (2)$$

$$KUT = \frac{R_{p0,2}}{R_m} \cdot A_{50mm} = UH \cdot A_{50mm} \quad [-] \quad (3)$$

Nakonec proběhlo stanovení konstant C a n pomocí mocninné regrese (4) příslušných grafických průběhů tahových zkoušek. Pro nalezení výsledných hodnot bylo zapotřebí nejprve stanovit vhodnou aproximační oblast tahového diagramu. Tuto problematiku popisuje řada norem ovšem jednotlivé způsoby vyhodnocení se vzájemně liší [1, 2, 3, 4, 5, 18].

- Česká norma ČSN ISO 10272 doporučuje oblast rovnoměrné plastické deformace, tedy interval mezi hodnotami $\varphi = 5\%$ a maximální rovnoměrnou deformací.
- Dle normy EN 10 130+A1:2000 je vhodný interval pro aproximaci $\varphi = 10 \div 15(20)\%$.
- Poslední zde citovaná norma ASTM E 646-78 stanovuje hledané konstanty z libovolného intervalu hodnot $\sigma - \varphi$, kde minimum je dáno mezí kluzu a maximum odpovídá přetvoření při $F_{\max}$ či těsně před touto hodnotou.

$$\sigma = C \cdot \varphi^n \quad [\text{MPa}] \quad (4)$$

kde je:

C ... modul monotónního zpevnění [MPa]

n ... exponent deformačního zpevnění [-]

φ ... skutečná deformace [-]

Vzhledem k malé tažnosti zkoušeného materiálu (tažnost na mezi pevnosti 2,5 | 4%) byla zvolena aproximace dle normy ASTM E 646-78 s intervalem $\varphi = 2\%$ (tedy $\varphi = 0,02$) až mez pevnosti materiálu σ_m . Spolehlivostní hodnota aproximace dané rovnicí (4) byla $R^2 \cong 0,99$. Obrázek Obr. 4 znázorňuje příklad takovéto aproximace v programu Microsoft Excel. Modrá křivka představuje smluvní tahový diagram $R = f(\varepsilon)$, fialová část skutečného diagramu $\sigma = f(\varphi)$ v intervalu ($\varphi = 2\%$ až σ_m) a černá křivka je její mocninná regrese ve tvaru $\sigma = C \cdot \varphi^n$ tedy $\sigma = 1541,3 \cdot \varphi^{0,0585}$. Kromě vlastního měření tahových diagramů proběhlo zjištění koeficientu normálové anizotropie r_α daného vztahem (5) [1, 2, 3, 5, 11, 18].

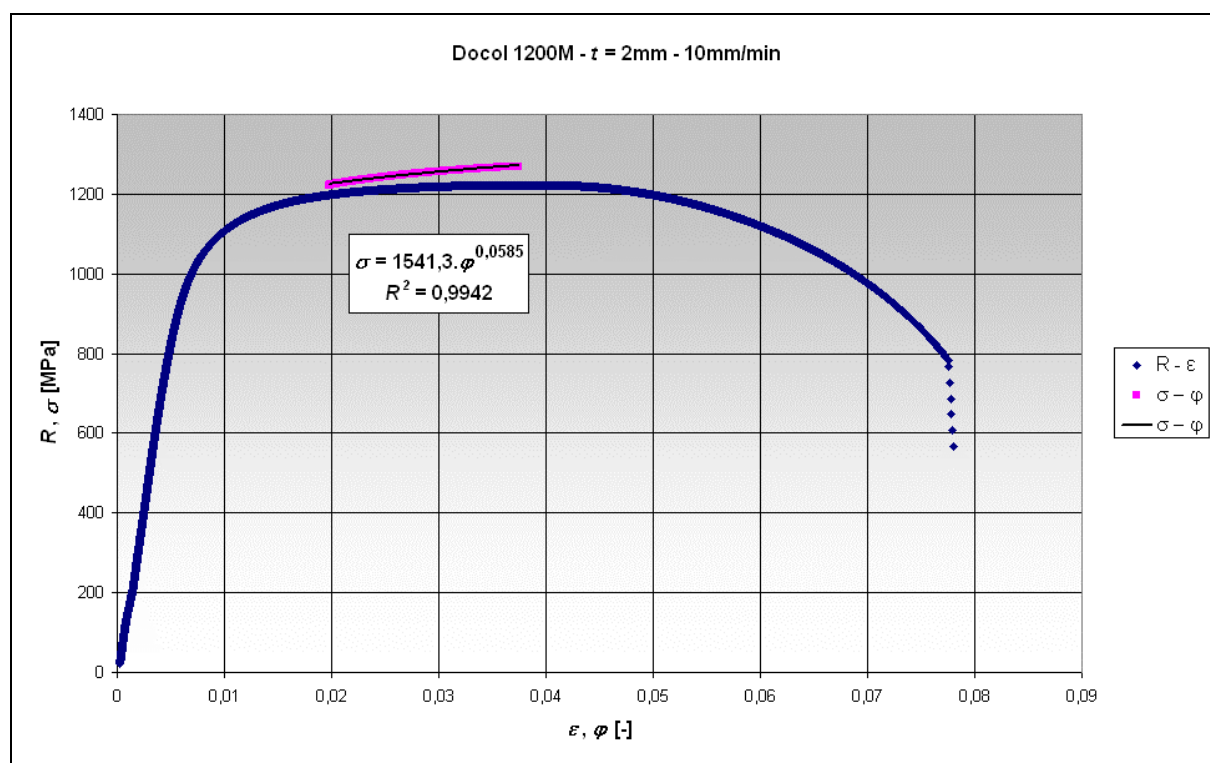
$$r_\alpha = \frac{\ln\left(\frac{b_o}{b_u}\right)}{\ln\left(\frac{L_u \cdot b_u}{L_o \cdot b_o}\right)} \quad [-] \quad (5)$$

kde je:

b_o, L_o ... šířka tyčky a délka měřeného úseku před zkouškou [mm]

b_u, L_u ... šířka tyčky a délka měřeného úseku po deformaci [mm]

Pro zjištění jeho velikosti byla zvolena rychlost 10 mm/min. Při pozdějších rychlostních tahových zkouškách nebyla předpokládána změna hodnoty tohoto koeficientu a proto již nebyl za vyšších rychlostí opětovně zjišťován. Index α značí směr ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ na směr válcování), ve kterém je hodnota počítána.



Obr. 5: Zjištění konstant C a n

V experimentu bylo užito zkušebních tyčí stejného provedení jako v případě tahové zkoušky (Obr. 3), vždy 3 vzorky v každém směru (0° , 45° a 90° na směr válcování). Norma ČSN ISO 10 275 (ČSN 420436) stanovuje, že tento koeficient má být zjištěn při prodloužení zkušební tyče o 20% měřené délky, v našem případě ($L_0 = 50$ mm) tedy při natažení tyče o 10 mm. Z výsledných hodnot tažností (předchozí obrázek Obr. 5) je ovšem zřejmé, že v případě materiálu Docol 1200M nelze tento postup použít. Proto bylo stanoveno konečné prodloužení měřeného úseku o 1 mm tedy o 2%. Tato hodnota je sice velmi malá a obtížně měřitelná, avšak deformace obdobné velikosti (0,95 mm a 1,2 mm) užívá pro zjištění tohoto koeficientu u materiálu Docol 1200M i jeho výrobce firma SSAB Swedish Steel. Vzorky byly orýsovány po 10 mm na celé zkoušené délce a jejich rozměry změřeny mikrometrem Mitutoyo a Abbého délkoměrem. Tyče byly postupně vloženy do čelistí stroje TIRatest 2300, opatřeny průtahoměrem a nataženy o 1 mm. Následovalo opětovné proměření jejich rozměrů a ze zjištěných hodnot (před a po deformaci) byly v programu Microsoft Excel za použití vztahu (5) dopočítány hledané koeficienty normálové anizotropie pro tři směry (0° , 45° a 90°). Nakonec byly z hodnot hledaných veličin v jednotlivých směrech ($R_{p0,2}$, R_m , A_g , $A_{50\text{ mm}}$, UH , KUT , ZP , C , n , r_a) dopočteny hodnoty střední a ty doplněny příslušnými směrodatnými odchylkami s (vztah 6) a směrově středními hodnotami x_s (vztah 7) [2, 3, 5, 11].

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (6)$$

kde je:

x_i ... aktuální naměřená hodnota

$\bar{x}$... střední hodnota

n ... počet měření

$$x_s = \frac{x_0 + 2 \cdot x_{45} + x_{90}}{4} \quad (7)$$

kde je:

x_0 , x_{45} , x_{90} ... hodnota dané veličiny ve směru 0° , 45° a 90° na směr válcování

b) Zkouška tahem - $t = 2 \text{ mm}$ - 600 mm/min

Pro zjištění tahových diagramů a základních mechanických hodnot při rychlosti zatěžování 600 mm/min byly použity zkušební tyče (stejný počet) vyrobené dle popisu v předchozí podkapitole. Vyhodnocení zjištěných veličin proběhlo taktéž obdobně jako v předchozím případě.

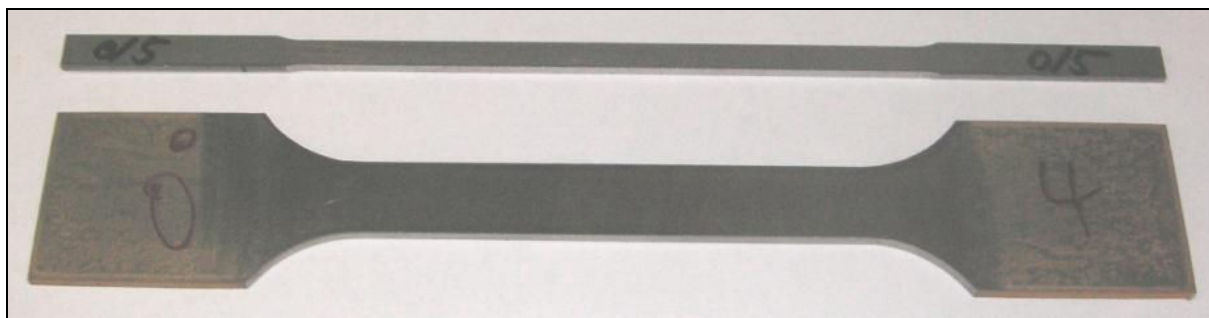
c) Zkouška tahem - $t = 2 \text{ mm}$ - 24000 mm/min

Pro tuto skupinu měření byl použit odlišný postup zhotovení zkušebních tyčí a i jejich rozměry a tvar se lišily od předchozích dvou skupin (10 mm/min a 600 mm/min). Jelikož stroj TIRatest 2300, použitý v předchozích dvou případech, nedokáže vyvinout vyšší zatěžující rychlost než již měřených 600 mm/min a byla snaha zjistit chování zvoleného materiálu Docol 1200M za extrémních rychlostí, bylo pro třetí skupinu měření použito rychlostního zařízení SOKOL 400 (Obr. 6).



Obr. 6: Zařízení SOKOL 400 a upnutá zkušební tyč.

Tento stroj, vyvinutý na Katedře strojírenské technologie, původně určený pro rychlostní tribologické testování maziv, je ve své podstatě horizontálním trhacím mechanismem s maximální rychlostí posuvu 400 mm/s (jak napovídá samotné označení stroje) tedy 24000 mm/min . Maximální síla čelistí činí u tohoto zařízení $F_t = 20 \text{ kN}$. Vzhledem k extrémním pevnostním hodnotám zkoušeného materiálu nemohly být použity pro tuto sérii měření tahové tyčky popsané v úvodu kapitoly 4.2.1, neboť jejich průřez činil $S_0 \cong 25 \text{ mm}^2$ což je hodnota překračující, vzhledem k dané síle čelistí, možnosti tohoto stroje. Proto byly zhotoveny speciální vzorky (obrázek Obr. 7) šířky 4 mm s průřezem $S_0 \cong 8 \text{ mm}^2$ vyhovující parametrům stroje [8].



Obr. 7: Porovnání zkušební tyče pro rychlost 10 a 24000 mm/min

Vzorky byly nastříhány na tabulových nůžkách a ofrézovány na funkčních plochách. Zkoušen byl stejný počet vzorků jako v předchozích případech. Jelikož zařízení SOKOL 400

neobsahuje průtahoměr, bylo před vlastním měřením provedeno orýsování zkušebních tyček po 10 mm v celém měřeném úseku. Takto připravené tyčky byly proměřeny Abbého délkoměrem a digitálním posuvným měřítkem firmy Mitutoyo. Po nastavení parametrů zkoušky (tlak v hydraulických čelistech, frekvence snímání, ukončení testu dáno nastavenou dráhou příčnicku, rychlost posuvu 24000 mm/min a geometrie zkušební tyče) byl vzorek vložen do čelistí, sevřen požadovaným tlakem a započal vlastní test. Po zkoušce proběhlo uložení naměřených dat ve formě Excelovského souboru (datový kanál síly, dráhy příčnicku). Tento postup byl aplikován na všech vzorcích tří směrů odebrání. První sada (směr 0°) obsahovala pouze 4 vzorky, neboť první exemplář vyjel při pokusném testu z čelistí a byl nevratně zdeformován. Některé vzorky (ve všech třech směrech) praskly mimo orýsovanou oblast. Pro výpočet tažnosti $A_{50\text{ mm}}$ bylo u všech vzorků, po přiložení příslušných částí zkušebních tyček, provedeno zjištění délky měřených úseků po deformaci na Abbého délkoměru. Hledané tažnosti byly dopočítány dle vztahu (8) [17, 19].

$$A_{50\text{ mm}} = \frac{\Delta L}{L_o} \cdot 100 = \varepsilon \cdot 100 [\%] \quad (8)$$

Z naměřených dat byly v programu Excel zhotoveny tahové diagramy. Jedinou zjistitelnou hodnotou napětí, vlivem průběhu zkoušky a tvaru diagramu, byla mez pevnosti R_m . Nepřítomnost průtahoměru na zařízení SOKOL 400 mělo za následek, že také tažnosti nemohly být přesně zjištěny, kromě již zmíněné dopočítané tažnosti $A_{50\text{ mm}}$. Výsledné diagramy jsou proto v souřadnicích $R = f(\varepsilon_{\text{celkové}})$, kde $\varepsilon_{\text{celkové}}$ je deformace části zkušební tyče mezi čelistmi trhačického stroje SOKOL 400 (vzdálenost čelistí před zkouškou cca 120 mm).

