TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie Oddělení tváření kovů a plastů



Bc. Jakub Mareš

Návrh přípravku pro dynamické zkoušky na padostroji Instron Ceast

Diplomová práce

Liberec 2014

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI Fakulta strojní

Studijní program N 2301 – Strojní inženýrství

Strojírenská technologie

zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a platů

Návrh přípravku pro dynamické zkoušky na padostroji Instron Ceast

Design a jig for a dynamic testing on a droptower Instorn Ceast

Bc. Jakub Mareš KSP-TP

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D. - TU v Liberci

Konzultant diplomové práce:

Ing. Jiří Sobotka, Ph.D. – TU v Liberci

Rozsah práce a příloh:

Počet stran:69Počet příloh:4Počet obrázků:46Počet tabulek:10Počet jiných příloh:1 CD

V Liberci, 3. ledna 2014

ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA VLIBERCI Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program:	N 2301 Strojní inženýrství

Student: Bc. Jakub Mareš

Téma: Návrh přípravku pro dynamické zkoušky na padostroji Instron Ceast

Design a jig for dynamic testing on a droptower Instron Ceast

Číslo DP:	KSP-TP
Vedoucí DP:	doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D. – TU v Liberci
Konzultant:	Ing. Jiří Sobotka, Ph.D. – TU v Liberci

Abstrakt:

Diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem přípravku pro dynamickou zkoušku tahem na padostroji Instorn CEAST 9350 a jeho odzkoušením, které prověří správnost konstrukčního a funkčního řešení.

Klíčová slova:

Dynamická zkouška tahem, padostroj, přípravek, optické měřící systémy

Abstract:

This thesis deals with constructing and testing a jig for a dynamic tensile test on a droptower Instron CEAST 9350 and its testing, which improves construction and function correctness of the solution.

Key words: Dynamic tensile test, droptower, jig, optical measurement systems

Místopřísežné prohlášení:

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

V Liberci, 3. ledna 2014

Bc. Jakub Mareš

Jablonec nad Nisou

Poděkování

Zejména bych rád poděkoval pánům doc. Ing. Pavlu Solfronkovi, Ph.D. a Ing. Jiřímu Sobotkovi, Ph.D. za jejich cenné rady a zkušenosti, kterými přispěli při zpracování této diplomové práce.

Dále chci poděkovat rodičům a přítelkyni za podporu, kterou mi poskytovali po celou dobu mého studia.

Obsah

Ρ	řeh	led	pou	ižitých zkratek a symbolů	9
1	l	Úvo	d	1	12
2		Тео	retic	cká část 1	13
	2.1	1	Mat	eriály používané na stavbu karoserie1	13
		2.1.	1	Hlubokotažné materiály1	13
		2.1.	2	Vysokopevnostní materiály 1	15
		2.1.	3	Slitiny neželezných kovů	20
	2.2	2	Рор	is chování materiálu při vysoké deformační rychlosti	21
		2.2.	1	Empirický Johnsonův – Cookův materiálový model 2	22
		2.2.	2	Zerilliův – Armstrongův semi – empirický model [9] 2	22
	2.3	3	Mec	chanické zkoušky materiálů2	23
		2.3.	1	Statické zkoušky	24
		2.3.	2	Dynamické zkoušky 2	<u>29</u>
	2.4	4	Foto	ogrammetrie	34
		2.4.	1	Optický skener ATOS	35
		2.4.	2	Optický skener TRITOP	36
		2.4.	3	Optický měřící systém ARGUS	37
		2.4.	4	Optický měřící systém PONTOS	38
		2.4.	5	Optický měřící systém ARAMIS	39
3	l	Ехр	erin	nentální část 4	11
	3.1	1	Prin	cip padostroje	41
	ļ	3.1.	1	Padostroj Instron CEAST 9350	12
	3.2	2	Měř	řený materiál 4	13
		3.2.	1	Získání vzorků	13
	3.3	3	Stat	tická zkouška tahem při různých rychlostech zatěžování 4	45
	3.4	1	Sch	éma přípravku	19
	3.5	5	Náv	rh přípravku v softwaru Autodesk Inventor 20115	51
		3.5.	1	Varianta číslo 1	51
		3.5.	2	Varianta číslo 2	52
		3.5.	3	Varianta číslo 3	53
	3.6	5	Kon	trola zvolené varianty metodou konečných prvků5	55
	3.7	7	Fun	kční princip přípravku	55
	3.8	3	Mor	ntáž přípravku	56
	3.9	9	Výn	něna zkušebního vzorku5	57

3.10) Odz	zkoušení přípravku	58
3.	10.1	Odzkoušení funkčnosti přípravku	58
3.	10.2	Vyhodnocení naměřených dat	59
3.	10.3	Měření při rychlosti zatížení $v_1 = 2,53 \text{ m/s}$	61
3.	10.4	Měření při rychlosti zatížení $v_2 = 2,89 \text{ m/s}$	62
3.	10.5	Měření při rychlosti zatížení $v_3 = 3,21 \text{ m/s}$	63
3.11	1 Disl	kuze výsledků	64
4 Za	ávěr		66
5 P	oužitá lit	teratura	67
6 S	eznam p	příloh	69

Přehled použitých zkratek a symbolů

AHSS	•••	advanced high strength steels	
$A_{80\rm mm}$		tažnost (počáteční měřená délka 80 mm)	[%]
$A_{\rm x}$		tažnost, kde x značí počáteční vzdálenost rysek na vzorku	[%]
B, B_0		materiálové konstanty	[-]
BCC		bace centred cubic	
BH		bake hardening	
С		modul monotónního zpevnění	[MPa]
CCD		charge – coupled device	
СР		komplex phase	
D		průměr kuličky	[mm]
d		průměr vtisku kuličky	[mm]
DP		dual phase	
$E_{\rm k}$		kinetická energie	[J]
$E_{\rm p}$		potenciální energie	[J]
F		síla	[N]
F_{MAX}		maximální zatěžující síla	[N]
FCC		face centered cubic	
FLC		forming limit curve	
G		tíha	[N]
g		gravitační zrychlení	[m.s ⁻²]
HBW		tvrdost podle Brinella, indentor kulička z tvrdokovu	[-]
HBS		tvrdost podle Brinella, indentor ocelová kulička	[-]
HCP		hexagonal close packed	
HRA		tvrdost podle Rockwella, indentor diamantový kužel	[-]
HRB		tvrdost podle Rockwella, indentor ocelová kulička	[-]
HRC		tvrdost podle Rockwella, indentor jehlan	[-]
HS-IF		high strength interstitial free	
HSLA		high strength low alloy	
HV		tvrdost podle Vickerse	[-]
h		výška	[m]
h_1		počáteční poloha kladiva	[m]
h_2		konečná poloha kladiva	[m]

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI Katedra strojírenské technologie

IF	 interstitial free	
K	 konstanta závislá na typu mřížky	[-]
K_1	 spotřebovaná nárazová práce	[J]
KC	 vrubová houževnatost	$[J.cm^{-2}]$
KUT	 komplexní ukazatel tvářitelnosti	[%]
$k_{ m h}$	 mikrostrukturní intenzita napětí	
L_0	 počáteční délka vzorku	[mm]
Lu	 konečná délka vzorku	[mm]
l	 průměrná velikost zrna	[µm]
$M_{o}^{\ max}$	 maximální ohybový moment	[N.m]
MS	 martensitic steel	
т	 hmotnost	[kg]
n	 exponent deformačního zpevnění	[-]
R	 smluvní napětí	[MPa]
$R_{p0,2}$	 nevýrazná mez kluzu	[MPa]
Re	 mez kluzu	[MPa]
<i>R</i> _m	 smluvní mez pevnosti	[MPa]
$R_{\rm m0}$	 smluvní mez pevnosti v ohybu	[MPa]
r _s	 koeficient normálové anizotropie (střední hodnota)	[-]
S_0	 počáteční průřez vzorku	$[mm^2]$
Su	 konečný průřez vzorku	$[mm^2]$
Т	 teplota okolí	[K]
T_0	 referenční teplota	[K]
$T_{\rm m}$	 teplota tání	[K]
T^{*}	 homologická teplota	[K]
TPCA	 Toyota Peugeot Citroën Automobile	
TRIP	 transformation induced plasticity	
TWIP	 twinning induced plasticity	
UH	 ukazatel hlubokotažnosti	[-]
UHSS	 ultra high strength steel	
и	 střední délka úhlopříčky	[mm]
v	 rychlost	$[m.s^{-1}]$
W_{0}	 modul průřezu	[mm ³]

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI Katedra strojírenské technologie

Diplomova prac	е
----------------	---

Ζ	 kontrakce	[%]
ZP	 zásoba plasticity	[MPa]
α, α ₀	 materiálové konstanty závislé na typu mřížky	[-]
β, β_0	 materiálové konstanty závislé na typu mřížky	[-]
ΔL	 prodloužení vzorku	[mm]
ε	 poměrné prodloužení	[-]
\mathcal{E}_{I}	 amplituda přímého pulz	[-]
\mathcal{E}_R	 amplituda odraženého pulzu	[-]
\mathcal{E}_T	 amplituda pulz, který prošel vzorkem	[-]
Еp	 ekvivalentní plastická deformace	[-]
$\dot{arepsilon}_{ m p}$	 rychlost plastické deformace	[s ⁻¹]
$\dot{\varepsilon}_{\mathrm{p0}}$	 referenční rychlost plastické deformace	[s ⁻¹]
$\dot{arepsilon}_{ m p}^{*}$	 poměrná rychlost plastické deformace	[s ⁻¹]
σ	 skutečné napětí	[MPa]
σ_{a}	 teplotně neovlivněná složka meze kluzu	[MPa]
$\sigma_{ m g}$	 přírůstek vlivem rozpuštěných látek a počáteční hustoty	
	dislokací	[MPa]
\dot{arphi}	 deformační rychlost	[s ⁻¹]
φ	 skutečná logaritmická deformace	[-]
$arphi_0$	 velikost podsunutí křivky zpevnění po ose x, tak aby bylo	
	dosaženo meze kluzu při $\varphi = 0$	[-]

11

1 Úvod

Automobilový průmysl patří v České republice mezi nejvýznamnější průmyslová odvětví a má dlouholetou tradici. První sériový automobil v Čechách, NW Präsident byl vyroben již v roce 1897 a až do současné doby zde působilo velké množství výrobců (Škoda, Tatra, Liaz, Praga a další). Z tradičních výrobců zůstala do dnešní doby pouze Škoda Auto, ale působí zde i zahraniční výrobci (TPCA, Hyudai) a velké množství firem, které jsou nepostradatelnými subdodavateli pro automobilky po celém světě.

Za dobu své existence prošel automobil velmi významnou evolucí a jedním z velmi sledovaných parametrů moderního vozu je jeho bezpečnost, která se ověřuje dynamickými zkouškami - nárazovými testy (tzv. cash testy). Na tu mají vliv nejenom prvky aktivní bezpečnosti (bezpečnostní pásy, airbagy a různé pomocné elektronické systémy), ale hlavně konstrukce karoserie a materiály na ní použité.

Nejběžnější materiálovou zkouškou je statická zkouška tahem, z níž lze získat např. hodnotu meze kluzu, meze pevnosti, tažnost, ale výsledky této zkoušky nám příliš mnoho neřeknou o tom, jak se materiál bude chovat při dynamickém zatížení. Z toho důvodu roste význam materiálových zkoušek dynamických.

Teoretická část se zabývá materiály používanými pro stavbu karosérie automobilů, přehledem některých statických a dynamických materiálových zkoušek a fotogrammetrií, konkrétně optickými systémy od firmy GOM GmbH.

V experimentální části práce je popsán konstrukční návrh přípravku pro dynamickou zkoušku tahem, popis jeho funkce a jednotlivých komponentů, z nichž se přípravek skládá.

Cílem diplomové práce je konstrukce přípravku pro dynamickou zkoušku na padostroji Instron CEAST 9350, jeho montáž na padostroj a odzkoušení funkčnosti na sérii zkušebních vzorků a ověření, zda je pro měření možné využít optický měřící systém ARAMIS.