4.2.2. Zkouška tahem - $t = 0,7\text{ mm}$

Jak již bylo uvedeno v úvodu kapitoly 4, rovinnost plechů Docol 1200M tloušťky 0,7 mm nebyla dobrá vlivem zvlnění a tudíž by bylo velmi obtížné zhotovit z takového polotovaru vzorky technologií řezání vodním paprskem. V důsledku nekonstantní vzdálenosti mezi tryskou a děleným materiálem by docházelo k značnému rozptylu vodního paprsku, případná regulace této hodnoty během procesu řezání by byla velmi komplikovaná, ne-li nemožná. Z tohoto důvodu byla nakonec pro zhotovení vzorků použita technologie řezání laserem, původně zamítnutá z obavy o přílišné tepelné ovlivnění materiálu. Zhotovení vzorků provedla, po jistých prvotních komplikacích, opět firma S-plasma s.r.o., tvar vzorků byl stejný jako je uveden na obrázku Obr. 3. Kvalita řezu byla velmi vysoká a tudíž nebylo zapotřebí následné obroušení funkčních ploch. Zhotovené vzorky byly opět použity pro zkoušky tahem rychlostí 10 mm/min a 600 mm/min.

a) Zkouška tahem - $t = 0,7\text{ mm} - 10\text{ mm/min}$

Postup měření této série zkoušek byl stejný jako u polotovaru tloušťky 2 mm a této rychlosti zatěžování. Počty vzorků byly obdobné a to směr 0° - 5 vzorků, směr 45° - 4 vzorky (menší celkový počet zhotovených vzorků) a směr 90° - 5 vzorků. Celkem bylo tedy zkoušeno 14 vzorků. Zjištěny byly základní mechanické veličiny ve všech směrech ($R_{p0,2}$, R_m , A_g , $A_{50\text{ mm}}$), ukazatele tvárnosti (UH , KUT , ZP) a následně dopočítány konstanty C a n . Taktéž byly zjištěny koeficienty normálové anizotropie r_a s použitím stejného zařízení a postupu jako v případě polotovaru tloušťky 2 mm. Tak jako v předchozích měřeních (tloušťka 2 mm) docházelo i zde k občasnému porušení vzorků mimo oblast měřenou průtahoměrem. Výsledné střední hodnoty tažností (A_g a $A_{50\text{ mm}}$) byly proto počítány opět pouze z hodnot vzorků porušených v měřené oblasti, na výsledné střední hodnoty napětí neměl tento jev pochopitelně vliv. Výsledné hodnoty byly opět doplněny statistickým vyhodnocením.

b) Zkouška tahem - $t = 0,7\text{ mm} - 600\text{ mm/min}$

Pro tuto rychlost zatěžování byly použity zkušební tyče stejného provedení (a stejného počtu) jako v předchozí podkapitole i stejný postup měření a vyhodnocení naměřených údajů.

c) Zkouška tahem - $t = 0,7 \text{ mm} - 24000 \text{ mm/min}$

Vzorky byly zhotoveny stříháním na tabulových nůžkách a následně ofrézovány na funkčních plochách. Z důvodu menší tloušťky polotovaru byly zhotoveny vzorky šířky 7 mm (Obr. 8), tedy o průřezu $S_0 \cong 5 \text{ mm}^2$.



Obr. 8: Normalizovaná zkušební tyč a tyče šířky 4 mm ($t = 2 \text{ mm}$) a 7 mm ($t = 0,7 \text{ mm}$)

Zhotoveno bylo 5 vzorků v každém směru, celkem tedy 15 kusů. Průběh celého měření i vyhodnocení dat proběhl obdobně jako u tloušťky materiálu 2 mm a této rychlosti zatěžování, tahové diagramy byly v souřadnicích $R = f(\epsilon_{\text{celkové}})$.

4.2.3. Dílčí výsledky

Následující souhrnné tabulky obsahují výsledné hodnoty všech provedených tahových zkoušek všech tří měřených rychlostí (10, 600 a 24000 mm/min). Hodnoty materiálu Docol 1200M tloušťky $t = 2 \text{ mm}$ jsou uvedeny v první tabulce Tab. 2 a materiálu Docol 1200M tloušťky $t = 0,7 \text{ mm}$ jsou zpracovány ve druhé tabulce Tab. 3.

Tab. 2: Výsledné hodnoty z tahových zkoušek materiálu Docol 1200M - $t = 2 \text{ mm}$

Docol 1200M $t = 2 \text{ mm}$		Rychlost zatěžování 10 mm/min						
		0°	s	45°	s	90°	s	x_s
$R_{p0,2}$	[MPa]	1074,71	20,39	1052,00	21,93	1101,23	31,13	1069,98
R_m	[MPa]	1238,78	16,55	1220,30	10,07	1252,77	8,99	1233,03
$A_{50 \text{ mm}}$	[%]	7,55	0,11	6,99	0,19	6,13	0,30	6,92
A_g	[%]	3,04	0,11	2,54	0,22	2,43	0,15	2,64
UH	[-]	0,868	0,006	0,862	0,012	0,879	0,021	0,868
KUT	[-]	0,065	0,001	0,060	0,001	0,054	0,001	0,060
ZP	[MPa]	9,283	0,324	8,827	0,713	6,971	1,194	8,477
C	[MPa]	1549,24	22,50	1529,76	21,13	1549,36	19,34	1539,53

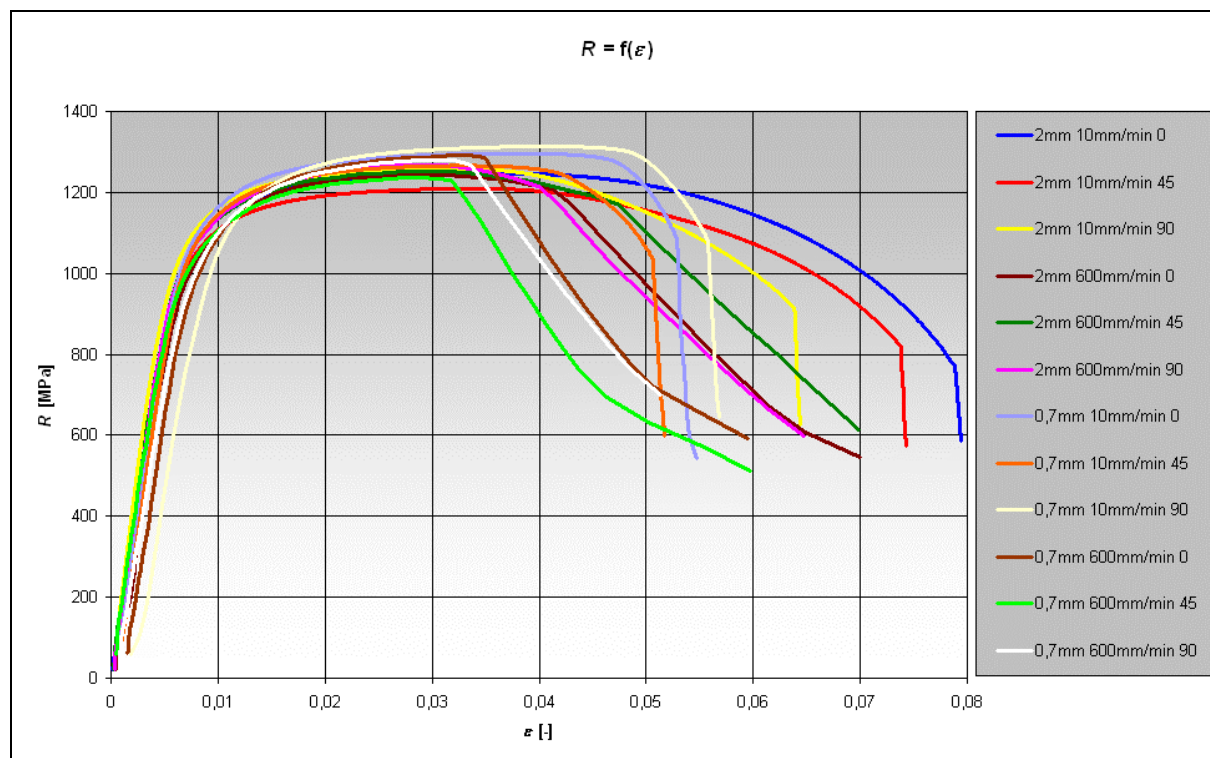
n	[-]	0,056	0,002	0,055	0,004	0,052	0,003	0,055
R^2	[-]	0,994	0,001	0,991	0,001	0,993	0,001	0,992
r_a	[-]	0,607	0,097	0,818	0,207	0,486	0,137	0,682
Docol 1200M $t = 2$ mm		Rychlost zatěžování 600 mm/min						
		0°	s	45°	s	90°	s	x_s
$R_{p0,2}$	[MPa]	1057,51	5,23	1052,91	17,19	1086,77	10,48	1062,53
R_m	[MPa]	1252,96	5,22	1234,65	11,27	1261,89	15,64	1246,04
$A_{50\text{ mm}}$	[%]	6,65	0,05	6,84	0,43	6,01	0,18	6,58
A_g	[%]	2,47	0,26	2,52	0,24	2,01	0,36	2,38
UH	[-]	0,844	0,003	0,853	0,010	0,861	0,013	0,853
KUT	[-]	0,056	0,001	0,058	0,001	0,052	0,001	0,056
ZP	[MPa]	9,748	0,212	9,324	0,615	7,887	0,787	9,070
C	[MPa]	1647,82	43,97	1554,76	29,79	1589,56	56,48	1586,73
n	[-]	0,069	0,008	0,056	0,005	0,056	0,008	0,059
R^2	[-]	0,987	0,004	0,983	0,012	0,989	0,005	0,986
Docol 1200M $t = 2$ mm		Rychlost zatěžování 24000 mm/min						
		0°	s	45°	s	90°	s	x_s
R_m	[MPa]	1274,69	8,79	1252,40	9,83	1279,59	7,47	1264,77
$A_{50\text{ mm}}$	[%]	4,36	2,55	4,34	0,56	4,60	1,15	4,41

Tab. 3: Výsledné hodnoty z tahových zkoušek materiálu Docol 1200M - $t = 0,7$ mm

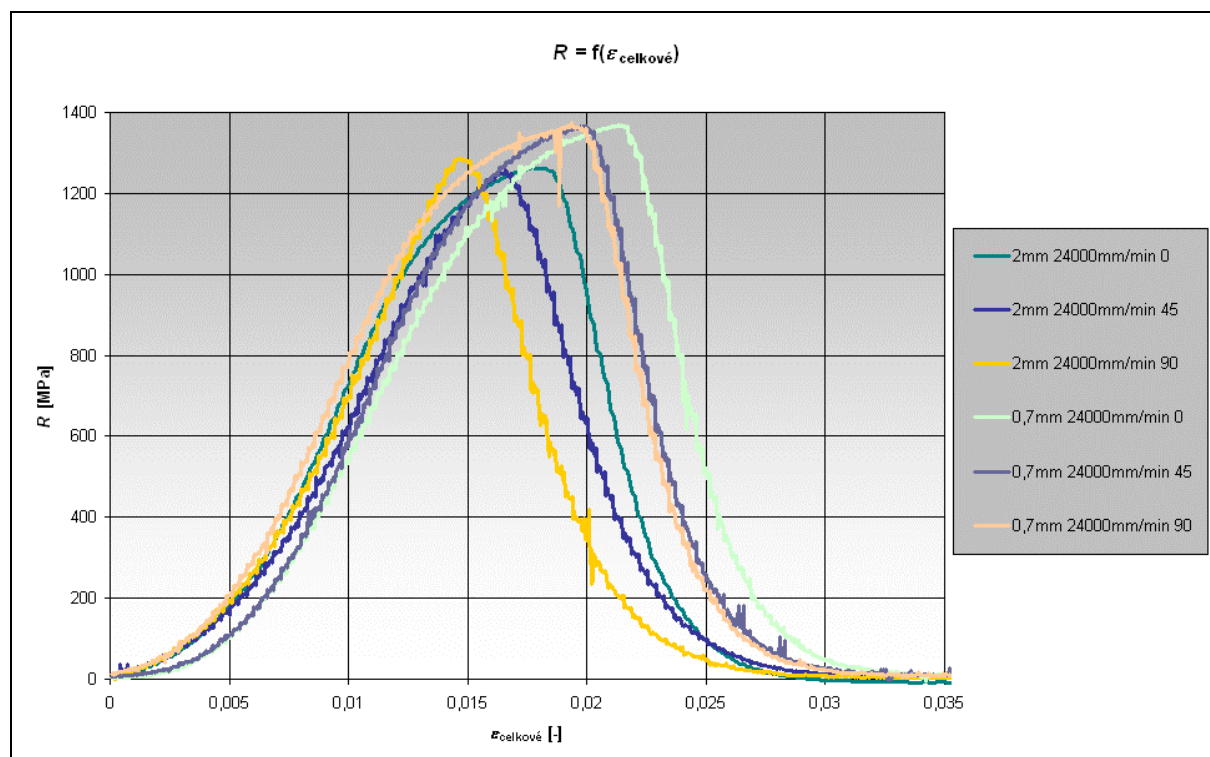
Docol 1200M $t = 0,7$ mm		Rychlost zatěžování 10 mm/min						
		0°	s	45°	s	90°	s	x_s
$R_{p0,2}$	[MPa]	1113,65	21,82	1099,13	17,92	1122,85	30,00	1108,69
R_m	[MPa]	1290,04	22,79	1267,62	4,52	1314,79	4,93	1285,01
$A_{50\text{ mm}}$	[%]	5,32	0,37	5,01	0,30	4,89	0,25	5,05
A_g	[%]	3,15	0,21	2,65	0,13	2,89	0,19	2,84
UH	[-]	0,863	0,012	0,867	0,012	0,854	0,021	0,863
KUT	[-]	0,046	0,001	0,043	0,001	0,042	0,001	0,044
ZP	[MPa]	7,031	0,659	6,324	0,567	7,035	0,983	6,679
C	[MPa]	1638,88	34,07	1599,70	26,36	1693,16	22,68	1632,86
n	[-]	0,061	0,005	0,058	0,006	0,064	0,005	0,060
R^2	[-]	0,992	0,002	0,991	0,002	0,987	0,004	0,991
r_a	[-]	1,290	0,358	1,667	0,567	1,103	0,589	1,432
Docol 1200M		Rychlost zatěžování 600 mm/min						

		0°	s	45°	s	90°	s	x_s
$R_{p0,2}$	[MPa]	1095,15	23,88	1061,39	17,90	1089,14	13,47	1076,77
R_m	[MPa]	1288,96	12,88	1235,60	25,59	1289,37	9,19	1262,38
$A_{50\text{ mm}}$	[%]	5,83	0,50	5,66	0,65	4,75	0,38	5,47
A_g	[%]	2,79	0,34	2,37	0,34	1,84	0,28	2,35
UH	[-]	0,849	0,015	0,859	0,004	0,845	0,011	0,853
KUT	[-]	0,050	0,001	0,049	0,001	0,040	0,001	0,047
ZP	[MPa]	8,475	0,807	7,391	0,358	7,133	0,511	7,597
C	[MPa]	1707,58	29,20	1594,00	43,99	1831,40	81,53	1681,75
n	[-]	0,071	0,006	0,064	0,003	0,089	0,012	0,072
R^2	[-]	0,984	0,002	0,988	0,003	0,989	0,002	0,987
Docol 1200M $t = 0,7\text{ mm}$		Rychlost zatěžování 24000 mm/min						
		0°	s	45°	s	90°	s	x_s
R_m	[MPa]	1368,48	10,60	1336,01	21,56	1372,72	9,39	1353,31
$A_{50\text{ mm}}$	[%]	4,42	0,16	4,44	0,31	4,81	0,61	4,52

Pro představu o tvaru tahových křivek a možnosti jejich vizuálního porovnání jsou dále přiloženy dva obrázky znázorňující vzorové tahové diagramy. Na obrázku Obr. 9 jsou ukázány tahové křivky (závislost $R = f(\varepsilon)$) obou tloušťek materiálu a rychlosti zatěžování 10 mm/min a 600 mm/min, na druhém obrázku Obr. 10 rychlosti zatěžování 24000 mm/min (závislost $R = f(\varepsilon_{\text{celkové}})$). Ke každé tloušťce a rychlosti zatěžování (u obou obrázků) náleží vždy tři vzorové křivky pro tři směry odebrání materiálu (0°, 45° a 90° na směr válcování).