2 Teoretická část

2.1 Materiály používané na stavbu karoserie

S rozvojem automobilového průmyslu začaly být kladeny čím dál větší nároky na materiály, které se užívají na stavbu karosérie. Na jedné straně jsou potřeba výborné tvárné vlastnosti, aby bylo možné vyrábět složité karosářské výlisky, na straně druhé je potřeba, aby se oblast okolo posádky deformovala při nárazu co nejméně. Dalším důležitým parametrem je svařitelnost plechů a snadnost nanášení protikorozních povlaků a barev. Z toho důvodu se dnes na různé prvky karoserie používají speciální slitiny vyvinuté pro tváření, přičemž trendem je růst podílu materiálů s vyšší pevností.

2.1.1 Hlubokotažné materiály

Hlubokotažné plechy z oceli uklidněné hliníkem – tyto oceli obsahují velmi malé množství uhlíku, mají feritickou strukturu, a doprovodných prvků. Díky nízkému obsahu uhlíku jsou velmi dobře svařitelné, vhodné především pro hluboké tažení za studena a používají se pro pohledové díly karoserie. Lepších mechanických vlastností lze dosáhnout mikrolegováním titanem, vanadem, borem, zirkonem, niobem. [1]

Uklidněním oceli hliníkem se zamezuje stárnutí, avšak hlubokotažné materiály se většinou žárově zinkují, čímž je materiál vystaven teplotním cyklům. Hliník není schopen na sebe navázat veškerý uhlík, a vlivem žárového zinkování dochází ke stárnutí oceli. Hlubokotažné plechy uklidněné hliníkem se rozdělují do skupin podle chemického složení, mechanických vlastností a způsobu zpracování. [2]

CQ	 plechy běžné kvality (Commercial Quality)
DQ	- tažené plechy (Drawing Quality)
DDQ	- hlubokotažné plechy (Deep Drawing Quality)
EDDQ	- zvlášť hlubokotažné plechy (Extra Deep Drawing Quality)
EDDQ-S	- super hlubokotažné (Extra Deep Drawing Quality - Super)

IF oceli (Interstitial Free) – označované též jako ULC (Ultra Low Carbon), jsou nízkouhlíkové, nízkopevné oceli oceli bez intersticiálního zpevnění. Mají feritickou matrici. C a N jsou v tuhém roztoku vázány na precipitáty Ti nebo Ti-Nb. Dosahuje se tím nejen vyšší tažnosti, ale díky tomu výrobky nepodléhají stárnutí a to je předurčuje ke kontinuálnímu žárovému pozinkování. Protože mají extrémně malý počet intersticiálních poruch krystalické mřížky, tak se vyznačují nízkou pevností a vysokou tvářitelností. Ta je zapříčiněná vysokým koeficientem normálové anizotropie $r_s > 2$ a exponentem deformačního zpevnění n > 0,22. Mez kluzu je u IF ocelí v rozmezí od 140 do 190 MPa. Pro tváření výhodná nízká mez kluzu může být z hlediska výroby nevýhodou, protože po vyčerpání deformační schopnosti klade materiál nízký odpor proti porušení. [1]

Jak již bylo zmíněno, tyto oceli obsahují velmi malé množství C a N. Jsou legovány prvky Al, Ti nebo Nb, které na sebe vážou uhlík a dusík a vznikají tak karbidy a nitridy. To má za následek, že obsahují velmi malé množství volně rozpuštěného intersticiálního uhlíku a dusíku v tuhé fázi (max. 25 -30 atomů uhlíku v 1000000 atomů oceli). Pro dosáhnutí požadovaných mechanických vlastností je důležité vyvážené chemické složení. [1]

IF oceli se uplatňují jako za tepla i za studena válcované pásy bez povrchové úpravy. Též se užívají jako pozinkované pásy. Největší uplatnění mají v automobilovém průmyslu, kde se používají na tvarově složité součásti karoserie automobilů, např. blatníky, kryty dveří apod. [1]

BH oceli – jsou obdobou IF ocelí, avšak mají vyšší odolnost proti deformaci a porušení u hotového výlisku, jež je zajištěna tzv. BH efektem, který je patrný na obr. 2.1.1. BH efekt je jev, kdy dojde k difúzi volného uhlíku a dusíku do oblasti dislokací. Tyto dislokace vzniklé při plastické deformaci jsou uhlíkem a dusíkem obklopeny a dojde k nárůstu mechanických vlastností, konkrétně meze kluzu o 30 - 80 MPa. Toho je docíleno při vypalování laku (20 min při 170°C). Největší nevýhodou BH plechů je tvarová změna při změně mechanických vlastností. Používají se pro aplikace s malými deformacemi např. střechy, kapoty.



Obr. 2.1.1: BH efekt [3]

HS-IF oceli (High Strenght Interstitial Free) - nízkouhlíková, výše pevná ocel bez intersticiálního zpevnění. Tyto oceli obsahují velmi malé množství uhlíku. Mají nízkou mez kluzu a dochází u nich k vysokému deformačnímu zpevnění. U některých HS-IF ocelí se zjemňuje zrno pomocí precipitátů karbidů nebo nitridů, případně kombinací prvků pro pevné roztoky (např. fosforu), za účelem zvýšení pevnosti.



Obr. 2.1.2: Rozdělení ocelí podle metalurgie [4]

2.1.2 Vysokopevnostní materiály

Dříve byly na stavbu karoserie používány především nízkouhlíkové uklidněné oceli, jejíž největší výhodou je vysoká tvárnost. Vzhledem k narůstajícím

požadavkům na bezpečnost jsou vyvíjeny pevnostní materiály s pevností až 1500 MPa. Podíl využití těchto materiálů neustále roste, jak je patrné z obr. 2.1.3. Nejen že zvyšují bezpečnost vozu, ale umožňují také použít plechy s nižší tloušťkou, čímž klesá hmotnost automobilu a tím klesá i spotřeba paliva. Největší nevýhodou těchto materiálů je nižší zásoba plasticity, takže jsou vhodné pouze pro tvarově jednodušší součásti.



Obr. 2.1.3: Rostoucí podíl pevnostních materiálů na stavbu karosérie [5]

DP oceli – jsou tvořeny nízkouhlíkovou feritickou matricí (70 – 90 %), která zajišťuje dobré tvárné vlastnosti, v níž jsou rozptýleny martenzitické (netvárné) fáze (10 – 30 %), které zvyšují pevnost materiálu. Poměr těchto dvou fází je dán množstvím legujících prvků.

DP plechy se vyrábějí buď řízeným ochlazováním austenitu (válcované za tepla), nebo z dvoufázové feriticko-martenzitické struktury (válcované za studena). Vyznačují se nízkým poměrem R_e/R_m , kdy mez kluzu nedosahuje ani 70% meze pevnosti, což zaručuje dobrou tvářitelnost a vysokou rychlost deformačního zpevnění při tváření za studena již při malých stupních deformace (5%). Deformační zpevnění feritu při tváření společně s martenzitem umožňují získat velmi pevné součásti, které jsou zároveň velmi dobře svařitelné. Používají se především na boční výztuhy dveří, výztuhy nárazníku a disky kol. [2] Struktura DP oceli je na obr. 2.1.4.



Obr. 2.1.4: Struktura DP ocelil [3]

TRIP oceli – nazývané též jako oceli s transformačně indukovanou plasticitou. Mají nízkouhlíkovou feriticko-bainitickou matrici, v níž se nachází 6 – 10 % nestabilního austenitu, který se při deformaci přemění na martenzit. Díky vícefázové struktuře mají vysokou pevnost a současně i dobré plastické vlastnosti. Standardně dosahují meze kluzu 450 MPa, meze pevnosti 950 MPa a tažnosti 15 – 25%. Při tváření se nejprve deformuje ferit a austenit se vlivem deformace transformuje na martenzit. Po vyčerpání plasticity feritu a transformaci austenitu se muže ještě omezeně deformovat bainit. TRIP oceli se používají na deformační členy karosérie, tak aby pohlcovali energii rázu. Struktura TRIP oceli je na obr. 2.1.5.



Obr. 2.1.5: Struktura TRIP oceli [3]

CP oceli – mají feriticko - bainitickou (horní + dolní bainit) matrici, v níž je obsaženo malé množství perlitu, martenzitu a zbytkového austenitu. Chemické složení a speciální válcovací proces při výrobě plechů dávají CP ocelím extrémně jemnozrnnou strukturu. Ta je způsobena opožděnou rekrystalizací a precipitací mikrolegujících prvků jako je titan nebo kobalt a zaručuje dobrou tvářitelnost. Výhodou těchto ocelí je kombinace vysoké pevnosti, odolnosti proti opotřebení, společně s dobrou tvářitelností a svařitelností, na něž má zásadní vliv rovnováha

mezi strukturními fázemi. Při zatížení se nejprve deformují zrna austenitu (netransformují se), pak feritu a bainitu. Čím je vyšší podíl měkkých složek ve struktuře, tím mají nižší pevnost. Vyznačují se vysokou schopností absorbovat energii a vysokou zbytkovou deformační kapacitou, proto se používají na výztuhy nárazníků, dveří, karoserie a B sloupků. [2] Struktura CP oceli je na obr. 2.1.6.



Obr. 2.1.6: Struktura CP oceli [3]

MS oceli – jsou materiály, u nichž se vysoké pevnosti, po válcování za tepla na kontinuálních linkách, dosáhne prudkým ochlazením, kdy se austenit přemění na martenzit. Takto získané materiály obsahují i malé množství feritu nebo bainitu a mají velmi vysokou mez pevnosti v tahu, až 1700 MPa. Nevýhodou těchto materiálů je velmi omezená tvářitelnost a používají se na výlisky do 5 % deformace. Výlisek z MS oceli už má vyčerpané plastické vlastnosti a při deformaci již není schopen pohltit další energii a praskne. Tyto materiály se používají na pevné bezpečnostní výztuhy kolem prostoru pro posádku, který by měl v případě nehody zůstat neporušen. [2] Struktura MS oceli je na obr. 2.1.7.



Obr. 2.1.7: Struktura MS oceli [3]

HSLA oceli – jsou vysokopevnostní mikrolegované oceli o obsahu uhlíku 0,05 – 0,5 % a maximálně 2 % manganu. Mikrolegování se provádí pro zlepšení mechanických,

případně protikorozních vlastností přídavkem velmi malého (do 0,1 %) množství prvků titanu, chromu, molybdenu, dusíku, vanadu, niklu, niobu. Různou kombinací těchto prvků spolu s různými mechanismy zpevnění a speciálním technologickými postupy výroby, lze dosáhnout požadovaných fyzikálně-mechanických vlastností. [2]



Obr. 2.1.8: Trendy ve vývoji plechů pro automobilový průmysl [5]

TWIP oceli – jsou vývojovými materiály, u nichž k plastické deformaci dochází zalomením (rozdvojením) krystalické mřížky tzv. dvojčatěním, na rozdíl od ostatních materiálů, u nichž se deformace realizuje skluzem dislokací. [1] Mají vysoký obsah manganu (10 - 30 %), hliníku, křemíku a dosahují pevnosti až 1200 MPa při tažnosti 50%. To je předurčuje k výrobě tvarově složitých pevnostních výlisků. Praktické využití ale zatím nemají, protože jejich výborných tvárných vlastností bylo zatím dosaženo pouze v laboratorních podmínkách a jsou náročné na výrobu, obtížně svařitelné a náchylné k vzniku mikrotrhlin při dělení.

UHSS oceli (Boron steel – Borové oceli) – jejich struktura je tvořená martenzitem a zbytkovým austenitem. Pro méně náročné aplikace je přípustný i dolní bainit. Mimo jiné legující prvky obsahují i 0,0005 - 0,005 % B, a již takto nízký obsah boru potlačuje nukleaci feritu na hranicích zrn a podporuje tvorbu martenzitu nebo dolního bainitu. Aby se účinek boru projevil, je nutné zabránit, aby reagoval s jiným

prvky např. kyslík nebo dusík. Toho je dosaženo legováním oceli hliníkem a titanem. V závislosti na tepelně-mechanickém zpracování mohou být meze kluzu a pevnosti ve velmi širokém intervalu. Mez kluzu začíná na 430 MPa a po zpracování a s příspěvkem BH efektu cca 100 MPa, dosahuje až 1770 MPa. Mez pevnosti je v rozsahu 500 - 2034 MPa, tažnost 5-41 %. Výhodou materiálu s takto vysokými pevnostními vlastnostmi je možnost použít méně masivní a tedy lehčí konstrukci. Nevýhodou je, že je po další deformaci nelze opravit a je nutné poškozený díl vyměnit. Se zvýšenou pevností se nese i zvýšená křehkost a tedy náchylnost ke vzniku trhlin při deformaci. Pro svoji vysokou mez kluzu se v automobilech používají na součásti, které by se neměly deformovat, např. A a B sloupky, prahy, příčný středový střešní oblouk. [6]



Obr. 2.1.6: Příklad karoserie současnosti – Volvo XC 60 z roku 2008 [6]

2.1.3 Slitiny neželezných kovů

V konstrukci karoserie moderních automobilů nacházejí stále častěji uplatnění slitiny neželezných kovů a to především slitiny hliníku. Největší výhodou použití neželezných kovů je úspora hmotnosti.

Slitiny hliníku – oproti oceli mají přibližně třetinovou hmotnost. Na druhou stranu mají ale nižší mechanické vlastnosti a konstrukční prvky tedy musí být masivnější. Výhodou je dobrá recyklovatelnost, dostupnost a odolnost vůči korozi, nevýhodou pak horší tvářitelnost, svařitelnost a nestálá cena hliníku. Vyšší zastoupení hliníkových slitin lze nalézt u exkluzivních a nestandardních modelů automobilů

(BMW řady 5 a 7), kdy úspora hmotnosti dosahuje 5 – 15 % a u celohliníkových konstrukcí (Audi R8, Jaguar XJ) 40 - 50 %. [6]

Hořčíkové slitiny – jsou oproti hliníku lehčí o 30 % a oproti oceli až o 75 % lehčí. Pro nízké mechanické vlastnosti (mez kluzu 120 - 160 MPa, mez pevnosti 210 - 240 MPa a tažnosti 5 – 10 %) a vysokou reaktivitu s kyslíkem, je použití hořčíkových slitin velmi omezené a to pouze na konstrukční prvky, které nejsou příliš namáhané a exponované kyslíku. Dalšími nevýhodami je zvýšená citlivost na vruby, obtížná tvářitelnost (zpravidla se odlévají) a také vysoká cena. Proto se v automobilovém průmyslu používají pouze výjimečně a to na méně namáhané kryty. [6]

2.2 Popis chování materiálu při vysoké deformační rychlosti

Zatím co chování materiálu při statickém zatížení lze popsat poměrně jednoduchými vztahy, např. Hollomonův vztah (1) nebo vztahem Swift/Krupkowsi (2), které nezahrnují rychlost deformace, tak popis dynamického chování materiálu za mezí kluzu je mnohem složitější.

$$\sigma = \mathcal{C} \cdot \varphi^n \tag{1}$$

$$\sigma = \mathcal{C} \cdot (\varphi_0 + \varphi)^n \tag{2}$$

- C...modul monotónního zpevnění
- n...exponent deformačního zpevnění
- $\varphi_0...$ velikost posunutí křivky zpevnění po ose x tak, aby bylo dosaženo meze kluzu při $\varphi = 0$.

Změna rychlosti deformace způsobuje u materiálů s BCC mřížkou posun křivky napětí – deformace (nahoru nebo dolů). U materiálů s FCC mřížkou dochází k výrazné změně deformačního zpevnění. Při plastické deformaci se uvolňuje teplo, které způsobí tzv. teplotní změkčení. [7] Při pomalé rychlosti zatěžování je toto teplo uvolňováno do okolí, což vede ke vzniku lokalizované deformace a děj je tak izotermický. S rostoucí deformační rychlostí se deformační proces postupně mění z izotermického na adiabatický, protože není dostatek času k odvodu tepla vzniklého při deformaci. To vede v některých případech k adiabatické smykové nestabilitě, která má zásadní vliv na chování materiálu. [8] Tyto pochody zatím nebyly přesně popsány, avšak vznikly některé konstitutivní modely např. Johnsonův - Cookův model nebo Zerilliův – Armstrongův model, které se snaží co nejvíce je přiblížit skutečnosti.

2.2.1 Empirický Johnsonův – Cookův materiálový model

Johnsonův – Cookův model (3) slouží pro stanovení meze kluzu (R_e),

$$R_{\rm e}(\varepsilon_{\rm p};\dot{\varepsilon}_{\rm p};T) = \left[\sigma_0 + B(\varepsilon_{\rm p})^n\right] \left[1 + C \cdot \ln(\dot{\varepsilon}_{\rm p}^*)\right] \left[1 - (T^*)^m\right] \tag{3}$$

 $\dot{\varepsilon}_p^*$...poměrná rychlost plastické deformace [-] (4)

 T^* ...homologická teplota [K] (5)

 ε_{p} ...ekvivalentní plastická deformace

kde σ_0 , *B*, *C*, *n* a *m* jsou materiálové konstanty, které umožňují vytvořit napětí jako funkci deformace, deformační rychlosti a teploty. Johnson a Cook provedli množství měření na různých materiálech a hodnoty parametrů se dají nalézt v tabulkách. [8]

$$\dot{\varepsilon}_p^* = \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_{p0}} \tag{4}$$

$$T^* = \frac{T - T_0}{T_m - T_0}$$
(5)

- $\dot{\varepsilon}_{p}$...rychlost plastické deformace [-]
- $\dot{\varepsilon}_{p0}$...referenční rychlost plastické deformace [-]
- $T_0...$ referenční teplota, při které bylo měřeno σ_0 a $\dot{\varepsilon}_0$ jako referenční napětí a referenční rychlost plastické deformace[K]

T_m...teplota tání [K]

2.2.2 Zerilliův – Armstrongův semi – empirický model [9]

Zerilliův – Armstrongův model je založen na principech mechaniky dislokací. Pro stanovení meze kluzu R_e slouží vzorec (6):

$$R_{\rm e}(\varepsilon_{\rm p};\dot{\varepsilon}_{\rm p};T) = \sigma_{\rm a} + B \cdot exp[-\beta(\dot{\varepsilon}_{\rm p})T] + B_0\sqrt{\varepsilon_{\rm p}}exp[-\alpha(\dot{\varepsilon}_{\rm p})T]$$
(6)

 $\sigma_{a...}$ teplotně neovlivněná složka meze kluzu (7)

$$\sigma_{\rm a} = \sigma_{\rm g} + \frac{k_{\rm h}}{\sqrt{l}} + K \varepsilon_{\rm p}^n \tag{7}$$

 $\sigma_{\rm g}$...přírůstek vlivem rozpuštěných látek a počáteční hustoty dislokací

kh...mikrostrukturní intenzita napětí

- l...průměrná velikost zrna
- *K*...konstanta závislá na typu mřížky (FCC...K = 0)
- B, B₀...materiálové konstanty

V tepelně ovlivněných členech jsou funkční vztahy členů α (8) a β (9) popsány vztahy:

$$\alpha = \alpha_1 - \alpha_0 ln(\dot{\varepsilon}_p) \tag{8}$$

$$\beta = \beta_1 - \beta_0 ln(\dot{\varepsilon}_p) \tag{9}$$

 α , α_0 , β , β_0 ...materiálové konstanty závislé na typu mřížky (FCC, BCC, HCP)

2.3 Mechanické zkoušky materiálů

Materiálové zkoušky lze rozdělit podle různých hledisek. Jednou z možností je rozdělení podle rychlosti zatěžování. Nejnižší deformační rychlosti se dosahuje u tzv. creepových zkoušek, dále jsou zkoušky statické, při kterých zatížení vzorku narůstá pozvolna a deformace se dociluje pohybem dislokací, přes dynamické zkoušky, které lze v podstatě rozdělit na rázové a cyklické až po zkoušky balistické, při kterých se uplatňují elastické napěťové pulzy. Rozsahy rychlostí jsou patrné na obr. 2.3.1.

Nejběžnějšími statickými zkouškami jsou statická zkouška tahem, dále pak statická zkouška tlakem, ohybem a zkoušky tvrdosti. Za nejrozšířenější dynamickou, rázovou zkoušku lze považovat zkoušku vrubové houževnatosti. Výše zmíněné metody jsou normalizované. Většina metod dynamického testování však normalizovaná není a zaleží tedy na zkušební laboratoři, jakou metodu zvolí. Některé z těchto metod budou popsány dále.



Obr. 2.3.1: Rozdělení zkoušek podle rychlosti deformace [7]

2.3.1 <u>Statické zkoušky</u>

Statická zkouška tahem - je nejrozšířenější materiálovou zkouškou, a její průběh je dán normou EN – ISO 6892 – 1[10]. Výše zmíněná norma stanovuje podmínky i způsob vyhodnocení zkoušky.

V průběhu zkoušky je zaznamenávána zatěžující síla (snímaná tenzometrem) a prodloužení vzorku (pomocí průtahoměru, případně určené z pohybu příčníku zkušebního stroje). Na základě naměřené závislosti síla – prodloužení lze získat smluvní diagram napětí – poměrná deformace.

$$R = \frac{F}{S_0} \tag{10}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \tag{11}$$

R...smluvní napětí [MPa]

F...působící síla [N]

 $S_0...$ počáteční průřez [mm²]

ε... poměrné prodloužení [-]

 $\Delta L...$ prodloužení [mm]

*L*₀...počáteční délka [mm]

Ze statické zkoušky tahem lze získat různé materiálové charakteristiky. Základní získané veličiny jsou mez kluzu R_e (u materiálů s výraznou mezí kluzu), $R_{p0,2}$ (u materiálů s nevýraznou mezí kluzu), mez pevnosti R_m , tažnost A_x a kontrakce Z.

$$R_{\rm m} = \frac{F_{\rm max}}{S_0} \tag{12}$$

$$A_{\rm x} = \frac{(L_{\rm u} - L_{\rm 0})}{L_{\rm 0}} \cdot 100 \tag{13}$$

$$Z = \frac{(S_0 - S_u)}{S_0} \cdot 100 \tag{14}$$

R_m...mez pevnosti [MPa]

*F*_{max}...maximální zatěžující síla [N]

Ax...tažnost, kde x značí počáteční vzdálenost rysek na zkušebním vzorku (např.

 $A_{80\text{mm}} - L_0 = 80 \text{ mm}$ [%]

Lu...vzdálenost rysek po přetržení vzorku [mm]

- Z...kontrakce [%]
- Su...průřez zkušební tyče po přetržení [%]

Tyto veličin ale nemají pro hodnocení tvářitelnosti příliš velký význam. Pro posouzení tvářitelnosti je důležitý poměr meze kluzu a meze pevnosti a tvar křivky. [9] Tvářitelnost lze charakterizovat pomocí odvozených veličin jako ukazatel hlubokotažnosti, zásoba plasticity a komplexní ukazatel tvářitelnosti.

$$UH = \frac{R_{\rm po,2}}{R_{\rm m}} \tag{15}$$

$$ZP = k \cdot (R_{\rm m} - R_{\rm p0,2}) \cdot A_{\rm x} \tag{16}$$

$$KUT = A_{\rm x} \cdot \frac{R_{\rm po,2}}{R_{\rm m}} \tag{17}$$

- UH...ukazatel hlubokotažnosti
- ZP...zásoba plasticity
- KUT...komplexní ukazatel tvářitelnosti

Z hlediska tváření nemá smluvní diagram napětí – poměrná deformace příliš velký význam a daleko důležitější je digram skutečné napětí – skutečná deformace.