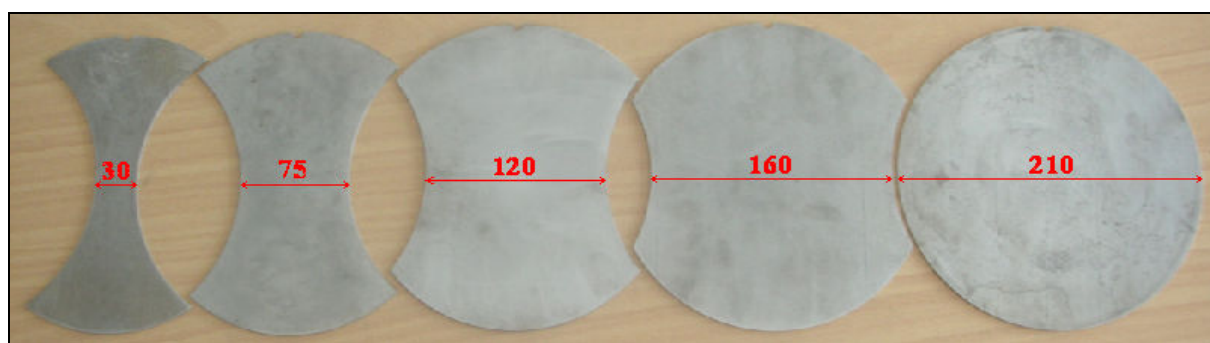
Obr. 9: Porovnání vzorových tahových křivek ve třech osách pro tloušťku materiálu 2 mm a 0,7 mm a rychlosti zatěžování 10 mm/min a 600 mm/min



Obr. 10: Porovnání vzorových tahových křivek ve třech osách pro tloušťku materiálu 2 mm a 0,7 mm a rychlost zatěžování 24000 mm/min

4.3. Diagramy mezních přetvoření

Diagramy mezních přetvoření (dále jen DMP) jsou komplexně pojaté diagramy, které velmi dobře zohledňují faktory ovlivňující proces tváření. Můžeme je chápat jako užitečné mapy plastičnosti daného plechu. Určení diagramů mezních přetvoření bylo v našem případě provedeno metodou vypínání tvarových přístřihů polokulovým tažníkem. Byly sestaveny zjednodušené DMP pomocí pěti sad vzorků, představujících pět deformačních stop. Byly to rondely o průměru 210 mm s kruhovými úsečmi stejného poloměru měnícími šířku vzorku ve střední části od 30 mm až do 210 mm (plný rondel). Každá jednotlivá sada se tedy skládala ze vzorku o rozměru 30, 75, 120, 160 a 210 mm (viz obrázek Obr. 11).



Obr. 11: Obroušená zkušební sada s rozměry

4.3.1. Příprava zkušebních vzorků

Plechý z materiálu Docol 1200M obou zkoušených tloušťek byly, tak jako v případě tahových tyčí, převezeny do firmy S-plasma s.r.o. pro zhotovení vzorků technologií CNC řezáním vodním paprskem. Pro každou tloušťku materiálu (2 a 0,7 mm) byly plánovány 3 diagramy mezních přetvoření (pro tři různé rychlosti), pro každý diagram bylo třeba 5 sad po 5 vzorcích. Celkem tedy vychází minimální počet 150 potřebných vzorků (75 od každé tloušťky).

a) Zhotovení vzorků pro DMP - $t = 2 \text{ mm}$

Zhotovení vzorků z plechů tloušťky 2 mm proběhlo bez komplikací, povrchová koroze vzniklá ve vodní lázni byla obroušena smirkovými kotouči.

b) Zhotovení vzorků pro DMP - $t = 0,7 \text{ mm}$

Na tomto místě je nutné konstatovat, že zhotovení vzorků pro DMP z polotovaru tloušťky 0,7 mm neproběhlo dle původních představ. Při výrobě vzorků řezáním vodním paprskem se vyskytly problémy jako při zhotovení tahových tyčí (viz. kapitola 4.2.2). Vlivem vysokého zvlnění plechů nebyla firma (S-plasma s.r.o.) schopna touto technologií vzorky zhotovit, a proto se pokusila, stejně jako u již zmíněných tahových tyčí, použít technologii řezání laserovým paprskem. Po opětovných pokusech však ani za použití této technologie nebyly vzorky zhotoveny, neboť při přejezdech řezací hlavy docházelo k nekontrolovaným posunům zvlněného plechu. Jelikož v blízkém okolí Technické univerzity v Liberci není jiná firma schopná případně vyrobit z pevnostních plechů požadované vzorky, je bohužel tato práce ve své experimentální části ochuzena o původně plánované tři diagramy mezních přetvoření (pro tři rychlosti zatěžování a tuto tloušťku plechu 0,7 mm) a jejich výsledné porovnání se zbývajícími třemi DMP zhotovenými z polotovaru tloušťky 2 mm.

4.3.2. Nanesení deformační sítě

Pro potřeby experimentu byla použita výroba deformačních sítí elektrolytickým leptáním vzorku přes speciální textilní šablonu. Vzhledem k velikosti přístřihů a charakteru materiálu (pevnostní ocel s nižší tažností) byla vybrána šablona s jemnější textilní sítí firmy Erichsen s kruhovými elementy o vnějším průměru 2 mm a středovými značkami. Použitý elektrolyt byl taktéž od firmy Erichsen. Po vyleptání sítě následovalo očištění povrchu vzorků neutralizačním roztokem Neutralyt (firma Erichsen) a nanesení tenkého olejového filmu z důvodu zabránění koroze elektrolytem porušeného povrchu.

4.3.3. Tažení vzorků

Bylo rozhodnuto o zhotovení tří diagramů mezních přetvoření lišících se rychlostí zatěžování sad vzorků. Pro první diagram DMP1 byla zvolena rychlost $v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$, pro diagram DMP2 rychlost $v_2 = 17,78 \text{ m.s}^{-1}$ a pro poslední DMP3 rychlost $v_3 = 22,5 \text{ m.s}^{-1}$. Různých rychlostí bylo docíleno užitím různých zařízení a postupů.

a) DMP1 - $v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$

Pro tažení vzorků prvního DMP byl použit modernizovaný hydraulický lis CBA 300/63. Na lisu byl instalován tažný nástroj pro vypínání tvarových přístřihů. Horním beranem byl vzorek přidržován v nástroji a vypínání bylo realizováno pomocí polokulového tažníku upnutého do spodního hydraulicky ovládaného pístu, který slouží při klasickém tažení jako vyhazovač. Rychlost tohoto pístu byla zmíněných $2,08 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$. Každý vzorek byl opatřen ze spodní strany dvojitou vrstvou lubrikantu (AP193-607117 od firmy PFINDER CHEMIE) a polyethylenové fólie pro eliminaci tření mezi tažníkem a vzorkem (lom pak nastává na vrcholku kulového vrchlíku vzorku), poté byl vložen do nástroje a zatížen do

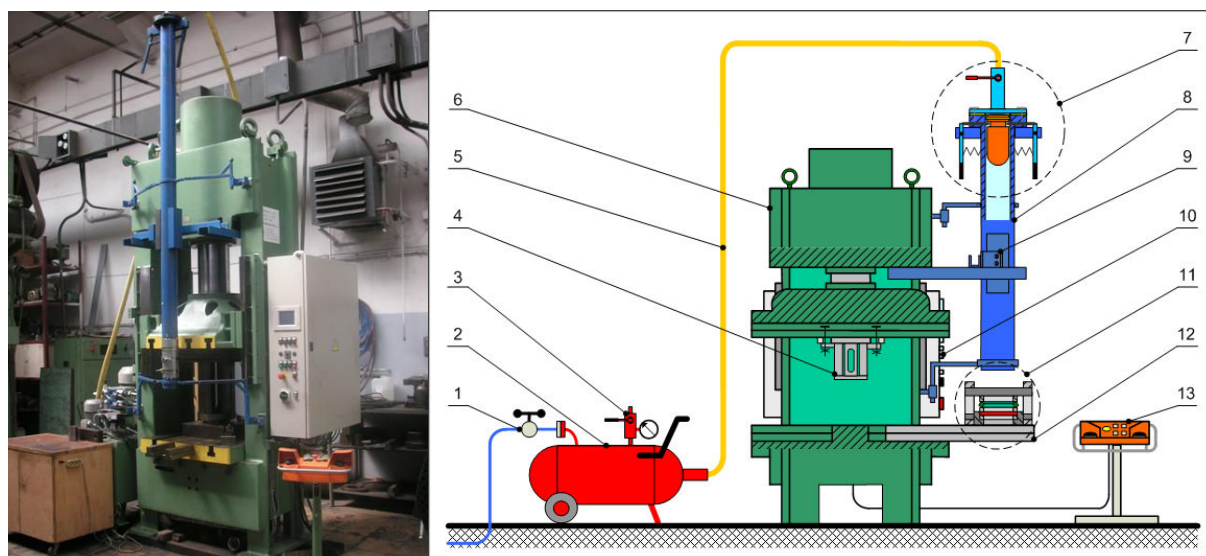
počátku vzniku trhliny. Po tažení byl každý vzorek očištěn od zbylého maziva a tažných fólií a přenesen do laboratoře pro vyhodnocení deformačních sítí.

b) DMP2 - $v_2 = 17,78 \text{ m.s}^{-1}$ a DMP3 - $v_3 = 22,5 \text{ m.s}^{-1}$

Pro možnost posouzení vlivu rychlosti zatěžování na tvar DMP u zvoleného materiálu bylo nutné provést také zkoušky za vysokých rychlostí. Zvoleny byly dvě rychlosti, a to $v_2 = 17,78 \text{ m.s}^{-1}$ (64 km.h^{-1}), jejíž velikost odpovídá čelní bariérové zkoušce a rychlost $v_3 = 22,5 \text{ m.s}^{-1}$ (81 km.h^{-1}), jakožto předpokládaná krajní mez při nárazu vozidla do překážky. Současně musely být obě rychlosti bezpečně proveditelné na zkušebních zařízeních katedry, což zvolené hodnoty splňují. Pro vlastní experiment byl použit rychlostní přípravek upevněný na modernizovaném hydraulickém lisu CBA 300/63.

• **konstrukce rychlostního přípravku a postup měření**

Sestava rychlostního přípravku se skládá z několika hlavních částí, jejichž schematické rozmístění je zobrazeno v pravé části obrázku Obr. 12. Experimentální zařízení vstřeluje tažník do zkušebního vzorku stlačeným vzduchem, a tím docílí vysokých testovacích rychlostí a dopadových energií. Dopadovou rychlost a energii tažníku je možno měnit velikostí tlaku vzduchu (což blíže popisuje následující podkapitola) nebo použitím tažníků s různou hmotností. Hlavní částí pneumatického děla je trubka upnutá k hydraulickému lisu. Její horní konec je opatřen hlavicí s přívodem tlakového vzduchu přes ovládací ventil a spouštěcím zařízením tažníku. Pod trubkou se nachází vlastní nástroj držený dvěma T profily zasunutými v pracovním stole hydraulického lisu. Konstrukce rychlostního nástroje je zcela rozebratelná, skládající se ze základního bloku opatřeného uprostřed otvorem pro průchod tažníku. Do této základní desky je souose s otvorem vkládán kalený rýhovaný prstenec s tažnou hranou. Mezi tento kroužek, plnicí funkci tažnice a přidržovací prstenec je vkládán vzorek. Celý nástroj je v předpětí držen pomocí talířové pružiny fixované ve stlačeném stavu čtyřmi bočnicemi a dvěma příčnicí. Předepjatá talířová pružina dosahuje při maximálním stlačení jmenovité síly 2780 kN, což je u většiny vzorků dostačující hodnota pro správnou funkci přidržovače.



Obr. 12: Hydraulický lis CBA 300/63 s upnutým rychlostním dělem

Vysvětlivky k pozicím na obrázku Obr. 12:

- 1 - Přívod vzduchu přes redukční ventil.
- 2 - Pojízdná tlaková nádoba.
- 3 - Manometr a výpustný ventil.

- 4 - Nástroj ke stlačení rychlostního nástroje.
- 5 - Hadice pro dopravu vzduchu.
- 6 - Hydraulický lis CBA300/63.

7 - Ventil, tažník a jeho spouštění.

8 - Trubka rychlostního přípravku.

9 - Hlavní ukotvení děla k lisu.

10 - Hlavní ovládací panel lisu.

11 - Stlačený a vysunutý nástroj.

12 - Vodící T profily držící nástroj.

13 - Mobilní ovládací pult lisu.

Po vložení vzorku (opatřeného opět dvěma vrstvami fólií a maziva) do základního bloku následovalo složení rychlostního nástroje a jeho stlačení nástrojem upnutým k beranu hydraulického lisu. Ve stlačené poloze byly přiloženy bočnice a příčné profily pro zajištění předpětí pružiny, nástroj byl odlehčen a vysunut pod rychlostní dělo pro realizaci experimentu. Po vycentrování nástroje pod trubkou, pro docílení jejich souososti, byl otevřen přívod vzduchu z centrálního rozvodu do tlakové láhve a ta naplněna až na manometrem nastavený požadovaný tlak (požadovanou rychlost experimentu). Pod nástroj byl umístěn doraz, tažník byl na polokulové ploše opatřen mazivem, vložen do hlavice děla, důkladně zaaretován a nakonec utěsněn v dutině trubky dotažením šroubů odklopné části hlavice. Poté byl otevřen vzduchový ventil hlavice a stlačením aretačních pák uvolněn tažník. Po experimentu byl uzavřen přívod vzduchu, tažník byl vyndán z nástroje, nástroj přesunut pod lis kde byl stlačen, byly odebrány profily a bočnice a nástroj byl odlehčen. Po rozložení zbylé části nástroje byl zkušební vzorek vyndán z tažnice a očištěn. Celý postup byl aplikován na všech vzorcích obou zvolených rychlostí, avšak pro každý diagram bylo použito jiné hodnoty tlaku nastavené na manometru tlakové nádoby.

- **stanovení rychlosti tažníku**

Presné hodnoty dopadových rychlostí tažníku odpovídající velikostem nastaveného tlaku v tlakové nádobě jsou známy, neboť byla provedena řada snímání dopadajícího tažníku dvojicí rychlostních kamer. Nasnímané hodnoty rychlostí byly společně s příslušnými nastavenými tlaky vyneseny do grafu a proloženy regresní křivkou. Z jejího průběhu bylo patrné, že dopadová rychlost tažníku vykazuje vzhledem k nastavenému tlaku vzduchu lineární závislost. S využitím rovnice regrese použitého proložení byly nakonec dopočítány hledané hodnoty tlaků pro zvolené rychlosti $v_2 = 17,78 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (DMP2) a $v_3 = 22,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (DMP3). Hledané tlaky měly po zaokrouhlení hodnoty $p_2 = 208 \text{ kPa}$ a $p_3 = 300 \text{ kPa}$ [5].