Porovnání smluvního a skutečného diagramu pro ocel DC 05 je na obr. 2.3.2. Křivka skutečné napětí – skutečná deformace je omezená tím, že níže uvedené vztahy (18) a (19) platí pouze do meze pevnosti.

$$\sigma = R \cdot (1 + \varepsilon) \tag{18}$$

$$\varphi = \ln(1+\varepsilon) \tag{19}$$

 σ ...skutečné napětí [MPa]

 φ ...skutečné deformace [-]



Obr. 2.3.2: Porovnání smluvního a skutečného diagramu, materiál ocel DC 05

Zásadní význam pro tváření má koeficient deformačního zpevnění *n*, který je definován jako exponent v aproximační rovnici, která vyjadřuje závislost skutečného napětí σ na skutečné deformaci φ při jednoosé napjatosti. Výše uvedené vztahy popisují Hollomonovu aproximační rovnici (1), která je vhodná pro větší deformace a aproximaci Swift/Krupkowski (2), která se pro tváření užívá nejčastěji. Na obr. 2.3.3 je znázorněna Hollomonova aproximace statické zkoušky tahem pro interval od 5% deformace do meze pevnosti, dle ČSN ISO 10275 [11]. Podle evropské normy EN 10 130 + A1: 2000 [12] se aproximace provádí v intervalu deformací $\varphi < 10 - 20$ %, případně $\varphi < 10 - 15$ %, nedosahuje-li hodnota maximálního rovnoměrného

přetvoření $\varphi = 20\%$. Konstanty C a n jsou základními datovými údaji potřebnými pro numerické simulace plošného tváření. [13]



Obr. 2.3.3: Hollomonova aproximace statické zkoušky tahem, materiál ocel DC 05

Statická zkouška ohybem - se v praxi aplikuje jako zkouška tříbodovým (trn působí uprostřed vzorku), případně čtyřbodovým ohybem (dva trny působí symetricky vzhledem ke středu vzorku). Ohybová zkouška se nejčastěji používá pro křehké materiály (např. litiny, konstrukční keramiky). Pro houževnaté materiály nemá příliš význam, protože dojde pouze k ohybu zkušebního vzorku a ne k lomu. Účelem zkoušky je získat závislost síla – průhyb vzorku. Při průhybu není napětí ve vzorku konstantní, ale přímo pod zkušebním trnem nabývá záporných hodnot (tlakové), směrem ke středu vzorku klesá na nulu a na straně protější trnu nabývá maximálních tahových hodnot. Smluvní mez pevnosti v ohybu je dána vztahem (20). [14] Na obr. 2.3.4 je znázorněn nástroj pro zkoušku ohybem plechů na výšku.

$$R_{\rm mo} = \frac{M_{\rm o}^{\rm max}}{W_{\rm o}} \tag{20}$$

 $R_{\text{mo}}...$ smluvní mez pevnosti v ohybu [MPa] $M_0^{\text{max}}...$ maximální ohybový moment [Nm] $W_0...$ modul průřezu [m³]



Obr. 2.3.4: Schéma nástroje pro tříbodovou ohybovou zkoušku plechů na výšku [15]

Zkouška tvrdosti - je rychlou a levnou zkouškou, která slouží k odhadu mechanických vlastností materiálu. V principu existují dva způsoby měření tvrdosti. První způsob, který se užívá pro kovy a keramiku, kdy vtlačujeme indentor do materiálu definovanou silou tak, aby došlo k plastické deformaci, se označují jako vnikací (metody Brinell, Rockwell a Vickers). Druhý způsob měření tvrdosti je založen na principu elastické interakce povrchu materiálu a zkušebního tělíska a používá se především pro plasty a pryže (metoda Shore). [14]

Nejstarší metodou je měření Brinellova zkouška tvrdosti, kdy se do měřeného materiálu vtlačuje kulička z vysokopevnostní oceli (HBS) nebo z tvrdokovu (HBW). Tvrdost podle Brinella se určuje jako poměr zkušebního zatížení a povrchu vtisku kuličky a vypočítá se ze vztahu (21), přičemž tento vztah platí, pouze pokud průměr vtisku leží v rozmezí (0,3 - 0,6)D.

$$HBW = \frac{2F}{[\pi \cdot D(D - \sqrt{D^2 - d^2})]}$$
(21)

F...zátěžná síla [N]

- D...průměr kuličky [mm]
- *d*… průměr vtisku kuličky [mm]

Metoda podle Vickerse využívá jako indentoru jehlan o čtvercové základně a vrcholovém úhlu 136° a vypočítá se jako poměr zátěžné síly a plochy vtisku (22).

$$HV = 1,854 \cdot \frac{F}{u^2}$$
(22)

u...střední délka úhlopříčky [mm]

Výhodou Vickersovy metody je nezávislost tvrdosti na zátěžné síle, což umožňuje měřit tvrdost i při velmi malém zatížení. Tyto zkoušky se označují termínem měření mikrotvrdosti a umožňují měřit na metalografickém výbrusu tvrdost jednotlivých zrn.

Tvrdost podle Rockwella se měří na základě hloubky vtlačení malé kuličky (HRB), diamantového kužele s vrcholovým úhlem 120° (HRA) nebo jehlanu (HRC). Metoda nemá přepočtové tabulky a tvrdost se odečítá na stupnici hloubkoměru, který je součástí tvrdoměru. Podle typu materiálu je předepsána zátěžná síla a druh indentoru. [14]

2.3.2 Dynamické zkoušky

Zkouška vrubové houževnatosti - je nejjednodušší a nejběžnější dynamickou rázovou metodou. Podmínky k provedení a vyhodnocení zkoušky vrubové houževnatosti jsou uvedeny v ČSN EN 10045 – 1. Princip zkoušky spočívá v určení energie K (23) spotřebované k přeražení tyčky opatřené vrubem na Sharpyho kladivu obr. 2.3.5. Na základě provedené zkoušky lze materiál hodnotit z hlediska velikosti vrubové houževnatosti (24) (*KCU* – vrub tvaru U, *KCV* – vrub tvaru V), vzhledu lomové plochy a deformační charakteristiky. [13]

$$K_1 = G \cdot (h_1 - h_2) \tag{23}$$

K₁...spotřebovaná nárazová práce [J]

- *G*...tíha kladiva [N]
- h1...počáteční poloha kladiva [m]
- h2...konečná poloha kladiva [m]

$$KC = \frac{K}{S_0} \tag{24}$$

KC...vrubová houževnatost [J.cm⁻²]

 $S_0...$ průřez tyčky v místě vrubu [cm]



Obr. 2.3.5: Princip zkoušky vrubové houževnatosti na Sharpyho kladivu [16]

Zkouška na pneumatickém stroji DYNAPACK – zkušební vzorek je umístěn na kovadle stroje. Pomocné zvedáky udržují píst v horní poloze. Ve chvíli, kdy je stlačen pomocný zásobník, pohybují se zvedáky dolů. Píst je následně urychlen a naráží na vzorek umístěný na kovadle a stlačí ho. Touto metodou je možné dosáhnout rychlosti do 15 m/s. Jednodušší obdobou tohoto zařízení je padostroj.

Metoda rotujícího setrvačníkem – elektromotor roztáčí setrvačník ve směru hodinových ručiček. Při dosažení požadované rychlosti setrvačníku zajišťovací kolík uvolní kladivo na unášeč, čímž dojde k natažení vzorku. Hmota setrvačníku je dostatečně velká k zajištění konstantní rychlosti. Posunutí opěrné tyče, které poskytuje napětí a vzorku, které poskytuje deformaci, je sledováno optickými metodami. Na základě naměřených dat je možné získat spojitou křivku napětí – deformace. Schéma metody je znázorněno na obr. 2.3.6. [8]



Obr. 2.3.6: Schéma metody rotujícího setrvačníku [8]

Hopkinsonův test s měrným děleným vzorkem – nalezl široké uplatnění jako nástroj pro dosažení středně velkých deformačních rychlostí ($10^2 - 10^4 \text{ s}^{-1}$). Schéma Hopkinsonova testu je znázorněno na obr. 2.3.7. Projektil, vystřelený pomocí stlačeného vzduchu, narazí na dopadovou tyč a vyvine v ní napěťový pulz. Ten projde dopadovou tyčí, až dosáhne vzorku, který je umístěn mezi dopadovou a výstupní tyčí. Amplituda napěťové vlny je podobná deformaci předané vzorku. K oběma tyčím jsou připojeny tenzometry. Měří se přímý pulz, odražený pulz, a pulz, který projde vzorkem do výstupní tyče a tyto pulzy mají amplitudy ε_{I} , ε_{R} , ε_{T} . [8]



Obr. 2.3.7: Schéma Hopkinsonova testu s měrným děleným vzorkem [17]

Na základě napětí v obou tyčích změřených tenzometry lze napsat rovnice pro deformaci a deformační rychlost (25).

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{V_1(t) - V_2(t)}{L}$$
(25)

 $V_1(t), V_2(t)...$ povrchová rychlost v bodě 1 a 2

L...délka vzorku

Z Hopkinsonova testu se vyhodnocuje:

- Velikost deformace
 - 1. Způsobenou tahovou vlnou, která se šíří zpět dopadovou tyčí
 - 2. Vzniklou pohlcením tlakové vlny vzorkem
- Rychlosti deformace
- Napětí ve vzorku

Pro křehké materiály (např. keramika) je zapotřebí prodloužit náběhový čas, aby nedocházelo k selhání měření během odrazu první napěťové vlny. Toho je dosaženo použitím měděné podložky (tvarovač impulzů), která se při nárazu deformuje a prodlouží tak náběhovou dobu. Některé další možnosti uspořádání Hopkinsonova testu jsou znázorněny na obr. 2.3.8. [8]



Obr. 2.3.8: Schéma dalších aplikací Hopkinsonova testu s měrným děleným vzorkem [8]

Metoda rozpínajícího se kroužku – je další poměrně rozšířenou dynamickou metodou. Schéma zkoušky je znázorněno na obr. 2.3.9. Ocelový válec, má dutin ve, které exploduje výbušnina. Výbuch způsobí tlakovou vlnu, která míří směrem ven, až narazí na kroužek, který rozpíná v radiálním směru. Měřením průběhu rychlosti rozpínajícího se kroužku laserovou interferometrií může být určena křivka napětí – deformace kroužku při určité deformační rychlosti. [8]

Rychlost rozpínání kroužku průběžně klesá ze své počáteční hodnoty, což je způsobeno vlivem odrazu napěťových vln uvnitř kroužku. Deformační rychlost tedy průběžně kolísá a pro určení křivky napětí – deformace za konstantní deformační rychlosti, je nutné provést větší počet měření s různou velikostí nálože. Pro vyvinutí tlakové vlny lze využít i jiné možnosti než pouze výbušninu, např. explodující drát (pomocí výboje kondenzátoru), nebo silným elektromagnetickým výbojem (zde ale dochází k nezanedbatelnému vývinu tepla). [8]



Obr. 2.3.9: Schéma metody rozšiřujícího se kroužku [8]

2.4 Fotogrammetrie

Fotogrammetrie je základním principem optických měřících systémů. Jde o všeobecné metody, kdy informace o tvaru a poloze objektu, který je na snímku zachycen, jsou získávány nepřímým způsobem. Tyto informace se získávají z jednoho nebo více snímků. Fotogrammetrii lze využít všude tam, kde lze objekt vyfotografovat, získané snímky následně vyhodnotit a své uplatnění nachází v kartografii, kriminalistice, strojírenství a v dalších oborech. [1] Fotogrammetrii lze rozdělit podle různých kritérií, jako např. podle počtu současně pořízených snímků, podle stylu pořízení a vyhodnocení snímků, nebo podle časové dostupnosti snímků

real time – snímání a vyhodnocování snímku v reálném čase v průběhu zadaného procesu. Frekvence snímání koresponduje s frekvencí změny (deformace, pohyb)objektu,

- offline sekvenční snímkování, časově nebo prostorově oddělené vyhodnocení,
- online simultánní snímání více snímků a bezprostřední vyhodnocení této skupiny snímků. Kamery jsou většinou přímo připojeny k počítači. [18]

Hlavní body použití optických měřících systémů jsou 3D digitalizace, 3D technika pro měření souřadnic, analýza deformace a kvalitativní kontrola. Tyto systémy se používají ve vývoji výrobků a zajištění kvality, stejně jako při zkouškách materiálů nebo součástek. [18] Jedním z předních výrobců optických měřících systémů, užívaných ve strojírenství je firma GOM GmbH, která vyrábí 3D – skener ATOS (generuje vysoce přesná plošná data) a TRITOP (dodává přesná bodová data) a systémy pro 3D měření deformací TRIPTOP Deformation, ARGUS, PONTOS a ARAMIS.

2.4.1 Optický skener ATOS

ATOS je mobilní bezdotykový optický 3D skener firmy GOM určený pro nejrůznější aplikace. Mezi přednosti systému patří jeho flexibilita, vysoké rozlišení, snadné ovládání a mobilita. Systémem ATOS lze měřit teoreticky neomezeně velké a hmotné předměty, umožňuje měřit měkké objekty i formy o vysoké teplotě. Po úpravě je možné měřit i lesklé a průhledné předměty. Největší využití systému ATOS je v oblastech CAD, CAM a FEM, kde je vyžadováno měření reálných objektů a jejich následné srovnání s teoretickými modely. [19]

Proces měření je založen na principech optické triangulace, fotogrammetrii a metodě Fringe Projection. Na povrch objektu jsou promítány pruhy světla, které jsou snímány pomocí dvou kamer s CCD čipem. Software následně z těchto záběrů vypočítá souřadnice bodů. Pro kompletní digitalizaci objektu je třeba pořídit několik záběrů z různých úhlů. [19] Na základě referenčních bodů (kruhové značky), které jsou aplikovány přímo na objekt, měřící desku nebo rámeček, ATOS transformuje tyto jednotlivé záběry plně automaticky do společného globálního souřadného systému. Nasnímaná data jsou poté uživatelem upravena v ATOS software. [18]



Obr. 2.4.1: Optický skener ATOS v aplikaci s robotem KUKA [19]

Systém ATOS, obr. 2.4.1, se skládá ze senzoru, zahrnujícího dvě kamery a projektor, kontrolní jednotky hlavy senzoru a vysoce výkonného počítače. Jako další příslušenství je možné využít robustní stativ, který umožňuje pohyb v pěti osách nebo počítačem řízený průmyslový robot.

Využití systému ATOS:

- bezkontaktní a materiálově nezávislá 3D digitalizace libovolných objektů
- kontrola kvality (měření deformací, výrobních defektů, odpružení)
- > generování STL formátu nebo CAD dat
- převod modifikací modelu do CAD
- simulace vstřikování plastů

2.4.2 Optický skener TRITOP

TRITOP je přenosný optický měřící systém určený k přesnému bezkontaktnímu měření diskrétních bodů, kontrastních čar (prostřihů, ostřihových hran plechu, nakreslených čar na objektu) a viditelných značek na měřeném objektu. Proces měření je založen na principech fotogrammetrie. Měřený objekt je označen optickými body (samolepícími, magnetickými nebo speciálními adaptéry). Připravený objekt je snímán digitálním fotoaparátem z různých pozic v prostoru. Na
základě digitálních snímků systém TRITOP vypočítá pozice fotoaparátu při jednotlivých snímcích a 3D souřadnice měřených bodů na objektu. Dále systém umožňuje zobrazení 3D souřadnic měřených bodů, pozic fotoaparátu a přesnosti měření. Následně mohou být měřené body exportovány ve standardních formátech nebo použity v systému ATOS. Systém TRITOP je znázorněn na obr. 2.4.2. [19]



Obr. 2.4.2: Optický skener TRITOP [19]

Využití systému TRITOP:

- > analýza statické a quasi statické deformace
- kontrola kvality
- reverzní inženýrství
- > spolupráce se systémem ATOS pro velké objekty

2.4.3 Optický měřící systém ARGUS

ARGUS je bezkontaktní měřící systém, pro měření 3D deformací plechu při lisovacím procesu. Původně byl vyvinut pro automobilku Renault a nyní je využíván ve všech lisovnách této automobilky, stejně tak jako většiny jejích dodavatelů a výzkumných institucí po celém světě.

Na měřený objekt je elektrochemicky vyleptána mřížka, která se při tváření deformuje spolu s materiálem. Po vylisování se mřížka nasnímá CCD kamerou a data se vyhodnotí na počítači. Na základě metody zachování konstantního objemu je vypočteno rozložení hlavní a vedlejší deformace, redukce tloušťky materiálu a FLC

diagram. Tímto způsobem lze určit kritická místa v procesu tváření. Systém ARGUS je znázorněn na obr. 2.4.3. [19]



Obr. 2.4.3: Optický měřící systém ARGUS [19]

Využití systému ARGUS:

- > ověřování a optimalizace procesu tažení plechů
- > optimalizace procesu tváření (FLC diagram)
- detekce oblastí s kritickou deformací
- optimalizace lisovacích procesů
- materiálové zkoušky

2.4.4 Optický měřící systém PONTOS

PONTOS je mobilní optický měřící systém pro dynamické měření pohybu diskrétních bodů, vibrací a deformací. Systém je často využíván při testovacích měřeních v automobilovém a leteckém průmyslu. PONTOS, zobrazený na obr. 2.4.4, je vybaven dvěma kamerami, které jsou synchronizovány a zaznamenávají snímky ve stereo nastavení. V těchto snímcích jsou zachyceny a graficky zobrazeny 3D souřadnice referenčních značek a jejich posunutí v různých deformačních stavech v průběhu zatížení objektu. [19]

Měření je založeno na principu optické triangulace. Měřený objekt je označen optickými retro body a je snímán dvěma CCD kamerami. Systém z těchto záběrů vypočítá prostorové souřadnice, posunutí, a deformace jednotlivých bodů.



Obr. 2.4.4: Dvojice kamer optického systému PONTOS [19]

Využití systému PONTOS:

- > 3D měření pohybů, deformací a vibrací
- analýza sekvenčních pohybů
- měření relativních pohybů
- měření v aerodynamickém tunelu
- měření dynamického chování

2.4.5 Optický měřící systém ARAMIS

ARAMIS, obr. 2.4.5, je bezkontaktní měřící systém firmy GOM pro měření 3D deformací. Výsledkem je barevná mapa na objektu, který lze zatěžovat staticky, nebo dynamicky. Proces měření může být spouštěn v pravidelných časových intervalech (např. s prodlevou 1s) nebo může být řízen externím signálem (např. ze zátěžového stroje). Maximální rychlost snímkování může být u systému HS až 8000 snímků za sekundu. Při měření rotačních objektů lze propojit více systému ARAMIS do jednoho měřícího systému. Hlavními oblastmi využití systému ARAMIS je dimenzování součástí a zkoušení materiálů. [19] Na měřený objekt se nejprve sprejem nanese kontrastní vzor (pattern), který se při zatěžování deformuje spolu s objektem, který je snímán pomocí dvou CCD kamer. Důležité je, aby nanesený pattern nebyl příliš zaschlý, protože by pří zatížení popraskal a systém by potom snímky nedokázal správně vyhodnotit. Ze snímků jsou následně pomocí image processingu vypočteny 3D souřadnice bodů ležících na povrchu tělesa. Software při výpočtu porovnává odpovídající si body v jednotlivých úrovních zatížení a vypočítá 3D posuvy, tvar deformovaného objektu a 3D deformace.



Obr. 2.4.5: Optický měřící systém ARAMIS s PC [19]

Využití systému ARAMIS:

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

3 Experimentální část

Experimentální část se zabývá konstrukčním návrhem přípravku pro dynamickou tahovou zkoušku na padostroji Instron CEAST 9350. Dále je zde popsán vyliv rychlosti při statickém zatěžování a odzkoušení přípravku na sérii zkušebních vzorků z hlubokotažného materiálu DC 05 B při dynamickém, rázovém zatížení.

3.1 Princip padostroje

Padostroj je v podstatě založen na principu 2. Newtonova zákona (26), kdy beran padostroje je urychlován pouze gravitací. Zásadními parametry pro měření je hmotnost beranu a výška pádu. Na základě těchto hodnot lze ze zákona o zachování energie (27) a ze vztahů pro potenciální (28) a kinetickou energii (29) dopočítat energii rázu a dopadovou rychlost.

$$G = m \cdot g \tag{26}$$

m...hmotnost beranu

g...gravitační zrychlení

$$E_{\rm k} = E_{\rm p} \tag{27}$$

$$E_{\rm p} = mgh \tag{28}$$

$$E_{\rm k} = \frac{1}{2}m \cdot v^2 \tag{29}$$

*E*_k...kinetická energie [J]

*E*_p...kinetická energie [J]

- v...rychlost [m/s]
- h…výška [m]

3.1.1 Padostroj Instron CEAST 9350

Padostroj Instron CEAST 9350, obr. 3.1.1, je zařízení pro dynamické rázové zkoušky s širokým rozsahem využití, díky rozměrnému zkušebnímu prostoru. Rozsah možných pádových hmotností je 2 -70 kg a dopadové energie 0,59 – 757 J. Odjištění beranu je pomocí pneumatického ventilu a zařízení je napojeno na notebook se softwarem pro vyhodnocení naměřených dat.

Po uvolnění beranu, který je urychlován vlastní tíží a dosažní určité polohy, se protne fotobuňka a spustí se měření. Síla rázu je měřena pomocí tenzometru umístěného v trnu beranu. Spodní poloha stroje je omezena brzdou, která zachytí padající beran tak, aby nedošlo ke srážce s pevnou částí stroje.



Obr. 3.1.1: Padostroj Instron CEAST 9350 [20]

Tab.	č.	1. Parametry	padostroie	Instorn	CEAST	9350 dle	[20]
	۰.	in a and inoury	paaoonojo		01,01	0000 010	[]

Rozsah dopadové energie [J]	Nárazová rychlost [m.s ⁻¹]	Pádová výška [m]	Pádová hmotnost závaží [kg]
0,59 - 757	0.77 – 4.65	0.03 – 1.10	2 - 70

Měřený materiál 3.2

Zkušební vzorky byly vyrobeny z hlubokotažné oceli DC 05 B dle normy ČSN EN 10152, elektrolyticky pozinkovaná, jmenovitá tloušťka plechu 0,8 mm, skutečná byla naměřena 0,809 mm. Vzorky byly odebrány ze směru 0° od směru válcování.

Tab. č. 2. Chemické složení dle [21]

Prvek	С	Si	Mn	Р	S
Obsah [%]	max. 0,06	-	max. 0,35	max. 0,025	max. 0,025

Tab. č. 3. Mechanické vlastnosti dle [21]

Stav	+ZE
Mez kluzu <i>R</i> _{p0,2} [MPa]	140 - 190
Mez pevnosti <i>R</i> _m [MPa]	270 - 330
Tažnost A _{80mm} [%]	min. 39
Koeficient normálové anizotropie r ₉₀ [-]	min. 1,9
Exponent deformačního zpevnění n ₉₀ [-]	min. 0,19

3.2.1 Získání vzorků

Vzorky pro statickou zkoušku tahem byly nastříhány pomocí střižného nástroje na výstředníkovém lisu LENP 40 (obr. 3.2.1) tak, aby splňovaly normu EN ISO 6892 – 1. Směr odběru vzorků byl 0° vzhledem ke směru válcování.



Obr. 3.2.1: Výstředníkový lis LENP 40

Pro měření dynamické zkoušky nebylo možné vzorky nastříhat, protože mají speciální tvar přizpůsobený pro upnutí do přípravku. Nejprve byly na tabulových nůžkách DURMA MS2504, obr. 3.2.2, nastříhány polotovary zkušebních tyček, které byly následně obrobeny do konečného tvaru, který je znázorněn na obr. 3.2.3.