4.3.4. Měření deformovaných elementů

Vyhodnocení deformovaných elementů proběhlo shodným způsobem u všech vzorků tří testovaných rychlostí zatěžování. Na začátku měření byly na jednotlivých vzorcích vybrány elementy, které těsně sousedily se vzniklým lomem, ale nebyly jím zasaženy. Vlivem tvaru trhliny, která vždy probíhala pod úhlem 45° a nikoliv kolmo k ploše výlisku, vyhovovaly stanovenému kritériu mezního přetvoření hned dvě skupiny elementů. Vše je dobře patrné z obrázku Obr. 13. První skupinu tvořily elementy nacházející se na jedné straně trhliny pracovní označené jako „hrot trhliny“ (pozice 1) a druhou elementy na protilehlé straně pojmenované „okraj trhliny“ (pozice 2). Z obrázku je jasně patrný rozdíl ve velikosti obou typů elementů, kdy element označený pozicí 1 má ve směru rovnoběžném s trhlinou přibližně stejný rozměr jako element 2, ale jeho protažení směrem kolmo k trhlince je větší. Elementy ležící na hrotu trhliny se také nachází již v oblasti lokálního ztenčení materiálu. Pro vytvoření jasné představy o rozdílu v dosažené velikosti deformace u elementů nacházejících se na hrotu a na okraji trhliny bylo provedeno u všech tří diagramů mezních přetvoření vyhodnocení obou typů elementů. Z obrázku také vyplývá, že trhlina neměla u všech vzorků v celé délce konstantní průběh a zejména u vzorků širších stop docházelo ke skokové změně úhlu lomu o 90° (z $+45^\circ$ na -45°).



Obr. 13: Tvar trhliny a zvolené elementy

Proměření vybraných elementů bylo provedeno na dílenském mikroskopu firmy Zeiss propojeném se stolním PC. Měření byly délky hlavních os elipticky zdeformovaných kruhových elementů. Při znalosti původního rozměru kruhového elementu (vnější vyleptaný průměr = 2,1 mm) byly ze zjištěných délek dle vztahu (9) dopočítány hledané hodnoty logaritmických deformací v hlavním (podélném) φ_1 a vedlejším (příčném) směru φ_2 . Takto získaná přetvoření byla importována do programu Statistica 6.0, kde byla pásma vypočtených bodů proložena v obou větvích regresními polynomickými křivkami druhého stupně (křivkami mezních přetvoření KMP) a byly k nim také sestrojeny konfidenční a toleranční intervaly [2, 3, 5, 18].

$$\varphi = \ln \frac{L_u}{L_o} [-] \quad (9)$$

kde je:

L_u ... konečná měřená délka po lomu [mm]

L_o ... počáteční měřená délka [mm]

4.3.5. Dílčí výsledky

V této kapitole jsou zpracovány výsledky výše popsaných měření. Pro každou ze zvolených rychlostí zatěžování ($v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$, $v_2 = 17,78 \text{ m.s}^{-1}$, $v_3 = 22,5 \text{ m.s}^{-1}$) byl z vyhodnocených deformací vybraných elementů sestrojen diagram mezních přetvoření v souřadnicích φ_1 - φ_2 . Každý z grafů, zhotovených pro jednu testovací rychlost, obsahuje dvě pásma bodů. Jedno pásmo odpovídá elementům ležícím na hrotu trhliny a druhé elementům na okraji trhliny. Dále grafy obsahují statistické vyhodnocení těchto dat s úrovní spolehlivosti 0,9. Oba soubory bodů jsou proloženy v levé i pravé větvi regresními polynomickými křivkami druhého stupně (v grafech znázorněny plnými čarami), křivkami mezních přetvoření, dle vztahu (10). Rovnice proložení jsou zobrazeny pod grafem a barevně odpovídají příslušným regresním křivkám. Přesnost odhadu parametrů základního souboru je v grafu vyjádřena oboustrannými konfidenčními intervaly danými rovnicí (11) a znázorněnými přerušovanými čarami. Pravděpodobnost výskytu bodů základního souboru udávají oboustranné toleranční intervaly (tečkované čáry) dané vztahem (12). Také byla zpracována tabulka (Tab. 4) s vyhodnocením rozdílnosti deformací zjištěných z elementů na hrotu a okraji trhliny. Znázorněna je minimální $\varphi_{1\min}$, maximální $\varphi_{1\max}$ a průměrná φ_{1P} hodnota deformace každého měřeného souboru. Je též spočten rozdíl průměrných hodnot

$\Delta\varphi_{1P}$ (φ_{1P} hrotu – φ_{1P} okraje) a průměrný pokles deformace v procentech $\Delta\varphi_{1P\%}$ daný pro náš případ vytvořeným vztahem (13). Dále jsou spočteny průměrné hodnoty intenzity deformace φ_{1P} obou souborů a jejich vzájemný rozdíl $\Delta\varphi_{1P}$ s vyjádřením poklesu v procentech $\Delta\varphi_{1P\%}$. Intenzity deformace byly spočteny dle vztahu (14). Poslední hodnotou je mezní přetvoření φ_{1K} definované interpolačním polynomem (15), který porovnává hlavní deformace tří sousedících elementů na levé a pravé straně trhliny [2, 3, 5].

$$\varphi_{1kj} = a + b \varphi_{2kj} + c \varphi_{2kj}^2 [-] \quad (10)$$

kde je:

$\varphi_{2kj}, \varphi_{1kj}$... souřadnice mezních bodů v DMP

a, b, c ... regresní koeficienty

$$\varphi_{K1kj} \pm t_{\alpha} \cdot (n - p) \cdot s_R \cdot \sqrt{\frac{1}{N_m}} [-] \quad (11)$$

kde je:

$t_{\alpha(n-p)}$... kritická hodnota studentova rozdělení se stupni volnosti (n-p)

s_R ... reziduální směrodatná odchylka

N_m ... počet měření

$$\varphi_{T1kj} \pm k_1 \cdot s_R [-] \quad (12)$$

kde je:

k_1 ... tabelovaná hodnota

$$\Delta\varphi_{1P\%} = \frac{(\varphi_{1PH} - \varphi_{1PO}) \cdot 100}{\varphi_{1PH}} [\%] \quad (13)$$

kde je:

$\varphi_{1PH}, \varphi_{1PO}$... průměrná hodnota deformace φ_1 elementů na hrotu a okraji trhliny [-]

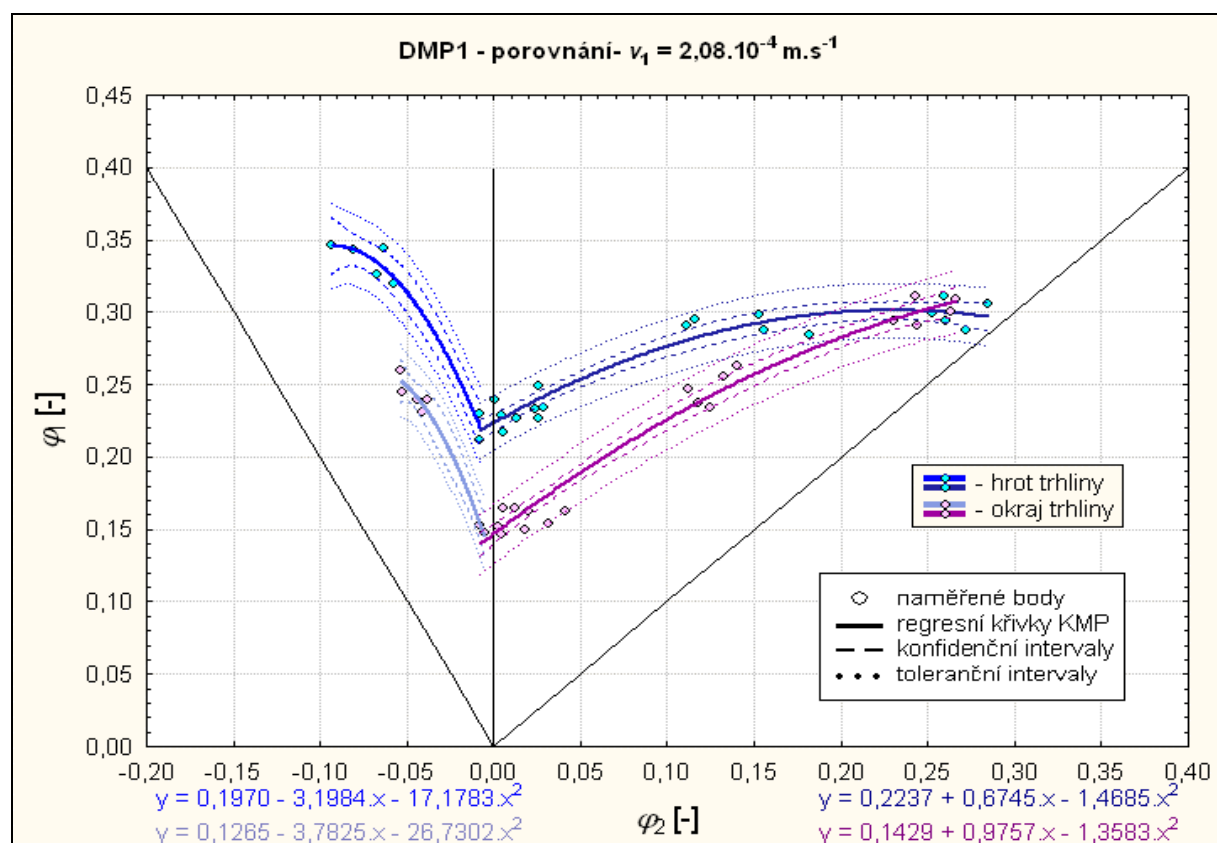
$$\varphi_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{(\varphi_1 - \varphi_2)^2 + (\varphi_2 - \varphi_3)^2 + (\varphi_3 - \varphi_1)^2} [-] \quad (14)$$

$$\varphi_{1K} = \frac{3}{4} \cdot (\varphi_1^{1L} + \varphi_1^{1P}) - \frac{3}{10} \cdot (\varphi_1^{2L} + \varphi_1^{2P}) + \frac{1}{20} \cdot (\varphi_1^{3L} + \varphi_1^{3P}) [-] \quad (15)$$

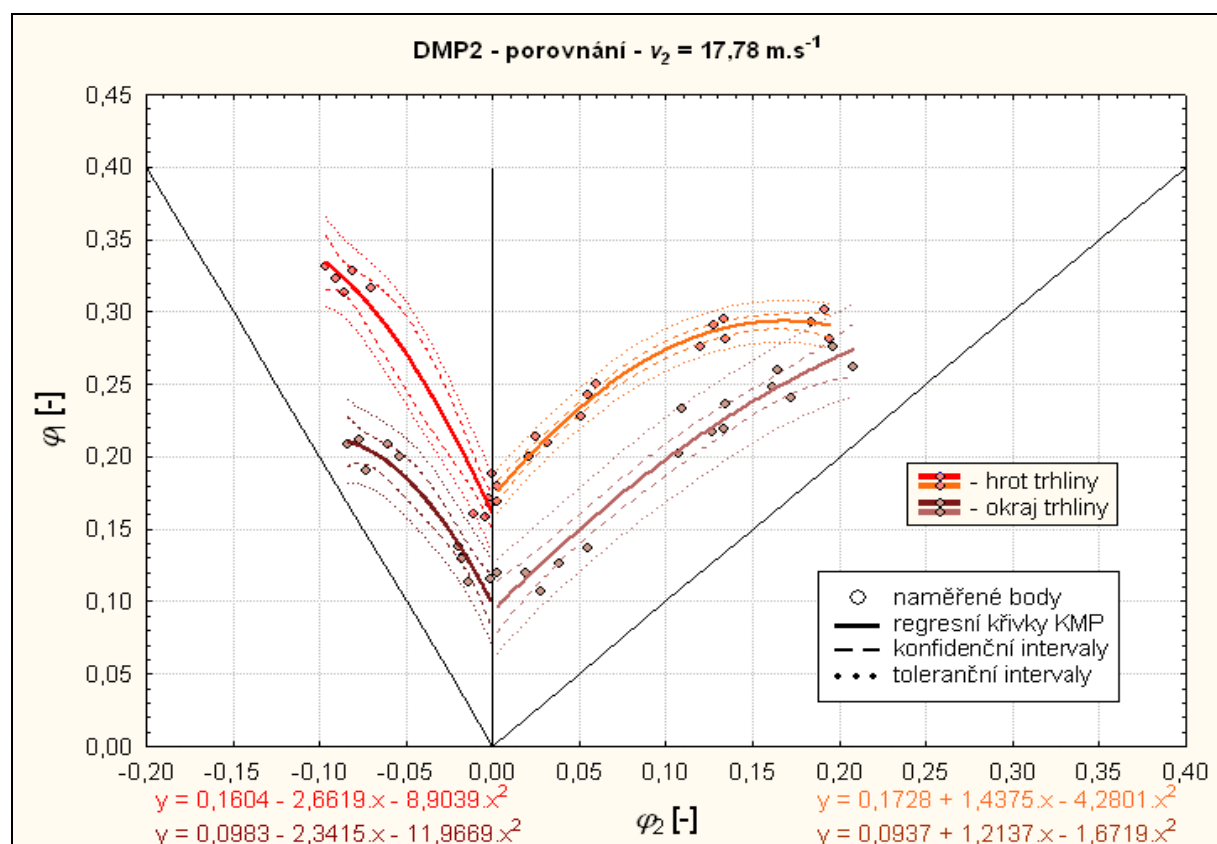
kde je:

φ^L, φ^P ... přetvoření levého a pravého elementu [-]