Obr. 3.2.2: Tabulové nůžky DURMA MS2504



Obr. 3.2.3: Zkušební tyčka pro dynamické měření

3.3 Statická zkouška tahem při různých rychlostech zatěžování

Zjištění vlivu rychlosti na průběh statické zkoušky tahem bylo prováděno na trhacím zařízení Tira Test 2300 a vyhodnoceno pomocí softwaru LabTest 4.14. Měření bylo prováděno při 6 – ti různých deformačních rychlostech a výsledné křivky tahové zkoušky jsou znázorněny na obr. 3.3.1 a mechanické vlastnosti jsou shrnuty v tabulce č. 4. Na základě naměřených výsledků byl dopočítán koeficient m, který popisuje vliv rychlosti při statické zkoušce tahem.

$$\sigma = \mathcal{C} \cdot \varphi^n \cdot \dot{\varphi}^m \tag{30}$$

 $\dot{\phi}$...deformační rychlost [s⁻¹]

m...exponent deformační rychlosti

$$\dot{\varphi} = \frac{v}{L_0} \tag{31}$$

$$m = \frac{\log \frac{\sigma_1}{\sigma_2}}{\log \frac{\phi_1}{\phi_2}} \tag{32}$$



Deformační rychlost $\dot{\phi}$ [s ⁻¹]	Měřená veličina	Průměrná hodnota	Směrodatná odchylka
	$R_{\rm p0,2}$ [MPa]	169,9	1,5
0,0021	<i>R</i> _m [MPa]	298,2	2,7
	A_{80mm} [%]	43,8	0,4
	$R_{\rm p0,2}$ [MPa]	173,0	1,6
0,0042	<i>R</i> _m [MPa]	301,9	2,6
	A_{80mm} [%]	42,6	0,8
	$R_{\rm p0,2}$ [MPa]	183,5	1,4
0,0104	<i>R</i> _m [MPa]	305,3	2,3
	A_{80mm} [%]	42,2	0,5
	$R_{\rm p0,2}$ [MPa]	185,8	2,2
0,0208	<i>R</i> _m [MPa]	308,7	2,4
	A_{80mm} [%]	43,1	0,7
	$R_{\rm p0,2}$ [MPa]	194,6	1,7
0,0417	<i>R</i> _m [MPa]	312,4	2,0
	A_{80mm} [%]	45,8	1,2
	$R_{\rm p0,2}$ [MPa]	213,1	1,5
0,1038	<i>R</i> _m [MPa]	317,9	2,2
	A_{80mm} [%]	46,3	0,5

Tab. č. 4. Výsledky statické zkoušky tahem při různých rychlostech zatěžování



Obr. 3.3.1: Průběhy statické zkoušky tahem při různých deformačních rychlostech

Z výše uvedených výsledků je patrné, že s rostoucí deformační rychlostí stoupají mechanické hodnoty (mez kluzu a mez pevnosti) materiálu. Tažnost materiálu zpočátku klesá, ale od určité hodnoty rychlosti tažnost opět roste. To je způsobeno tím, že při rychlejším zatěžování dochází k většímu vývinu tepla, které již nestíhá z materiálu odcházet a deformační proces tak již nelze považovat za izotermický.

Vliv rychlosti popisuje exponent *m* v derivované aproximační rovnici (30) a lze ho vypočítat podle vztahu (32). Velikost exponentu *m* byla počítána mezi sousedícími křivkami a pro určení materiálové charakteristiky byla následně zprůměrována. Vypočítané výsledky exponentu *m* pro hodnotu deformace $\varphi = 20 \%$ jsou shrnuty v tabulce č. 5.



Skutečné	Skutečné	Deformační	Deformační	Exponent
napětí σ_1	napětí σ_2	rychlost $\dot{\phi}_1$	rychlost $\dot{\phi}_2$	deformační
[MPa]	[MPa]	[s ⁻¹]	[s ⁻¹]	rychlosti m [-]
363,9	368,5	0,0021	0,0042	0,0183
Skutečné	Skutečné	Deformační	Deformační	Exponent
napětí σ_2	napětí σ_3	rychlost $\dot{\phi}_2$	rychlost $\dot{\phi}_3$	deformační
[MPa]	[MPa]	[s ⁻¹]	[s ⁻¹]	rychlosti m [-]
368,5	372,8	0,0042	0,0104	0,0127
Skutečné	Skutečné	Deformační	Deformační	Exponent
napětí σ_3	napětí σ_4	rychlost $\dot{\varphi}_3$	rychlost $\dot{\phi}_4$	deformační
[MPa]	[MPa]	[s ⁻¹]	[s ⁻¹]	rychlosti m [-]
372,8	377,0	0,0104	0,0208	0,0162
Skutečné	Skutečné	Deformační	Deformační	Exponent
napětí σ_4	napětí σ_5	rychlost $\dot{\phi}_4$	rychlost $\dot{\phi}_5$	deformační
[MPa]	[MPa]	[s ⁻¹]	[s ⁻¹]	rychlosti m [-]
377,0	381,5	0,0208	0,0417	0,0171
Skutečné	Skutečné	Deformační	Deformační	Exponent
napětí σ_5	napětí σ_6	rychlost $\dot{\phi}_5$	rychlost $\dot{\phi}_6$	deformační
[MPa]	[MPa]	[s ⁻¹]	[s ⁻¹]	rychlosti m [-]
381,5	388,1	0,0417	0,1038	0,0188
Průměrná hodr	nota koeficientu i	<i>m</i> [-]		0,0166

Vzhledem k faktu, že hlavním cílem diplomové práce není zjišťování vlivu rychlosti na tahovou zkoušku, je zde pouze pro informaci uvedena aproximace statické zkoušky tahem, obr. 3.3.2, pro deformační rychlost $\dot{\phi}_1 = 0,021 \text{ s}^{-1}$ a následně uvedena rovnice (30) do níž byly dosazeny vypočítané aproximační koeficienty, čímž byl získán vztah (33).

Směrodatná odchylka [-]

0,0022



Obr. 3.3.2: Hollomonova aproximace statické zkoušky tahem, materiál ocel DC 05

$$\sigma = 515,0542 \cdot \varphi^{0,2164} \cdot \dot{\varphi}^{0,0166} \tag{33}$$

3.4 Schéma přípravku

Schematický návrh, obr. 3.4.1 zobrazuje hlavní funkční části přípravku, které byly použity při návrhu přípravku. Skládá se z podstavných kotoučů, upínacího kotouče, spodní a horní upínací desky, dvoudílné klínové vložky, dvoudílného příčníku, bočních sloupků a zkušební vidlice. Vzhledem k velké délce vidlice bylo nutné vyrobit i kratší mezikus trnu zkušebního stroje.



Obr. 3.4.1: Schéma přípravku

Hlavní rozměry přípravku jsou dány konstrukcí zkušebního stroje. Jedná se především o umístění fotodiody spouštějící měření a pozice brzdy, které jsou patrné na obr. 3.4.2 a otvor v desce stroje o rozměrech 140 x 220 mm, obr. 3.4.3. Pro nastavení výšky nástroje vhodné pro měření bylo nutné přípravek podložit ocelovými kotouči.



Brzda stroje

Obr. 3.4.2: Umístění fotodiody a brzdy na stroji



Obr. 3.4.3: Otvor v desce zkušebního stroje

3.5 Návrh přípravku v softwaru Autodesk Inventor 2011

3D modely jednotlivých variant, vytvořené v softwaru Autodesk Inventor 2011, odpovídají skutečným rozměrům a zobrazují všechny hlavní konstrukční části přípravku pro měření dynamické zkoušky tahem. Vytvořené modely umožnily lepší představu o umístění jednotlivých částí a funkčních prvků přípravku, čímž přispěly k zvolení optimální varianty. Součástí návrhu modelu je i pevnostní kontrola metodou konečných prvků, která je součástí programu Autodesk Inventor 2011. Na základě 3D modelu byly po té vytvořeny výrobní výkresy jednotlivých součástí zvolené varianty.

3.5.1 <u>Varianta číslo 1</u>

Na základě prvotního seznámení s padostrojem byla navržena první možná varianta konstrukce přípravku, obr. 3.5.1. Ta se skládá z podstavných kotoučů (7), sloužících k vymezení výšky nástroje, dále z kotouče s vybráním (8) pro upevnění vlastního těla přípravku (1). V úvahu připadaly dvě možnosti spojení těchto součástí, a to šrouby, nebo pomocí svařování. Do těla nástroje zapadá klínová vložka (3) s upnutým vzorkem (5), která je přichycena šrouby přes krycí destičku (4). Na

druhém konci vzorku je dvoudílný unášeč (6). Zkušební vidlička (2) se upíná na trn padostroje.

Největší předností této varianty je jednoduchost, díky které není nutný jakýkoliv zásah do základního nastavení stroje. Naproti tomu zásadním problémem je fakt, že trn a vzorek nejsou v jedné ose a tím by vznikal klopný moment, který by se přenášel do vedení stroje a mohl by způsobit jeho poškození. Z toho důvodu bylo nutné vytvořit konstrukčně odlišnou variantu.



Obr. 3.5.1: Varianta č. 1: 1 – Tělo přípravku, 2 – Vidlička, 3 – Klínová vložka, 4 – Krycí destička, 5 – Vzorek, 6 – Unášeč, 7 – Podstavný kotouč, 8 – Kotouč s vybráním pro upnutí těla přípravku

3.5.2 Varianta číslo 2

Na základě nedostatků varianty č. 1 byla navržena 2. varianta, obr. 3.5.2. Vlastní tělo přípravku je složeno z horní (4) a dolní upínací desky (1), které jsou spojeny přes boční sloupky (2). Stojánek přípravku tak v podstatě tvoří O rám. Dolní upínací deska je přišroubována ke kotoučovému podstavci (8) a pomocí dalších kotoučů (9) je vymezena výška přípravku na stroji. V horní upínací desce je vyfrézován otvor, do kterého zapadá dvoudílná klínová vložka (6) s upnutým jedním koncem vzorku (7). Ke druhému konci je připevněn unášeč (3). Největší předností tohoto uspořádání je, že se skládá z tvarově jednoduchých částí a stojánek přípravku je velmi robustní. Naproti tomu se zde vyskytl problém s nutností použití dlouhé vidličky (5). To si vyžádalo demontáž trnu padostroje a vyrobení kratšího.

Tato varianta se již jevila jako plně vyhovující, ale na základě požadavků od vedoucího diplomové práce, aby bylo možné využít k měření optický systém ARAMIS, bylo nutné provést další konstrukční změny.



Obr. 3.5.2: Varianta č. 2: 1 – Dolní upínací deska, 2 – Boční sloupek, 3 – Unášeč, 4 – Horní upínací deska, 5 – Vidlice, 6 – Dvoudílná klínová vložka, 7 – Vzorek, 8 – Kotoučový podstavec, 9 – Vymezovací kotouč

3.5.3 Varianta číslo 3

3. variant, obr. 3.5.3, vznikla úpravou 2., a to za účelem možnosti využití optického měřícího systému ARAMIS. Z toho důvodu bylo nutné přední sloupek

rozdělit na dva tak, aby uprostřed vznikl průzor, kterým by bylo možné sledovat deformaci vzorku. Zároveň bylo zapotřebí přípravek zúžit, aby bylo možné snímat zkušební vzorek optickým systémem. Největší nevýhodou tohoto řešení je nerovnoměrné rozložení napětí v přípravku, díky dělenému přednímu sloupku. Přední část nástroje se tedy deformuje pod zatížením více, ale přípravek je dostatečně tuhý a při maximálním možném zatížení je rozdíl deformací v přední a zadní části nástroje v řádu tisícin milimetru. Varianta č. 3 byla nakonec vybrána jako finální. Všechny odkazy dále v textu budou odkazovat na obr. 3.5.3. Výrobní výkresy jednotlivých součástí a výkres sestavy přípravku jsou součástí přílohy č. 4.



Obr. 3.5.3: Varianta č. 3: 1 – Dolní upínací deska, 2 – Zadní sloupek, 3 – Horní upínací deska, 4 – Přední sloupek, 5 – Vidlice, 6 – Dvoudílná klínová vložka, 7 – Vzorek, 8 – Unášeč, 9 – Kotoučový podstavec, 10 – Vymezovací kotouč

3.6 Kontrola zvolené varianty metodou konečných prvků

Zvolená konstrukční varianta byla pevnostně zkontrolována pomocí metody konečných prvků, která je jednou z funkcí konstrukčního softwaru Inventor. Simulační výpočet byl prováděn pro maximální možné zatížení, kterého lze na zkušebním zařízení dosáhnout. Samostatně bylo kontrolováno tělo přípravku a vidlice. Výsledky simulací jsou součástí přílohy č. 1.

3.7 Funkční princip přípravku

Jak již bylo napsáno výše, potřebné energie rázu je dosaženo pouze na základě pádové výšky a hmotnosti příčníku stroje, ve kterém je upnuta vidlice (5) a potřebné rychlosti pohyblivé části nástroje je dosaženo pouze vlivem gravitačního zrychlení. Jedna strana vzorku (7) je upnuta v klínové vložce (6), obr. 3.7.1, která je usazena v horní upínací desce (3) a druhý konec tyčky je uchycen v unášeči (8). V okamžiku, kdy vidlice (5) narazí na unášeč (8), začne být unášen a zkušební tyčka se začíná deformovat a to až do přetržení. Síla potřebná pro přetržení vzorku je měřena pomocí tenzometru, zabudovaného v trnu zkušebního stroje a sílu začíná zaznamenávat v okamžiku, kdy příčník stroje protne fotobuňku. Naměřená data jsou přenášena do připojeného PC. Dolní poloha stroje je omezena pomocí brzdy.



Obr. 3.7.1: Klínová vložka

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI Katedra strojírenské technologie





3.8 Montáž přípravku

Z důvodu délky zkušební vidlice (5) bylo nutné vyměnit část trnu stroje, která je mezi příčníkem, a častí ve které je upnutý tenzometr. Nejprve bylo zapotřebí odmontovat trn z příčníku a odšroubovat matici, která drží část s tenzometrem. Následně byl tenzometr odpojen a celá část trnu byla vyjmuta a nasazena na kratší trn. Ten byl po té připevněn zpět na příčník a následně k němu byla připojena pomocí šroubu vidlice (6). Nakonec byl opět zapojen tenzometr. Původní trn a nový kratší trn jsou znázorněny na obr. 3.8.1 a).





Obr. 3.8.1: Montáž přípravku: a) původní a nový trn, b) smontovaná pevná část nástroje

Montáž spodní části nástroje spočívá v sestavení vlastního těla přípravku a určení výšky vyložení nástroje pomocí podstavných kotoučů (10). Nejprve je nutné sestavit tělo přípravku, které se skládá z horní (3) a dolní upínací desky (1) a bočních sloupků (2, 4). Do spodní desky (1) se zasunou středící kolíky a na ně se nasadí boční sloupky (2, 4), které se připevní pomocí šroubů. Následně se nasunou kolíky do sloupků (2, 4) a na ně je osazena horní upínací deska (3), která se přitáhne pomocí šroubů. Do spodní upínací plochy na stroje se našroubují závitové tyče, na které se nasadí podstavné kotouče (10), a k poslednímu kotouči (9) se přišroubuje tělo přípravku, obr 3.8.1 b).

3.9 Výměna zkušebního vzorku

Spodní konec zkušební tyčky (7) se umístí přímo do unášeče (8) do vyfrézované drážky na kolík a následně se připevní jeho druhou polovinou. Po té se unášeč protáhne mezi sloupky (2, 4) a volný konec tyčky (7) se umístí do drážky na kolík v jedné části klínové vložky (6) a následně se na kolík nasadí druhá polovina klínové vložky a takto upnutý vzorek se umístí do prostoru v horní upínací desce (3). Po provedení zkoušky se vyjme vložka (6) a unášeč (6) a z obou upínacích prvků se odstraní přetržený vzorek (7). Upínací prvky jsou znázorněny na obr. 3.9.1.



Obr. 3.9.1: Upínací prvky přípravku pro dynamickou zkoušku tahem

3.10 Odzkoušení přípravku

3.10.1 <u>Odzkoušení funkčnosti přípravku</u>

Při odzkoušení přípravku byl nejprve padostroj spuštěn naprázdno, z důvodu ujištění se, že nedojde ke kolizi mezi pevnou a pohyblivou částí. Také bylo nutné určit výšku nástroje podstavnými kotouči, s ohledem na pozici vidlice při zabrzdění příčníku, tak aby k přetržení vzorku došlo dříve, než začne být příčník brzděn. Na stroji byla nastavena výška pádu, a hmotnost příčníku, vidlice a přídavných závaží (celkem 11,357 kg) a na základě těchto vstupních hodnot stroj vypočítal dopadovou rychlost a energii. Funkčnost přípravku byla ověřena pro tři dopadové rychlosti. Pro každou rychlost bylo změřeno 5 vzorků.



Obr. 3.10.1: Porovnání zkušebního vzorku před a po zkoušce

Původní záměr využít optický měřící systém ARAMIS k nasnímání deformace a z těchto dat určit tažnost bohužel nebyl realizován. Stativ s upnutými kamerami, obr. 3.10.2 a), bohužel nebylo možné umístit do takové polohy, obr3.10.2 b), aby obě kamery bezpečně viděly na zkušební vzorek. Průběh zkoušky tedy bylo možné nasnímat pouze jednou kamerou, obr. 3.10.2 c), což k výpočtu deformace softwarem ARAMISu nestačí. V případě vyřešení umístění kamer do nižší polohy by bylo možné použít optických měření pro určení deformace materiálu.











c)

Obr. 3.10.2: Optický systém ARAMIS: a) kamery umístěné na stativu, b) polohování kamer na stativu, c) průběh zkoušky zachycený optickým systémem ARAMIS

3.10.2 Vyhodnocení naměřených dat

Naměřená data byla zaznamenána pomocí softwaru CeastVIEW 6.01 a k následnému vyhodnocení naměřených dat byl použit software OriginPro 9.0.

Rychlost deformace má zásadní vliv na mechanické vlastnosti materiálu. Např. materiál, který má při statické tahové zkoušce nevýraznou mez kluzu, tak při vyšších rychlostech deformace můžeme pozorovat mez kluzu výraznou. Tu lze vyhodnotit

jako střední mez kluzu R_{es} , resp. jako aritmetický průměr horní R_{eh} a dolní R_{ed} meze kluzu dle vztahu:

$$\begin{split} R_{es} &= \frac{R_{eh} + R_{ed}}{2} , \\ \text{kde } R_{eh} &= \frac{F_{eh}}{S_0} , \ R_{ed} &= \frac{F_{ed}}{S_0} , \end{split}$$

kde F_{eh} je zátěžná síla odpovídající horní mezi kluzu, F_{ed} je zátěžná síla odpovídající dolní mezi kluzu a S_0 je velikost počátečního příčného průřezu zkušební tyče. Určení meze pevnosti je dáno vztahem:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0},$$

kde $F_{\rm m}$ je maximální zjištěná síla. Odčítání hodnot z grafu je znázorněno na obr. 3.10.3.



Obr. 3.10.3: Odečet hodnot sil pro horní a dolní mez kluz a mez pevnosti

Zásadní nevýhodou měření na padostroji je fakt, že rychlost není konstantní, ale že v průběhu deformace vzorku klesá. Pro vyhodnocení však byla rychlost uvažována konstantní.

3.10.3 <u>Měření při rychlosti zatížení v₁ = 2,53 m/s</u>

Pro první měření byla zvolena minimální výška, do které lze zkušební stroj nastavit, tedy dle výrobce 300 mm. Vzhledem ke změně části trnu a délce vidlice byla skutečná nastavená výška odměřena 325 mm. Při prvním měření nebyla energie pro přetržení vzorku dostatečná, a proto byly přidány další 2 kg závaží na celkovou váhu 11,375kg. Této nastavené výšce tedy odpovídá dopadová rychlost 2,53 m/s, respektive deformační rychlost 50,6 s⁻¹. Naměřená závislost síly na čase je znázorněná na obr. 3.10.4 a naměřené výsledky jsou uvedeny v tabulce č. 6.



Obr. 3.10.4: Průběh zatěžující síly v závislosti na čase pro deformační rychlost $\dot{\phi}_1 = 50.6 \text{ s}^{-1}$

Označení vzorku	R _{es} [MPa]	R _m [MPa]
1	421,3	436,3
2	415,8	428,1
3	420,6	435,9
4	418,1	425,8
5	409,9	433,6
Průměrná hodnota	417,1	431,9
Směrodatná odchylka	4,1	4,2

Tab. č. 6. Naměřené hodnoty mechanických vlastností

3.10.4 Měření při rychlosti zatížení v2 = 2,89 m/s

Pro dopadovou rychlost 2,89 m/s, odpovídá deformační rychlosti 57,4 s⁻¹, byla vidlice spuštěna z výšky 425 mm. Váha zůstala zachována jako u předchozího měření. Závislost zatěžující síly na čase je znázorněna na obr. 3.10.5 a naměřené výsledky jsou shrnuty v tabulce č. 7.



Obr. 3.10.5: Průběh zatěžující síly v závislosti na čase pro deformační rychlost $\dot{\phi}_2 = 57.4 \text{ s}^{-1}$

Označení vzorku	R _{es} [MPa]	R _m [MPa]
1	453,4	442,2
2	455,1	450,8
3	445,2	451,9
4	450,9	449,7
5	451,7	452,3
Průměrná hodnota	451,3	449,4
Směrodatná odchylka	3,4	3,7

Tab. č. 7. Naměřené hodnoty mechanických vlastností

3.10.5 <u>Měření při rychlosti zatížení v₃ = 3,21 m/s</u>

Pro dopadovou rychlost 3,21 m/s, odpovídá deformační rychlosti 64,2 s⁻¹, byla vidlice spuštěna z výšky 525 mm. Ostatní podmínky měření zůstaly zachovány. Závislost zatěžující síly na čase je znázorněna na obr. 3.10.6 a naměřené výsledky jsou shrnuty v tabulce č. 8.



Obr. 3.10.6: Průběh zatěžující síly v závislosti na čase pro deformační rychlost $\dot{\phi}_3 = 64.2 \text{ s}^{-1}$

Označení vzorku	R _{es} [MPa]	R _m [MPa]
1	479,9	478,7
2	475,5	480,9
3	473,6	470,3
4	478,1	476,8
5	470,7	471,8
Průměrná hodnota	475,6	475.7
Směrodatná odchylka	3,2	4,0

Tab. č. 8. Naměřené hodnoty mechanických vlastností

3.11 Diskuze výsledků

Zvyšuje-li se rychlost zatěžování při statické tahové zkoušce, dochází k nárůstu meze kluzu i meze pevnosti materiálu. Tažnost materiálu se nejprve snižuje a od určité rychlosti začne opět narůstat, což je způsobeno teplem, které nestíhá z materiálu odcházet a děj tak přestává být izotermickým. Zatížení materiálu vysokými rychlostmi se začne projevovat výrazným nárůstem meze kluzu. Zatímco při zvyšování rychlosti deformace při statické zkoušce jsou rozdíly v řádech několika málo procent, tak při dynamickém rázovém zatížení dochází k nárůstu mechanických vlastností v řádu desítek procent. Hodnoty mechanických vlastností při statické zkoušky je přepočítána na m/s, hodnoty meze kluzu u statické zkoušky odpovídají hodnotě $R_{p0,2}$ a u dynamické zkoušky hodnotě R_{es} . Procentuální vyjádření změny mechanických vlastností je v tabulce č. 10. Na obr. 3.11.1 jsou porovnány závislosti síly na čase pro jednotlivé rychlosti dynamického zatížení.

Deformační rychlost	Mez kluzu	Mez pevnosti
[s ⁻¹]	[MPa]	[MPa]
0,0021	169,9	298,5
0,0042	173,0	301,9
0,0104	183,6	305,3
0,0208	185,8	308,7
0,0417	194,6	312,4
0,1038	213,1	317,9
2,53	417,1	431,9
2,89	451,3	449,4
3,21	475,6	475,7

Tab. č. 9.	Shrnutí	mechanických	vlastností
------------	---------	--------------	------------



Deformační rychlost	Navýšení meze kluzu	Navýšení meze pevnosti
[s ⁻¹]	[%]	[%]
0,0042	1,8	1,1
0,0104	8,1	2,3
0,0208	9,4	3,4
0,0417	14,5	4,7
0,1038	25,4	6,5
50,6	145,5	44,7
57,4	165,6	50,6
64,2	179,9	59,4

Tab. č. 10. Změny mechanických vlastností při různých rychlostech zatížení



Obr. 3.11.1: Porovnání závislostí síly na čase pro měřené deformační rychlosti

4 Závěr

Cílem této práce byl konstrukční návrh přípravku, který umožní měření mechanických vlastností materiálu při vyšších rychlostech deformace na padostroji Instron CEAST 9350, který vlastní katedra strojírenské technologie. Na základě zkonstruování přípravku byla ověřena jeho funkčnost na hlubokotažném plechu a byl vyhodnocen vliv rychlosti deformace na mechanické vlastnosti materiálu. Měřený plech DC 05 byl zvolen z důvodu širokého uplatnění v automobilovém průmysl a základní vlastnosti této oceli byly ověřeny statickou zkouškou tahem.

Byl proveden postupný návrh třech variant, přičemž varianta č. 3 byla vybrána jako finální. K této variantě byly zpracovány výrobní výkresy a výkres sestavy, které jsou součástí příloh. Podle výkresové dokumentace byl přípravek vyroben a následně otestován. Funkčnost přípravku prokázal výsledky měření.

Přípravek byl navržen tak, aby umožňoval zkoušení mechanických vlastností při jednoosé tahové zkoušce. Minimální i maximální dopadová rychlost je dána konstrukcí padostroje.