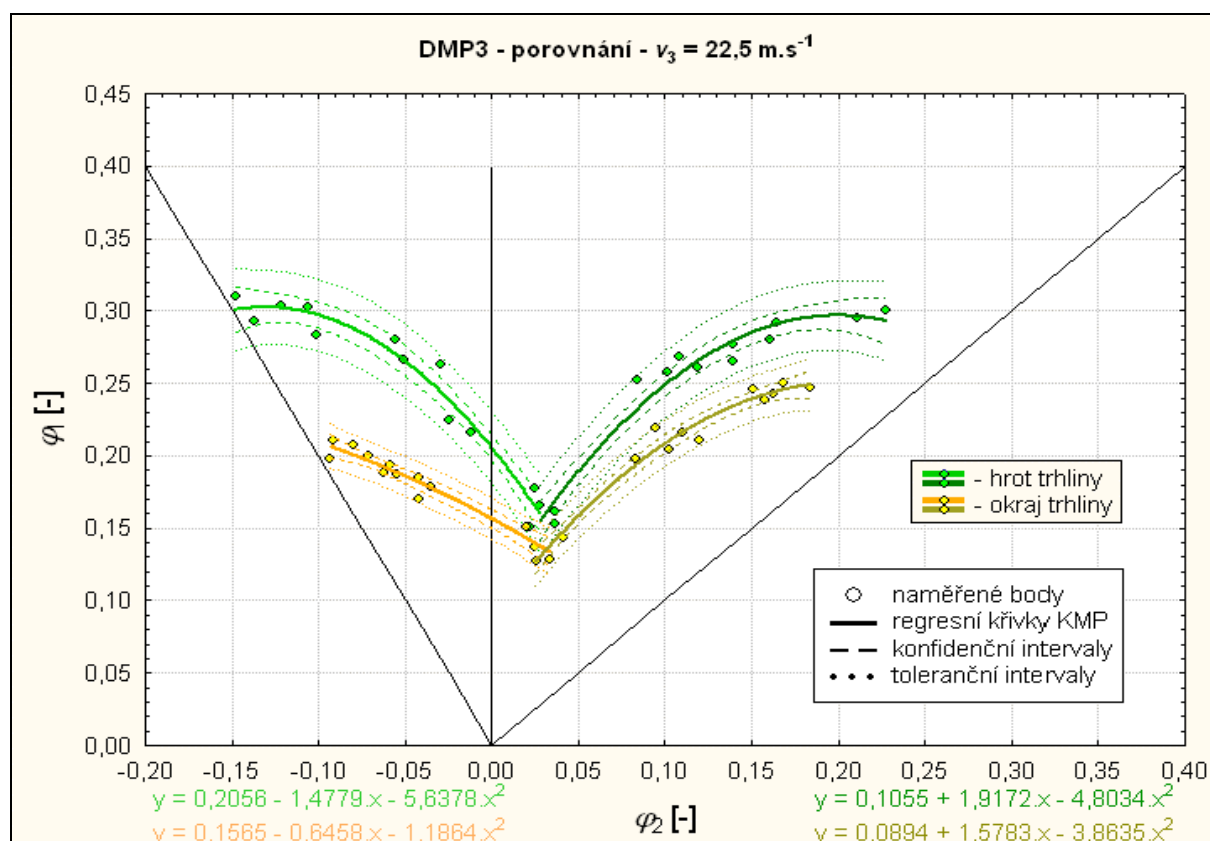
a) DMP - výsledné grafy



Obr. 14: Diagram mezních přetvoření DMP1



Obr. 15: Diagram mezních přetvoření DMP2



Obr. 16: Diagram mezních přetvoření DMP3

b) DMP – statistické porovnání

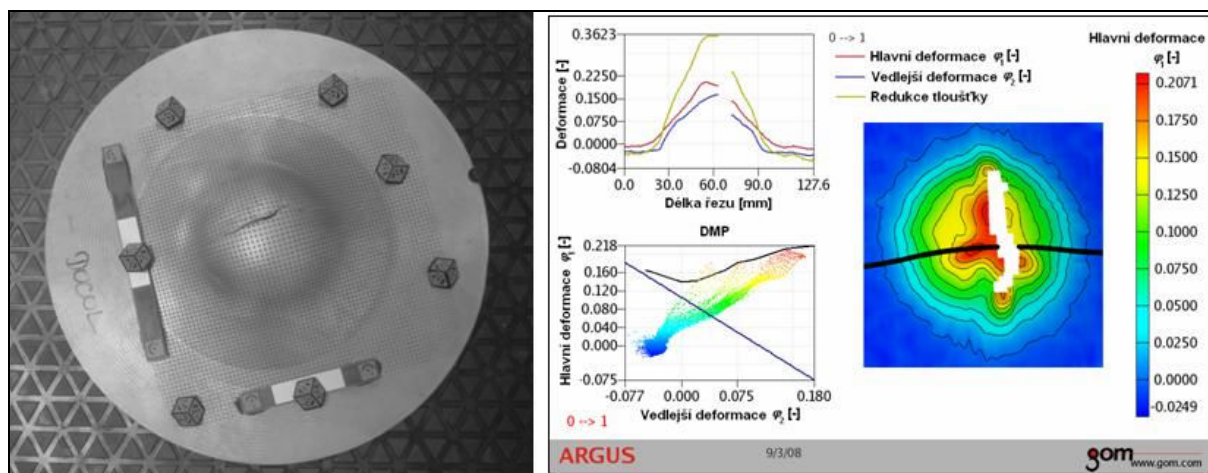
Tab. 4: Vyhodnocení odlišnosti naměřených deformací φ_1 na hrotu a okraji trhliny

DMP1	$\varphi_{1\max}$ [-]	$\varphi_{1\min}$ [-]	φ_{1P} [-]	$\Delta\varphi_{1P}$ [-]	$\Delta\varphi_{1P\%}$ [%]	φ_{1P} [-]	$\Delta\varphi_{1P}$ [-]	$\Delta\varphi_{1P\%}$ [%]	φ_{1K} [-]
Hrot	0,346	0,212	0,277	0,057	20,438	0,182	0,040	22,081	0,206
Okraj	0,311	0,146	0,220			0,142			
DMP2	$\varphi_{1\max}$ [-]	$\varphi_{1\min}$ [-]	φ_{1P} [-]	$\Delta\varphi_{1P}$ [-]	$\Delta\varphi_{1P\%}$ [%]	φ_{1P} [-]	$\Delta\varphi_{1P}$ [-]	$\Delta\varphi_{1P\%}$ [%]	φ_{1K} [-]
Hrot	0,332	0,158	0,247	0,061	24,573	0,162	0,040	24,739	0,115
Okraj	0,276	0,107	0,186			0,122			
DMP3	$\varphi_{1\max}$ [-]	$\varphi_{1\min}$ [-]	φ_{1P} [-]	$\Delta\varphi_{1P}$ [-]	$\Delta\varphi_{1P\%}$ [%]	φ_{1P} [-]	$\Delta\varphi_{1P}$ [-]	$\Delta\varphi_{1P\%}$ [%]	φ_{1K} [-]
Hrot	0,310	0,151	0,252	0,057	22,586	0,170	0,039	22,825	0,063
Okraj	0,251	0,127	0,195			0,131			

4.4. Rozložení deformace v okolí trhliny

Z porovnání výsledných hodnot diagramů mezních přetvoření je patrné, že u materiálu Docol 1200M velmi záleží na správné volbě vhodných elementů. Při zvolení oblasti hrotu trhliny byly zjištěny hodnoty hlavních deformací v průměru o více než 20 % vyšší než na okraji trhliny. Tento skok v dosažených hodnotách je způsoben rozložením deformace v okolí trhliny jednotlivých vzorků. Každý materiál má tento průběh odlišný, některé vykazují plochou charakteristiku s pozvolným nárůstem deformace směrem k trhlíně, u jiných dochází ke koncentraci deformací v okolí trhliny a zbytek materiálu je téměř nedeformován (například

testovaný materiál Docol 1200M). Přesné vyhodnocení průběhu deformace v okolí trhliny bylo provedeno u materiálu Docol 1200M optickým systémem ARGUS od německé firmy GOM. Zkušební rondel byl opatřen elektrolyticky leptanou bodovou sítí a deformován do počátku vzniku trhliny rychlostí $v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$. Po korekcích bylo provedeno nasnímání deformovaného vzorku kamerou systému ARGUS a v ovládacím programu provedeno celkové vyhodnocení. Obrázek Obr. 17 znázorňuje v levé části deformovaný rondel připravený k vyhodnocení a v pravé části grafický výstup požadovaných veličin, skládající se z několika částí. V pravé části je znázorněn nasnímaný vzorek s rozložením hlavní deformace (rozlišení barvami a vrstevnicemi) a naznačeným řezem. Levá část obsahuje dva grafy. Horní představuje průběh deformací a redukci tloušťky materiálu v závislosti na délce řezu, dolní znázorňuje DMP pro oblast řezu v souřadnicích φ_1 a φ_2 . Z rozložení hlavní deformace na zkušebním rondelu a z průběhu deformace v provedeném řezu vyplývá, že v oblasti blízko trhliny opravdu dochází u tohoto materiálu k prudkému nárůstu deformace. Tímto zjištěním jsou jednak potvrzeny výsledky prvotního manuálního měření průběhu deformace na dílenském mikroskopu (které proběhlo před optickým měřením a dosáhlo obdobného průběhu deformace) a také vysvětleny odlišnosti křivek mezních přetvoření zjištěných z elementů na hrotu a okraji trhliny.



Obr. 17: Měřící prostor systému ARGUS a grafické vyhodnocení

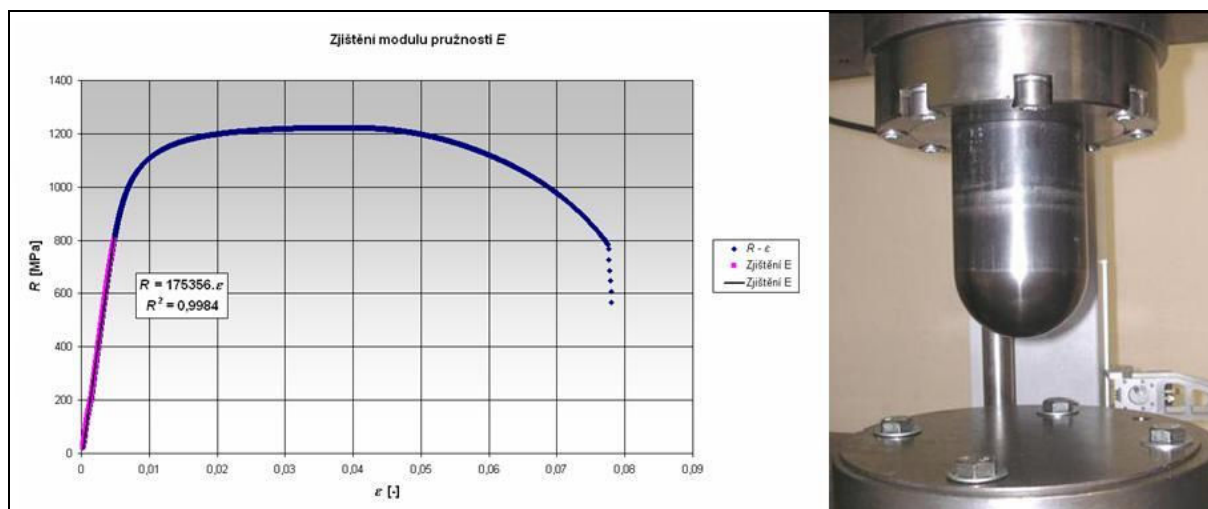
4.5. Modelový výpočet sil a napětí při průhybu rondelu

Před praktickou aplikací teoretických poznatků na použitém zkušebním vzorku bylo nejprve zapotřebí stanovit jistá zjednodušení [15]:

- deska rotačně symetrická a po celém obvodu uložena v neposuvném vetknutí,
- zatížení uprostřed desky osamělou silou (počáteční kontakt tažníku),
- použity zjednodušené výpočty pro tenké desky a membrány (pro $\mu = 0,3$).

a) Výpočet dle teorie tenkých desek

Pro naše vstupní podmínky byly z literatury [15] určeny konstanty $K = 0,443$ a $L = 0,217$. Pro výpočet byl zvolen plný rondel ($\varnothing 210 \text{ mm}$) tloušťky 2 mm. Vlastní průměr neupnuté části desky činil 120 mm (průměr tažnice), tedy poloměr desky $r = 60 \text{ mm}$. Základní mechanické hodnoty byly použity z tahové zkoušky (rychlost 10 mm/min, směr odebrání 0° a číslo zkoušky 3). Zjištěná napětí mají velikost $R_{p0,2} = 1048,81 \text{ MPa}$, $R_m = 1223,01 \text{ MPa}$ ($\sigma_m = 1269,60 \text{ MPa}$) a odpovídající síly $F_{p0,2} = 26618,90 \text{ N}$ a $F_m = 31040,00 \text{ N}$. Také byla zjištěna hodnota modulu pružnosti v tahu E , z aproximace lineární části tahového diagramu jak je ukázáno na obrázku Obr. 18 vlevo. Lineární regrese ve tvaru $R = E \cdot \varepsilon$ ukazuje hledanou hodnotu modulu pružnosti v tahu $E = 175356 \text{ MPa}$.



Obr. 18: Zjištění modulu pružnosti v tahu a experimentální zatěžování desky

Neznámé průhyby w byly ve vzorcích nahrazeny postupnou iterací řady hodnot s krokem daným velikostí průhybu 0,05 mm. Závislost síly na průhybu byla vyjádřena dvěma rovnicemi. První ve tvaru (16) pro malé průhyby a druhá (17) pro průhyby velké [15].

$$F = \frac{\left(\frac{w}{h}\right) \cdot (1 + K) \cdot E \cdot h^4}{L \cdot r^2} \text{ [N]} \quad (16)$$

$$F = \frac{\left[\left(\frac{w}{h}\right) + K \cdot \left(\frac{w}{h}\right)^3\right] \cdot E \cdot h^4}{L \cdot r^2} \text{ [N]} \quad (17)$$

b) Výpočet dle teorie membrán

Tento výpočet byl proveden obdobně jako u teorie tenkých desek s použitím stejných hodnot. Rovnice pro osamělou sílu byla nyní ve tvaru (18) [15].

$$F = \frac{\left(\frac{w}{h}\right)^3 \cdot E \cdot h^4}{0,28 \cdot r^2} \text{ [N]} \quad (18)$$

c) Experimentální zjištění závislosti průhybu na zatížení

Jelikož hydraulický lis CBA 300/63 (použitý v měřeních DMP) nedokáže snímat závislost síly na průhybu vzorku, byl experiment proveden na trhačím stroji TIRAtest 2300 ovládaném pomocí softwaru LabNET. Zkušební vzorek, odpovídajících rozměrů, byl přišroubován (šrouby plnily funkci přidržovače) k tažnici, upnuté na příčnici v horním pracovním prostoru stroje, a zatížen polokulovým tažníkem (rychlost 10 mm/min). Zkouška byla ukončena po dosažení průhybu 10 mm (Obr. 18 vpravo).

d) Vyhodnocení

Výsledné závislosti zjištěných hodnot jsou zpracovány na obrázcích Obr. 17 a Obr. 18. První představuje závislosti zátěžné síly na průhybu (pro malé a velké deformace) spočtené dle teorie tenkých desek a druhý doplňuje tyto křivky o průběh zátěžné síly spočtené dle teorie membrán. Oba grafy též obsahují hledanou závislost obou veličin (síly a průhybu) zjištěnou experimentálním měřením. Pro představu o výši zjištěných hodnot jsou v grafech přerušovanými čarami znázorněny hodnoty síly na mezi pevnosti a na mezi kluzu a také hranice platnosti příslušných výpočtových modelů. Přejít mezi Kirchhoffovými deskami a

deskami tenkými představuje hodnota daná výrazem (19). Hranici mezi tenkými deskami a membránami byla dopočítána z rovnice (20). Z prvního obrázku Obr. 19 je patrné, že experimentálně zjištěná závislost není lineární, přesto se svými hodnotami blíží spíše přímkovému průběhu spočtenému dle vztahů pro malý průhyb. Odlišnost experimentálního průběhu a křivky pro velké průhyby je výrazná, což je nejspíše zaviněno řadou zjednodušení zavedených při výpočtu a také užitím univerzálních konstant neodrážejících konkrétní technologické podmínky [15].

$$\left(\frac{w}{h}\right) < \frac{1}{3} \quad (19)$$

$$\left(\frac{w}{h}\right) > 2,5 \quad (20)$$

Na obrázku Obr. 20 je patrný navazující průběh vypočtených hodnot sil pro tenké desky (počítaných ze vztahů pro velké průhyby) a membrány. Jestliže v případě porovnání experimentálních hodnot s výpočty dle teorie tenkých desek (velkých průhybů) došlo k odchylkám, tak z předchozího obrázku je vidět, že v případě porovnání experimentu s výpočtem dle teorie membrán můžeme hovořit o dvou naprosto odlišných křivkách. Pro výpočet výsledného napětí na obvodu desky $\sigma_{r,t}$, daného součtem ohybového a membránového, byly proto použity vztahy pro tenké desky. Tyto vztahy platí, v našem případě, do průhybu 5 mm, což je hodnota použitelná jak pro výpočet tak i pro experimentálně zjištěný průběh. Membránové napětí popisuje vztah (21) a ohybové (22) [15].

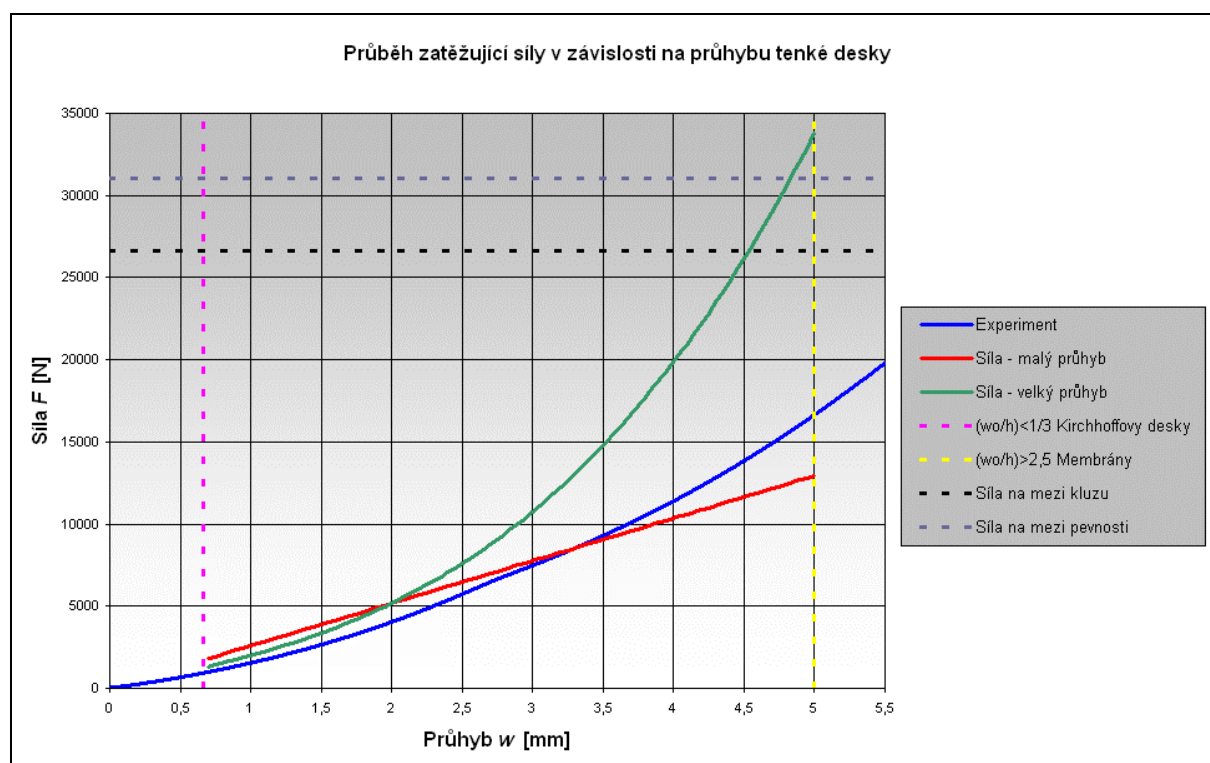
$$\sigma'_{r,t} = \frac{\left(\frac{w}{h}\right)^2 \cdot S \cdot E \cdot h^2}{r^2} \text{ [MPa]} \quad (21)$$

$$\sigma''_{r,t} = \frac{\left(\frac{w}{h}\right) \cdot |R| \cdot E \cdot h^2}{r^2} \text{ [MPa]} \quad (22)$$

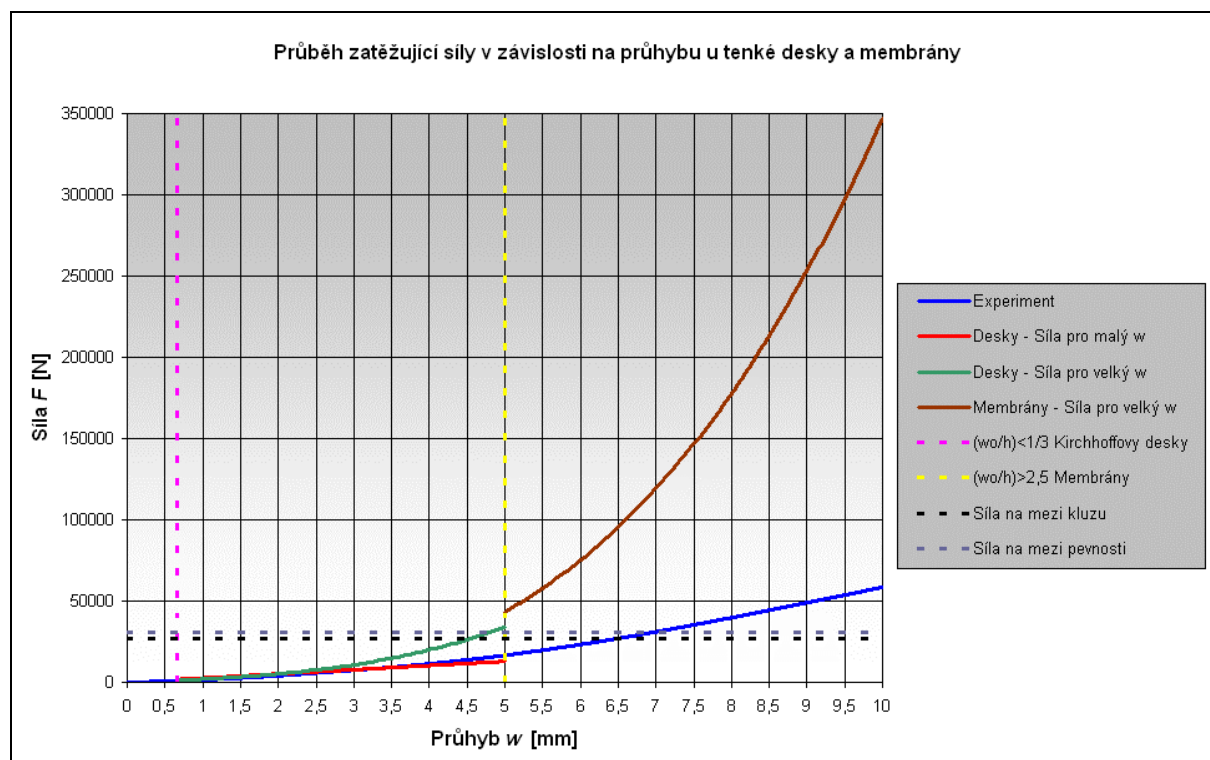
Konstanty byly odečteny z literatury a mají hodnotu $S = 1,232$ a $|R| = 1,778$, průhyb byl zvolen $w = 5$ mm (pro experimentálně zjištěnou sílu $F = 16650,90$ N) a ostatní rozměry byly použity z předchozích výpočtů. Hledané hodnoty napětí jsou tyto:

- membránové napětí na obvodu desky $\sigma'_{r,t} = 1497,22$ MPa,
- ohybové napětí na obvodu desky $\sigma''_{r,t} = 864,31$ MPa,
- celkové napětí na obvodu desky $\sigma_{r,t} = 2361,53$ MPa.

Pokud porovnáme mez pevnosti vzorku $R_m = 1223,01$ MPa ($\sigma_m = 1269,60$ MPa) s vypočtenými napětími, zjistíme, že tato hodnota byla překročena, přesto nedošlo k porušení vzorku. Ačkoliv měl tento vzorek malé rozměry (rondel Ø 210 mm), tak je více než pravděpodobné, že by za obdobných zátěžných podmínek (použitá síla, průhyb a rychlost zatěžování) obstál i mnohem větší výrobek (výtažek karosářského typu) zhotovený z testovaného materiálu. V takovém případě by se tato experimentálně-početní metoda nechala využít jako levná, rychlá a přijatelně přesná alternativa ke CRASH testu dané součásti. Otázkou ovšem zůstává praktická použitelnost vzorců pro model tenké desky, neboť jejich platnost by měla být omezena oblastí malých (pružných) deformací. Pro výpočet napětí při větší hodnotě experimentálně zjištěného průhybu by bylo zapotřebí nejprve ověřit platnost stávajících vztahů nebo případně nalézt vztahy jiné.



Obr. 19: Závislost zátěžné síly na průhybu tenké desky



Obr. 20: Závislost zátěžné síly na průhybu tenké desky a membrány

5. DISKUZE VÝSLEDKŮ DISERTAČNÍ PRÁCE

Diskuze výsledků disertační práce navazuje na dílčí zhodnocení uvedená v předchozích kapitolách a souhrnně prezentuje zjištěné poznatky. Disertační práce se zabývá výzkumem vlastností testovaného pevnostního materiálu Docol 1200M (provedeného ve dvou tloušťkách 2 mm a 0,7 mm) za různých rychlostních podmínek.

Nejprve byly zkoumány změny vnitřní struktury této martenzitické oceli, ke kterým došlo v závislosti na použité rychlosti zatěžování. Kromě protažení zrn v okolí trhliny ve směru působení tahové síly a mírnému procentuálnímu nárůstu podílu martenzitu v materiálu však tyto testy neprokázaly žádné významné rozdíly v dosažených strukturách.

Porovnání základních mechanických hodnot obou rozměrů testovaného materiálu bylo provedeno pomocí tří rychlostních sérií tahových zkoušek v každém směru na směr válcování plechu (0° , 45° , 90°). Nejprve byly na trhačím stroji TIRAtest 2300 realizovány statické zkoušky tahem ($v = 10$ mm/min) a následně zkoušky za vyšší rychlosti ($v = 600$ mm/min). Také proběhlo u obou polotovarů zjištění koeficientu normálové anizotropie r_a a z proložení tahových křivek polynomem druhého stupně byl určen modul monotónního zpevnění C a exponent deformačního zpevnění n . Nakonec byly na zařízení SOKOL 400 provedeny tahové zkoušky extrémní rychlostí ($v = 24000$ mm/min tedy $v = 0,4$ m/s). Všechny tyto testy ukázaly jak velmi jsou výsledné mechanické hodnoty a tedy i grafické průběhy tahových zkoušek tohoto materiálu závislé na velikosti zkušební rychlosti. V tabulce Tab. 5 jsou zobrazeny směrově střední hodnoty x_s nejdůležitějších zjištěných hodnot (napětí a tažností) spolu s jejich vzájemným statistickým porovnáním.

Tab. 5: Porovnání výsledných směrově středních hodnot napětí a tažností

Rychlost zatěžování		10 [$\frac{\text{mm}}{\text{min}}$]	Rozdíl Δv (1-6)	Rozdíl % Δv (1-6)%	600 [$\frac{\text{mm}}{\text{min}}$]	Rozdíl Δv (6-24)	Rozdíl % Δv (6-24)%	24000 [$\frac{\text{mm}}{\text{min}}$]
$t = 2$ mm	$R_{p0,2}$ [MPa]	1069,98	7,46	0,70	1062,53	-	-	-
$t = 0,7$ mm		1108,69	31,93	2,88	1076,77	-	-	-
Rozdíl	$\Delta R_{p0,2}$ [MPa]	38,71	24,47	63,21	14,24	-	-	-
Rozdíl %	$\Delta R_{p0,2}\%$ [%]	3,49	2,17	62,12	1,32	-	-	-
$t = 2$ mm	R_m [MPa]	1233,03	13,01	1,04	1246,04	18,73	1,48	1264,77
$t = 0,7$ mm		1285,01	22,63	1,76	1262,38	90,92	6,72	1353,31
Rozdíl	ΔR_m [MPa]	51,98	35,64	68,56	16,35	72,19	81,54	88,54
Rozdíl %	$\Delta R_m\%$ [%]	4,05	2,75	67,99	1,29	5,25	80,21	6,54
$t = 2$ mm	$A_{50 \text{ mm}}$ [%]	6,92	0,33	4,80	6,58	2,18	33,03	4,41
$t = 0,7$ mm		5,05	0,42	7,67	5,47	0,95	17,41	4,52
Rozdíl	$\Delta A_{50 \text{ mm}}$ [%]	1,86	0,75	40,37	1,11	1,00	90,01	0,11
Rozdíl %	$\Delta A_{50 \text{ mm}}\%$ [%]	26,94	10,06	37,36	16,87	14,42	85,45	2,46
$t = 2$ mm	A_g [%]	2,64	0,25	9,64	2,38	-	-	-
$t = 0,7$ mm		2,84	0,49	17,25	2,35	-	-	-
Rozdíl	ΔA_g [%]	0,20	0,17	82,50	0,03	-	-	-
Rozdíl %	$\Delta A_g\%$ [%]	7,05	5,58	79,16	1,47	-	-	-

Ve dvou řádcích pod sebou jsou vždy pro obě testované tloušťky polotovaru a jednu zkušební rychlost zobrazeny hodnoty hledané mechanické veličiny. Pod nimi (okrová barva) je také ve dvou řádcích provedeno jejich vzájemné statistické porovnání. Spočten je rozdíl Δx (kde x je testovaná veličina) těchto hodnot uvedený v absolutní hodnotě a také je uvedeno procentuální vyjádření tohoto rozdílu $\Delta x\%$ spočtené dle upraveného vztahu (13), který nyní obsahuje rozdíl Δx násobený 100% a podělený vyšší z porovnávaných hodnot. Mezi sousední hodnoty jedné veličiny zjištěné u jedné tloušťky polotovaru za různých rychlostí jsou vždy vloženy dva sloupce (modrá barva) statistického porovnání těchto hodnot. Opět je spočten rozdíl sousedních hodnot $\Delta v x$ uvedený v absolutní hodnotě (kde x je označení porovnávaných rychlostí (1-6), (6-24)) a procentuální vyjádření tohoto rozdílu $\Delta v x\%$. Pokud porovnáme odpovídající si napětí obou polotovarů, zjistíme, že hodnoty vykazují pouze odchylky 1,3÷6,5 %. U tažností je tento rozdíl mezi oběma tloušťkami výraznější a pohybuje se mezi 1,5÷27 %. S rostoucí hodnotou testovací rychlosti se rozdíl snižuje. Meze kluzu a meze pevnosti nedoznaly vlivem různé rychlosti zatěžování větších výkyvů, průměrný rozdíl hodnot se pohybuje v rozmezí 0,7÷6,7%. S nárůstem testovací rychlosti došlo k většímu poklesu tažnosti $A_{50 \text{ mm}}$. Při změně rychlosti z 10 na 600 mm/min doznala sice pokles pouze 4,8 % u polotovaru 2 mm a 7,7 % u 0,7 mm, avšak při změně rychlosti z 600 na 24000 mm/min to bylo již 33% a 17%. Obdobný pokles nastal i u tažnosti A_g při změně z 10 na 600 mm/min a to o 9,6 % u plechu 2 mm a o 17 % u 0,7 mm. Pokud porovnáme zjištěné směrově střední hodnoty materiálu Docol 1200M $t = 2$ mm s některými, již dříve na Katedře strojírenské technologie odzkoušenými, karosářskými materiály (hlubokotažná ocel DX 05 $t = 0,82$ mm, TRIP ocel RA-K 40/70 $t = 1,5$ mm a vícefázová ocel CPW 800 $t = 2,1$ mm), zjistíme, že jeho parametry odpovídají stanoveným předpokladům pro martenzitické oceli a také parametrům udávaným výrobcem. Zjištěné vysoké hodnoty meze kluzu (Docol 1200M $R_{p0,2} = 1069,98$ MPa, DX 05 $R_{p0,2} = 154,47$ MPa, RA-K 40/70 $R_{p0,2} = 461,43$ MPa, CPW 800 $R_{p0,2} = 731,70$ MPa) a meze pevnosti (Docol 1200M $R_m = 1233,03$ MPa, DX 05 $R_m = 280,40$ MPa, RA-K 40/70 $R_m = 762,73$ MPa, CPW 800 $R_m = 868,11$ MPa), společně s nízkou tažností (Docol 1200M $A_{50 \text{ mm}} = 6,92$ %, DX 05 $A_{80 \text{ mm}} = 44,06$ %, RA-K 40/70 $A_{50 \text{ mm}} = 28,69$ %, CPW 800 $A_{50 \text{ mm}} = 15,86$ %), jednoznačně řadí zvolený materiál mezi vysokopevnostní martenzitické oceli [2, 5].

Další velká část měření spočívala ve zjištění mezní deformace materiálu Docol 1200M při různých stavech napjatosti a různých testovacích rychlostech. Provedeny byly tři skupiny měření pro zvolené testovací rychlosti $v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$, $v_2 = 17,78 \text{ m.s}^{-1}$ a $v_3 = 22,5 \text{ m.s}^{-1}$. Zatěžování sad různě širokých vzorků (různé stavy napjatosti) opatřených deformační sítí bylo provedeno do okamžiku vzniku trhliny. Nejprve proběhlo měření pomalou zátěžnou rychlostí ($v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$), provedené na hydraulickém lisu CBA300/63 a teprve následně testování dvěma extrémními rychlostmi ($v_2 = 17,78 \text{ m.s}^{-1}$ a $v_3 = 22,5 \text{ m.s}^{-1}$) realizované na speciálním pneumatickém dělu. Po testech proběhlo vyhodnocení deformovaných elementů sítě, zvoleny byly dvě skupiny elementů označené „hrot trhliny“ a „okraj trhliny“. Vizualizace hodnot deformací v hlavním φ_1 a vedlejším směru φ_2 obou jmenovaných skupin byla realizována pomocí diagramů mezních přetvoření, jeden diagram pro každou použitou rychlost zatěžování (DMP1, DMP2 a DMP3). Porovnání těchto diagramů je provedeno v následující tabulce Tab. 6. Jsou zde souhrnně zpracovány výsledné hodnoty maximální ($\varphi_{1\text{max}}$), minimální ($\varphi_{1\text{min}}$) a průměrné ($\varphi_{1\text{p}}$) deformace a také průměrné intenzity deformace (φ_{p}) uvedené již dříve v tabulce Tab. 4. Dále tato tabulka obsahuje vzájemné porovnání těchto parametrů u jednotlivých diagramů mezních přetvoření (modrá barva), vyjádřené absolutním rozdílem sousedních hodnot příslušných diagramů $\Delta(1-2, 2-3$ nebo $1-3)$ a opět také hodnotou tohoto rozdílu uvedenou v % $\Delta(1-2, 2-3$ a $1-3)\%$ a spočtenou dle známého upraveného vztahu (13).

Tab. 6: Porovnání hodnot diagramů mezních přetvoření

Hrot trhliny	DMP1	Rozdíl $\Delta(1-2)$	Rozdíl % $\Delta(1-2)\%$	DMP2	Rozdíl $\Delta(2-3)$	Rozdíl % $\Delta(2-3)\%$	DMP3	Rozdíl $\Delta(1-3)$	Rozdíl % $\Delta(1-3)\%$
φ_{lmax} [-]	0,346	0,014	4,046	0,332	0,022	6,627	0,310	0,036	10,405
φ_{lmin} [-]	0,212	0,054	25,472	0,158	0,007	4,430	0,151	0,061	28,774
φ_{lP} [-]	0,277	0,030	10,830	0,247	0,005	1,984	0,252	0,025	9,025
φ_P [-]	0,182	0,020	10,989	0,162	0,008	4,706	0,170	0,012	6,593
Okraj trhliny	DMP1	Rozdíl $\Delta(1-2)$	Rozdíl % $\Delta(1-2)\%$	DMP2	Rozdíl $\Delta(2-3)$	Rozdíl % $\Delta(2-3)\%$	DMP3	Rozdíl $\Delta(1-3)$	Rozdíl % $\Delta(1-3)\%$
φ_{lmax} [-]	0,311	0,035	11,254	0,276	0,025	9,058	0,251	0,060	19,293
φ_{lmin} [-]	0,146	0,039	26,712	0,107	0,020	15,748	0,127	0,019	13,014
φ_{lP} [-]	0,220	0,034	15,455	0,186	0,009	4,615	0,195	0,025	11,364
φ_P [-]	0,142	0,020	14,085	0,122	0,009	6,870	0,131	0,011	7,746

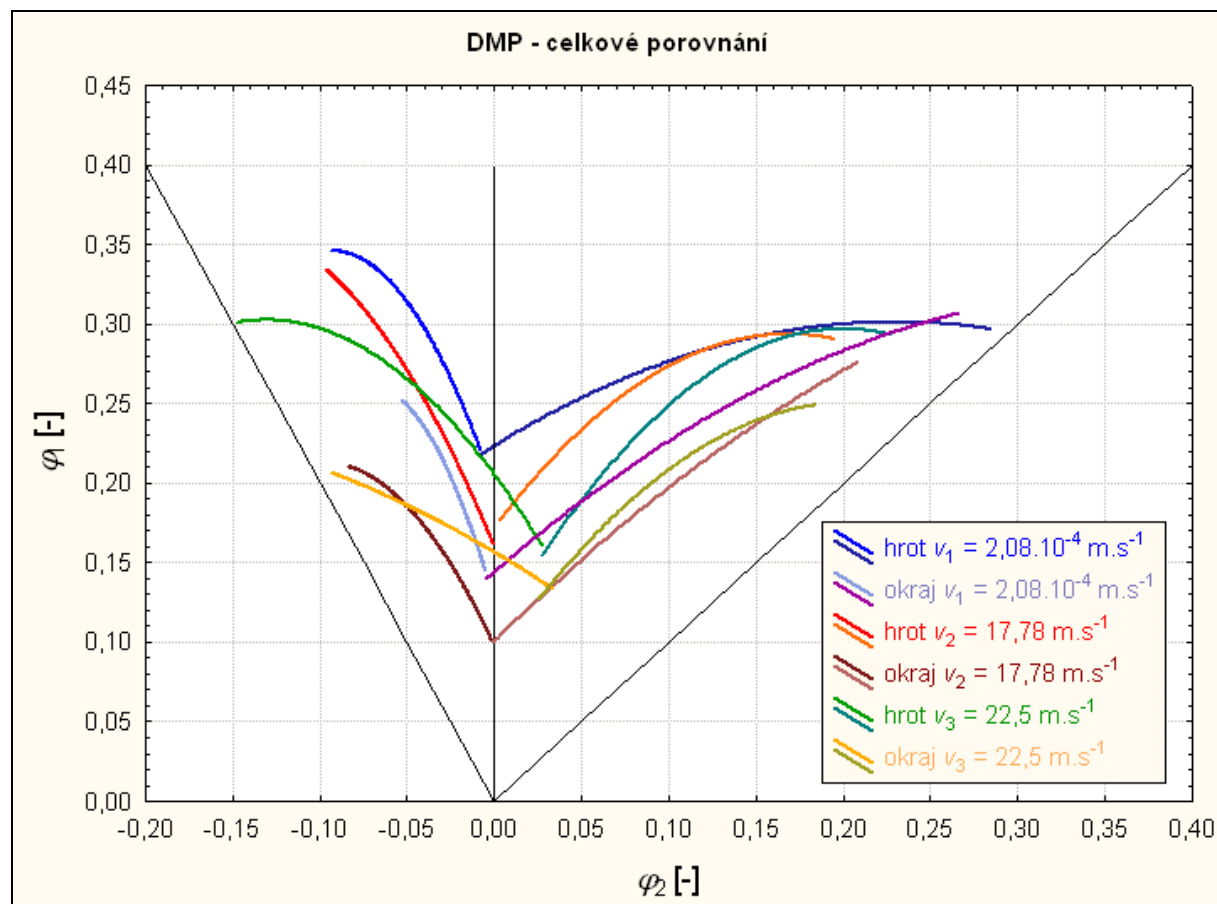
Pokud blíže pohlédneme na zjištěné statistické hodnoty zjistíme, že vlivem rostoucí zátěžné rychlosti došlo v obou souborech deformací vybraných elementů (hrot a okraj trhliny) ke značným změnám dosažených hodnot, zejména mezi dvěma prvními diagramy DMP1 a DMP2, kde pokles některých veličin (φ_{lmin}) činí téměř 27 %. Rozdíly v hodnotách druhého a třetího diagramu nejsou tak výrazné, což naznačuje, že daný materiál již na nárůst rychlosti nereaguje dalším poklesem hodnot hlavních deformací, a tím nedochází k dalšímu posunu křivek mezních přetvoření. Poslední dva sloupce poté představují celkové rozdíly hodnot mezi DMP1 a DMP3. Provedeno bylo také výsledné porovnání příslušných křivek KMP v diagramu mezních přetvoření (Tab. 7), vyjadřující rozdíl deformací zjištěných z elementů na hrotu a okraji trhliny. Jsou zde zpracovány hodnoty z tabulky Tab. 4.

Tab. 7: Statistické porovnání KMP na hrotu a okraji trhliny

Hrot - Okraj	$\Delta\varphi_{lP}$ [-]	$\Delta\varphi_{lP\%}$ [%]	$\Delta\varphi_P$ [-]	$\Delta\varphi_{P\%}$ [%]	φ_{lK} [-]
DMP1	0,057	20,438	0,040	22,081	0,206
DMP2	0,061	24,573	0,040	24,739	0,115
DMP3	0,057	22,586	0,039	22,825	0,063

Průměrný pokles deformace $\Delta\varphi_{lP}$ mezi hrotem a okrajem je ve všech třech měřených DMP téměř totožný, zatímco tato hodnota vyjádřená v procentech $\Delta\varphi_{lP\%}$ vykazuje větší výkyvy. Hodnoty průměrného poklesu intenzity deformace $\Delta\varphi_P$ jsou opět ve všech třech diagramech shodné, u procentuálního vyjádření $\Delta\varphi_{P\%}$ je viditelný větší rozptyl hodnot. Při vzájemném porovnání průměrných hodnot deformací a intenzit deformací je také vidět jejich velikostní podobnost, a to zejména u poklesů vyjádřených v procentech. Poslední zobrazenou veličinou je mezní přetvoření φ_{lK} , jehož hodnota s rostoucí rychlostí zkoušky výrazně klesá. Při nárůstu rychlosti z $v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$ na $v_2 = 17,78 \text{ m.s}^{-1}$ (tedy téměř o $17,78 \text{ m.s}^{-1}$) došlo k poklesu φ_{lK} o hodnotu 0,091. Rozdílu rychlostí $v_2 = 17,78 \text{ m.s}^{-1}$ a $v_3 = 22,5 \text{ m.s}^{-1}$ (nárůst rychlosti o $4,72 \text{ m.s}^{-1}$) potom odpovídá pokles mezní deformace o hodnotu 0,052. Pro názornější porovnání vlivu rychlosti zatěžování na tvar KMP v jednotlivých DMP byl vytvořen souhrnný graf (oprotěný od bodových řad, konfidenčních a tolerančních intervalů) slučující regresní křivky všech tří diagramů. Barevné značení jednotlivých křivek odpovídá

kapitole 4.3.5. Výsledný graf znázorněný na obrázku Obr. 21 tedy obsahuje všechny experimentálně zjištěné regresní křivky za všech testovaných rychlostních podmínek.



Obr. 21: Celkové porovnání všech regresních křivek

Posledními částmi experimentu jsou výzkumy rozložení deformace v okolí trhliny a modelové výpočty závislosti zátěžných sil na průhybu kruhové desky (rondelu). První jmenovaný výzkum prokázal, že velmi záleží (zejména u materiálu Docol 1200M) na správné volbě vhodných elementů sítě v okolí trhliny, což se poté velmi odrazí na dosažených výsledných deformacích. Výsledkem druhé části jsou dva grafy Obr. 19 a Obr. 20 (oba sestaveny pro plech tloušťky 2 mm, poloměr desky 60 mm a mechanické hodnoty materiálu Docol 1200M). První představuje závislosti sil na průhybu (pro malé a velké deformace) vypočtené dle teorie tenkých desek a druhý tyto křivky doplňuje o průběh vypočtený dle teorie membrán. Oba grafy též obsahují experimentálně zjištěnou závislost hledaných veličin (síly a průhybu). Jelikož pro hraniční hodnotu průhybu (mezi výpočtem dle teorie tenkých desek a membrán) $w = 5$ mm byla experimentem zjištěna zátěžná síla o velikosti $F = 16650,90$ N, která se nejvíce blíží síle získané výpočtem dle teorie tenkých desek a malých průhybů $F = 12930,11$ N (síla pro desky a velké průhyby $F = 33770,16$ N a síla pro membrány $F = 43402,78$ N), lze říci, že náš případ (použitý materiál, technologické podmínky) nejlépe matematicky popisuje právě tato desková teorie. V posledním kroku bylo také spočteno membránové ($\sigma'_{r,t} = 1497,22$ MPa) a ohybové napětí ($\sigma''_{r,t} = 864,31$ MPa) na obvodu desky. Po sečtení obou těchto hodnot bylo získáno výsledné napětí na obvodu desky ($\sigma_{r,t} = 2361,53$ MPa). Porovnáním zátěžné síly, zjištěné experimentem $F = 16650,90$ N (pro $w = 5$ mm), a vypočteného napětí na obvodu desky s mechanickými hodnotami vzorku ($F_{p0,2} = 26618,90$ N, $F_m = 31040,00$ N, $R_{p0,2} = 1048,81$ MPa, $\sigma_m = 1269,60$ MPa), zjistíme, že velikost síly nepřekročila příslušnou sílu na mezi kluzu ani sílu na mezi pevnosti zatímco

hodnotu napětí ano. I přes tyto nepříznivé okolnosti nedošlo k porušení vzorku, a tak lze říci, že by za obdobných zátěžných podmínek (použitá síla, pružné deformace a rychlost zatěžování) mohl obstát i výtah karosářského typu, zhotovený z testovaného materiálu.

Vzhledem ke všem zjištěným poznatkům uvedeným v experimentální části této disertační práce je možné konstatovat, že u materiálu Docol 1200M má zkušební rychlost (rychlost nárazu na překážku) velký vliv na jeho výsledné hodnoty, zejména mechanické. Materiál si s rostoucí rychlostí udržuje vysoké hodnoty napětí, avšak tažnosti a hlavní deformace v diagramech mezních přetvoření značně klesají. Vzhledem k těmto poznatkům by měl být materiál užit pro nepřliš členité výrobky, které při svém zhotovení zcela nevyčerpají jeho schopnost deformace bez porušení. Při větších deformacích či vyšší členitosti součásti by bylo vhodné netvářet materiál zastudena, ale použít poloohřev či tváření zatepla.

6. ZÁVĚR

Vznik disertační práce, nazvané „Vliv rychlosti přetvoření na mezní deformace pevnostních plechů“, byl mimo jiné iniciován potřebami automobilového průmyslu dostatečně poznat chování zvoleného pevnostního materiálu v podmínkách napodobujících svými rychlostními parametry nákladné bariérové zkoušky (CRASH testy). V technické praxi jsou pro zjištění základních mechanických hodnot běžně prováděny statické zkoušky tahem, které samozřejmě svými rychlostními parametry naprosto neodpovídají reálným podmínkám při nárazu vozidla na překážku. Stejně tak případné diagramy mezních přetvoření, zjištěné pouhým vypínáním vzorků na hydraulickém lisu, neodráží reálnou situaci. Jediným východiskem (před provedením vlastního CRASH testu) v těchto případech bývá počítačová simulace, která ovšem vyžaduje řadu vstupních hodnot odpovídajících svými parametry simulovanému ději. Problémy při testování karosérií mohou zejména nastat při užití některých pevnostních materiálů, které sice vykazují vysoké hodnoty napětí, ale jejich schopnost deformace za studena je omezená. To je případ i testovaného materiálu Docol 1200M. Proto bylo velmi důležité určit přesné hodnoty hledaných mechanických veličin a simulačních konstant za různých rychlostních podmínek, co možná nejvěrněji odrážejících reálné děje.

Celá práce byla z výše uvedených důvodů zaměřena jak v teoretické, tak i experimentální části, na komplexní charakteristiku problematiky pevnostních plechů s bližším zaměřením na zvolený materiál. V teoretické části se disertační práce zabývá stručným přehledem problematiky karosářských plechů používaných v dnešní době v automobilovém průmyslu. Zejména hlavními vlivy působícími na proces tažení a metodami zkoumajícími vhodnost materiálů pro daný výrobek. Cílem experimentální části disertační práce bylo zhodnotit vlastnosti a chování vysokopevnostního materiálu Docol 1200M za různých rychlostních podmínek. Zkoumány byly dvě tloušťky tohoto materiálu, a to plechy 2 mm a 0,7 mm. Vlastní výzkum byl rozdělen do několika částí.

V první etapě bylo provedeno ověření základních mechanických hodnot zkoušeného materiálu tahovými zkouškami, a to statickou zkouškou tahem ($v = 10 \text{ mm/min}$) a dvěma rychlostními zkouškami ($v = 600 \text{ mm/min}$ a $v = 24000 \text{ mm/min}$). Součástí tohoto měření bylo také vyhodnocení změn vnitřní struktury materiálu v závislosti na zátěžných rychlostech.

Druhá část měření spočívala ve zjištění mezní deformace tohoto materiálu při různých stavech napjatosti a testovacích rychlostech. Proběhlo měření pomalou zátěžnou rychlostí ($v_1 = 2,08 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$), provedené na hydraulickém lisu CBA300/63 a testování dvěma extrémními rychlostmi ($v_2 = 17,78 \text{ m.s}^{-1}$ a $v_3 = 22,5 \text{ m.s}^{-1}$), realizované na pneumatickém dělu. Zatěžování sad různě širokých vzorků opatřených deformační sítí bylo provedeno do okamžiku vzniku trhliny, konečná grafická vizualizace zjištěných hodnot deformací byla realizována pomocí diagramů mezních přetvoření.

Třetí, a také poslední část, tvořily dva experimenty. Pomocí optického systému ARGUS bylo na vybraném rondelu, zhotoveném z materiálu Docol 1200M $t = 2 \text{ mm}$,



změřeno rozložení deformace v okolí trhliny, které prokázalo silnou koncentraci deformace na vrcholu zkušebního vzorku. Tento test potvrdil rozdílnost křivek mezních přetvoření experimentálně zjištěných, za stejných rychlostních podmínek, z deformací elementů na hrotu a okraji trhliny. Nakonec bylo provedeno měření závislosti průhybu kruhové desky na zátížení. Tato data byla následně porovnána s vypočtenými hodnotami dle teorie tenkých desek a membrán. Bylo zjištěno, že naše podmínky (způsob zatěžování, rozměry polotovaru a vlastnosti materiálu) nejlépe popisuje metoda výpočtu dle teorie tenkých desek a malých průhybů, která tak může být použita (při zachování technologických podmínek a platnosti dané teorie) pro přibližné výpočty karosářských výlisků.

Výsledné hodnoty zkoušeného materiálu uveřejněné v této práci zlepší bezpečnost pasažérů díky zpřesnění vstupních dat určených pro navrhování výztužných dílů automobilů a simulačních programů bariérových testů (software PAM CRASH), potýkajících se s nepřesnostmi způsobenými nezahrnutím reálného procesu zpracování materiálů do výpočtu.

Disertační práce vznikla za podpory výzkumného záměru MŠMT ČR - MSM 4674788501 a GAČR 101/07/P113.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [39] BLAŠČÍK, F., - POLÁK, K.: Teória tvárnenia, ALFA Bratislava a SNTL Praha, 1985, str.144-350.
- [40] BOČEK, J.: Vliv rychlosti deformace na velikost mezního přetvoření, Diplomová práce, TUL, Liberec, 2005, 62 stran.
- [41] BUCHAR, Z.: Diagramy mezních přetvoření tenkých hlubokotažných plechů, Kandidátská disertační práce, TUL, Liberec, 1987, str. 16-120.
- [42] BUCHAR, Z.: Komplexní analýza přetvoření výlisků nepravidelných tvarů, Habilitační práce, TUL, Liberec 1996, str. 19-38.
- [43] DOUBEK, P.: Výzkum deformačního chování vysokopevnostních plechů při vyšších rychlostech deformace, Disertační práce, TUL, Liberec, 2004, 166 stran.
- [44] JANATKA, J.: Pružnost a pevnost II, ČVUT a SNTL, Praha, 1957, str.143-166.
- [45] JAREŠ, V.: Základní zkoušky kovů a jejich teorie, Academia, Praha, 1966, str. 86-91.
- [46] KOLNEROVÁ, M.: Vliv technologických podmínek na vznik zadírání pozinkovaných plechů při tažení, Disertační práce, TUL, Liberec, 2005, str. 104-109.
- [47] KOVÁRNÍK, L.-DOUBEK, P.-SOLFRONK, P.-KOLNEROVÁ, M.: Moderní digitální technika při analýze deformace plechových výlisků, Mezinárodní vědecká konference Forming 2004, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Štrbské Pleso, 2004, str. 241-246, ISBN 80-227-2091-7.
- [48] KRÍŽ, V.-VÁVRA, P.: Strojírenská příručka, svazek 3, J – Materiál a jeho zkoušení, SCIENTIA, spol. s r.o., Praha, 1993, str 145-191, ISBN 80-85827-23-9.
- [49] MACHEK, V.: Tenké ocelové pásy a plechy válcované zastudena, SNTL, Praha, 1987, str. 169-173.
- [50] MICHALEC, J.: Pružnost a pevnost II, ČVUT, Praha, 1994, str. 89-102, ISBN 80-01-01087-2.
- [51] SCHNEIEDER, Z.: Vypracování metodiky zkoušení vrubové houževnatosti u plechů, Bakalářská práce, TUL, Liberec, 2007, str. 34-36.
- [52] STOROŽEV, M., V. - POPOV, J., A.: Teória tvárnenia kovov, ALFA Bratislava a SNTL Praha, 1978, str. 65-202.
- [53] ŠUBRT, L.: Teorie desek a skořepin, ČVUT, Praha, str. 4-42, 1991, ISBN 80-01-00603-4.
- [54] TMĚJ, J.: Tváření kovů (Vybrané statě z teorie), VŠST, Liberec, 1977, str. 80-98.
- [55] Zkouška tahem pro kovové materiály, Norma, 2004, ČSN EN 10002-1.
- [56] Ploché výrobky válcované za studena z hlubokotažných ocelí k tváření za studena - Technické dodací podmínky, Stanovení součinitele normálové anizotropie a exponentu deformačního zpevnění, Norma, 2004, ČSN EN 10130+A1.
- [57] Aktualizace názvů a označování mechanických parametrů, Statická zkouška tahem, Norma, 2007, ČSN EN 10002-1.
- [58] Aktualizace názvů a označování mechanických parametrů, Rázové zkoušky v ohybu, Norma, 2007, ČSN EN 10045-1.
- [59] Gom: Optical Measuring Techniques ARGUS, [06.12.2006]
<<http://www.gom.com/EN/measuring.systems/argus/system/system.html>>
- [60] Mcae Systems: ARGUS, [06.12.2006]
<<http://www.mcae.cz/katalog.php?lang=cs&id=146>>
- [61] MM Průmyslové spektrum: Hydromechanické tváření, [08.01.2008]
<<http://www.mmspektrum.com/clanek/hydromechanicke-tvareni-vnejsim-vodnim-pretlakem>>
- [62] MM Průmyslové spektrum: Sendvičové konstrukce, [08.01.2008]
<<http://www.mmspektrum.com/clanek/sendvicove-konstrukce>>

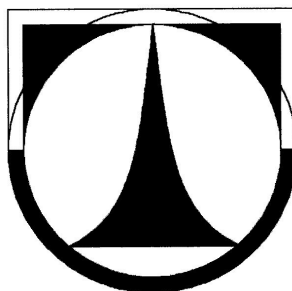
-
- [63] MM Průmyslové spektrum: Tailored blanks, [08.01.2008]
<<http://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-tailored-blanks>>
- [64] MM Průmyslové spektrum: Tváření plechů, [08.01.2008]
<<http://www.mmspektrum.com/clanek/o-modernim-tvareni-plechu-poprve>>
- [65] Msol: ARGUS, [06.12.2006]
<<http://www.msol.co.jp/mda/gom/argus/argus.html>>
- [66] Petrol CZ: ULSAC [10.01.2008]
<<http://www.petrol.cz/noviny/clanek.asp?id=2032>>
- [67] Simcar: Samonosná karosérie, [04.01.2008]
<<http://www.simcar.cz/slovník/samonosna-karoserie.html>>
- [68] SSAB: Docol, [29.11.2007]
<http://www.ssabdirect.com/templates/ArticlePage____6248.aspx>
- [69] Thyssen Krupp: Tailored Blanks, [29.11.2007]
<<http://www.thyssenkrupptailoredblanks.it/default.asp?page=7&titolo=1&lingua=inglese>>
- [70] Thyssen Krupp: Martensitic-phase steel, [29.11.2007]
<<http://www.thyssenkrupp-steel.com/auto/en/publikationen/index.jsp?catcode=tkscsauto.pub.produktinformationen>>
- [71] TMS: Metallic Foams, [08.01.2008]
<<http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0012/Banhart-0012.html>>
- [72] Wikipedia: Samonosná karosérie, [04.01.2008]
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Samonosn%C3%A1_karoserie>
- [73] World Auto Steel: ULSAB, [08.01.2008]
<<http://www.ulsab.org>>
- [74] World Auto Steel: ULSAB-AVC, [08.01.2008]
<<http://www.ulsab.org>>
- [75] World Auto Steel: ULSAC, [08.01.2008]
<<http://www.ulsab.org>>
- [76] World Auto Steel: ULSAS, [08.01.2008]
<<http://www.ulsab.org>>

PUBLIKAČNÍ ČINNOST K TÉMATU PRÁCE

13. BOČEK J.: Vliv rychlosti deformace na velikost mezního přetvoření, Diplomová práce, TUL, Květen 2005, Liberec, 62 stran.
14. BOČEK J., DOUBEK P., KOLNEROVÁ M., KOVÁRNÍK L.: Vliv rychlosti deformace na velikost mezního přetvoření. Strojírenská technologie, časopis pro vědu, výzkum a výrobu, Zvláštní číslo, Prosinec 2005, Ústí nad Labem, str. 17-20, ISSN 1211-4162.
15. BOČEK J., DOUBEK P., KOLNEROVÁ M., KOVÁRNÍK L.: Vliv rychlosti deformace na velikost mezního přetvoření. Nové poznatky v technologiích a technologické informace '05, Leden 2006, Ústí nad Labem, str. 14-15 CD, ISBN 80-7044-743-5.
16. BOČEK J., DOUBEK P., KOLNEROVÁ M., KOVÁRNÍK L.: Vliv rychlosti deformace na diagramy mezních přetvoření. Mezinárodní konference PRO-TECH-MA, Červen 2006, Košice, str. 43-48, MSM 4674788501, ISSN 1335-2393.
17. BOČEK J., DOUBEK P., KOLNEROVÁ M., KOVÁRNÍK L.: Experimentální zjištění diagramů mezních přetvoření při vyšších rychlostech deformace. Mezinárodní konference FORM 2006, Září 2006, Brno, str. 8 CD, MSM 4674788501, ISBN 80-214-3231-4.
18. BOČEK J.: Processes of findings by limit deformation. Mezinárodní baťova doktorandská konference, Duben 2007, Zlín, str. 251 CD, MSM 4674788501, ISBN 978-80-7318-529-9.
19. BOČEK J.: Modern processes of determination by limit deformation. 1. medzinárodná konferencia mladých výskumníkov a doktorandov ERIN 2007, Duben 2007, Bratislava, str. 118 CD, MSM 4674788501, ISBN 978-80-227-2636-8.
20. BOČEK J., DOUBEK P., KOLNEROVÁ M., KOVÁRNÍK L.: Experimental determination of limiting transformation with higher strain rate. 16. mezinárodní konference metalurgie a materiálů METAL 2007, Květen 2007, Hradec nad Moravicí, str. 53 CD, MSM 4674788501, ISBN 978-80-86840-33-8.
21. BOČEK, J.: Experimental tests of bodywork sheets. 10. MEDZINÁRODNÁ KONFERENCIA TECHNOLOGIA 2007, Září 2007, Bratislava, str. 69 CD, MSM 4674788501, ISBN 978-80-227-2712-9.
22. BOČEK, J.: Modern experimental testing methods of bodywork sheets. Strojírenská technologie, časopis pro vědu, výzkum a výrobu, Zvláštní číslo, Prosinec 2007, Ústí nad Labem, MSM 4674788501, ISSN 1211-4162.
23. BOČEK, J.: Modern experimental testing methods of bodywork sheets. Nové poznatky v technologiích a technologické informace 2008, Leden 2008, Ústí nad Labem, MSM 4674788501, ISBN 978-80-7044-969-1.
24. BOČEK, J.: Vliv rychlosti deformace na diagram mezních přetvoření hlubokotažného materiálu. Posterová výstava MSV, Září 2008, Brno, MSM 4674788501, Poster.

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů



VLIV RYCHLOSTI PŘETVOŘENÍ NA MEZNÍ DEFORMACE
PEVNOSTNÍCH PLECHŮ

Autoreferát disertační práce

Liberec 2009

Ing. Jan Boček

Název	Vliv rychlosti přetvoření na mezní deformace pevnostních plechů
Autor	Ing. Jan Boček
Vydavatel	Technická univerzita v Liberci
Schváleno	Rektorátem TU v Liberci dne 20.1. 2009
Místo, rok, vydání	Liberec, 2009, 1. vydání
Počet stran	36
Náklad	30ks
Tisk	Katedra KSP, FS TUL
čj.	RE 5/09
číslo publikace	55-005-09

Tato publikace neprošla redakční ani jazykovou úpravou.

ISBN 978-80-7372-442-9