Pro vlastní experimentální měření bylo provedeno měření při šesti různých rychlostech při statickém zatěžování a tři rychlosti pro měření dynamické rázové tahové zkoušky na padostroji. Po uskutečnění měření byla zjištěná data vyhodnocena. Na základě naměřených výsledků lze říci, že s rostoucí rychlostí deformace rostou mechanické vlastnosti materiálu. Zásadně se projevuje změna meze kluzu, jejíž nárůst je poměrně vysoký a projevuje se výraznou mezí kluzu i u materiálu, které mají mez kluzu při statickém zatížení nevýraznou. Nezanedbatelně vzroste také mez pevnosti materiálu. Tažnost materiálu nebyla při dynamickém zatížení měřena, protože se nepodařilo umístit kamery optického systému do takové polohy, aby obě kamery viděli na zkušební vzorek. Do budoucna by bylo dobré zkonstruovat stojan pro optický měřící systém, který by umožňoval umístění kamer do takové polohy, aby bylo možné průběh zkoušky nasnímat a na základě pořízených snímků vyhodnotit další veličiny.



5 Použitá literatura

- [1] MAREŠ, J.: Vliv velikosti deformace materiálu na velikost koeficientu normálové anizotropie, Bakalářská práce, TU v Liberci, 2011
- [2] BARTŮNĚK, J.: Kinetika vzniku plastického lomu u ocelí používaných v automobilovém průmyslu, Diplomová práce, TU v Liberci, 2009
- [3] http://www.techno-mat.cz/ksp-tkp-tzp/ [10/2013]
- [4] http://www.worldautosteel.org/steel-basics/automotive-steel-definitions/ [10/2013]
- [5] http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/spt/ [10/2013]
- [6] GIRMAN, V., HRABČÁKOVÁ, V.: Kovové materiály automobilových konštrukcií – II. Karoséria a karosárenské plechy. Materials engineer / Materiálový inženýr 2012 [online]. [cit. 11/2013]. ISSN 1337 – 8953. Dostupné z: http://www.materialing.com/materialy_auto_konstrukcii
- [7] SISMILICH, V.: Dynamická tahová zkouška Určení materiálových parametrů, Bakalářská práce, VUT v Brně, 2008
- [8] MEYERS, M. A.: Dynamic Behavior of Materials, 1. New York: A Wiley - Interscience publication, 1994, ISBN 0-471-58262-X
- [9] http://en.wikipedia.org/wiki/Viscoplasticity [11/2013]
- [10] Norma EN ISO 6892 1
- [11] Norma ČSN ISO 10275
- [12] Norma EN 10130 + A1: 2000
- [13] DOUBEK, P.: Výzkum deformačního chování vysokopevnostních plechů při vyšších rychlostech deformace, Disertační práce, TU v Liberci, 2006
- [14] PTÁČEK, L. A KOL.: Nauka o materiálu I., Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., Brno, 2003, ISBN 80-7204-283-1
- [15] LUŃÁČEK, M., SOBOTKA, J., SOLFRONK, P.: The Effect of Blank Preparation on the Formability of Ultra High – Strength Steels, TU v Liberci, 2011, ISBN 978-80-7372-806-9
- [16] http://www.apemswitches.be/1-26458-Switches.php [12/2013]
- [17] http://www.composites.northwestern.edu/research/characterization/dynamic. htm [12/2013]



- [18] POSPÍCHAL, D.: Využití optického systému ARAMIS při určování mezních stavů deformace hlubokotažného plechu, Diplomová práce, TU v Liberci, 2009
- [19] http://www.mcae.cz [12/2013]
- [20] http://www.instron.com/wa/product/CEAST-9350-Drop-Tower.aspx [12/2013]
- Norma ČSN EN 10152 [21]

6 Seznam příloh

1. Výsledky numerické simulace zatížení přípravku

- 1.1 Napětí v těle přípravku
- 1.2 Napětí ve vidlici
- 1.3 Deformace těla přípravku
- 1.4 Deformace vidlice

2. Výsledky statické zkoušky tahem

2.1 Statická zkouška tahem naměřené a vypočtené hodnoty – v=10 mm/min 2.2 Statická zkouška tahem naměřené a vypočtené hodnoty – v=20 mm/min

- 2.3 Statická zkouška tahem naměřené a vypočtené hodnoty v=50 mm/min
- 2.4 Statická zkouška tahem naměřené a vypočtené hodnoty v=100 mm/min
- 2.5 Statická zkouška tahem naměřené a vypočtené hodnoty v=200 mm/min
- 2.6 Statická zkouška tahem naměřené a vypočtené hodnoty v= 498 mm/min

3. Výsledky dynamické zkoušky tahem

- 3.1 Dynamická zkouška tahem naměřené a vypočtené hodnoty v= 2,53 m/s
- 3.2 Dynamická zkouška tahem naměřené a vypočtené hodnoty v= 2,89 m/s

3.3 Dynamická zkouška tahem naměřené a vypočtené hodnoty – v= 3,21 m/s

4. Výrobní výkresy

1.1 Napětí v těle přípravku



1.2 Napětí ve vidlici



1.3 Deformace těla přípravku


1.4 Deformace vidlice



číslo měření	1	2	3	4	5
deformační rychlost – φ [s⁻¹]			0,0021		
šířka vzorku - <i>b</i> [mm]	20,007	20,010	20,012	20,005	20,018
průměrná tloušťka vzorku - <i>t</i> [mm]	0,809				
původní průřez vzorku - S ₀ [mm ²]	16,19	16,19	16,19	16,18	16,19
původní měřená délka - <i>L</i> ₀ [mm]	80	80	80	80	80
napětí na střední mezi kluzu - <i>R</i> p0,2 [MPa]	170,5	168,2	172,3	170,0	168,5
průměrná hodnota			169,9		
směrodatná odchylka			1,5		
napětí na mezi pevnosti - <i>R</i> _m [MPa]	302,5	299,6	297,9	295,3	295,5
průměrná hodnota			298,2		
směrodatná odchylka			2,7		
tažnost – A _{80 mm} [%]	44,1	43,2	43,7	44,3	43,6
průměrná hodnota			43,8		
směrodatná odchylka			0,4		

2.1 Statická zkouška tahem - naměřené a vypočtené hodnoty v = 10 mm/min

číslo měření	1	2	3	4	5
deformační rychlost – φ [s⁻¹]			0,0042		
šířka vzorku - <i>b</i> [mm]	20,005	20,120	20,116	20,125	20,118
průměrná tloušťka vzorku - <i>t</i> [mm]	0,809				
původní průřez vzorku - S ₀ [mm ²]	16,18	16,28	16,27	16,28	16,28
původní měřená délka - <i>L</i> ₀ [mm]	80	80	80	80	80
napětí na střední mezi kluzu - <i>R</i> _{p0,2} [MPa]	173,1	172,5	175,9	170,8	172,9
průměrná hodnota			173,0		
směrodatná odchylka			1,6		
napětí na mezi pevnosti - <i>R</i> _m [MPa]	298,8	304,2	301,4	305,5	299,4
průměrná hodnota			301,9		
směrodatná odchylka			2,7		
tažnost – A _{80 mm} [%]	42,6	42,1	43,0	43,8	41,5
průměrná hodnota			42,6		
směrodatná odchylka			0,8		

2.2 Statická zkouška tahem - naměřené a vypočtené hodnoty v = 20 mm/min

číslo měření	1	2	3	4	5
deformační rychlost – φ [s⁻¹]			0,0104		
šířka vzorku - <i>b</i> [mm]	20,015	20,020	20,110	20,025	20,108
průměrná tloušťka vzorku - <i>t</i> [mm]	0,809				
původní průřez vzorku - S ₀ [mm ²]	16,19	16,20	16,27	16,20	16,27
původní měřená délka - <i>L</i> ₀ [mm]	80	80	80	80	80
napětí na střední mezi kluzu - <i>R</i> _{n0.2} [MPa]	182,7	181,5	185,7	183,5	184,4
průměrná hodnota			183,5		
směrodatná odchylka			1,4		
napětí na mezi pevnosti - <i>R</i> _m [MPa]	305,1	308,4	301,5	306,7	304,9
průměrná hodnota			305,3		
směrodatná odchylka			2,3		
tažnost – A _{80 mm} [%]	42,9	42,5	42,6	41,7	41,5
průměrná hodnota			42,2		
směrodatná odchylka			0,5		

2.3 Statická zkouška tahem - naměřené a vypočtené hodnoty v = 50 mm/min

číslo měření	1	2	3	4	5
deformační rychlost – φ [s⁻¹]			0,0208		
šířka vzorku - <i>b</i> [mm]	20,008	20,100	20,016	20,115	20,112
průměrná tloušťka vzorku - <i>t</i> [mm]	0,809				
původní průřez vzorku - S ₀ [mm ²]	16,19	16,26	16,19	16,27	16,27
původní měřená délka - <i>L</i> ₀ [mm]	80	80	80	80	80
napětí na střední mezi kluzu - <i>R</i> _{n0 2} [MPa]	185,6	189,7	183,1	186,1	184,5
průměrná hodnota			185,8		
směrodatná odchylka			2,2		
napětí na mezi pevnosti - <i>R</i> _m [MPa]	309,3	311,9	306,3	305,5	310,5
průměrná hodnota			308,7		
směrodatná odchylka			2,4		
tažnost – A _{80 mm} [%]	42,9	43,1	44,5	42,3	42,9
průměrná hodnota			43,1		
směrodatná odchylka			0,7		

2.4 Statická zkouška tahem - naměřené a vypočtené hodnoty v = 100 mm/min

číslo měření	1	2	3	4	5
deformační rychlost – φ [s ⁻¹]			0,0417		
šířka vzorku - <i>b</i> [mm]	20,105	20,009	20,111	20,118	20,018
průměrná tloušťka vzorku - <i>t</i> [mm]	0,809				
původní průřez vzorku - S ₀ [mm ²]	16,26	16,19	16,27	16,28	16,19
původní měřená délka - <i>L</i> ₀ [mm]	80	80	80	80	80
napětí na střední mezi kluzu - <i>R</i> _{n0 2} [MPa]	195,6	193,7	194,3	192,1	197,1
průměrná hodnota			194,6		
směrodatná odchylka			1,7		
napětí na mezi pevnosti - <i>R</i> _m [MPa]	315,4	311,1	313,6	312,5	309,6
průměrná hodnota			312,4		
směrodatná odchylka			2,0		
tažnost – A _{80 mm} [%]	46,7	45,9	44,3	47,5	44,5
průměrná hodnota			45,8		
směrodatná odchylka			1,2		

2.5 Statická zkouška tahem - naměřené a vypočtené hodny v = 200 mm/min

číslo měření	1	2	3	4	5
deformační rychlost – φ [s⁻¹]			0,1038		
šířka vzorku - <i>b</i> [mm]	20,006	20,110	20,111	20,100	20,009
průměrná tloušťka vzorku - <i>t</i> [mm]	0,809				
původní průřez vzorku - S ₀ [mm ²]	16,18	16,27	16,27	16,26	16,19
původní měřená délka - <i>L</i> ₀ [mm]	80	80	80	80	80
napětí na střední mezi kluzu - <i>R</i> _{p0.2} [MPa]	212,1	215,9	213,2	211,5	212,9
průměrná hodnota			213,1		
směrodatná odchylka			1,5		
napětí na mezi pevnosti - <i>R</i> _m [MPa]	314,9	319,3	321,1	317,9	316,3
průměrná hodnota			317,9		
směrodatná odchylka			2,2		
tažnost – A _{80 mm} [%]	46,3	45,7	47,1	46,5	45,9
průměrná hodnota			46,3		
směrodatná odchylka			0,5		

2.6 Statická zkouška tahem - naměřené a vypočtené hodnoty v = 498 mm/min

číslo měření	1	2	3	4	5	
dopadová výška - <i>h</i> [m]			0,325			
deformační rychlost – φ [s ⁻¹]			50,6			
šířka vzorku - <i>b</i> [mm]	5,005	5,009	5,008	5,011	5,010	
průměrná tloušťka vzorku - <i>t</i> [mm]	0,809					
původní průřez vzorku - S ₀ [mm ²]	4,05	4,05	4,05	4,05	4,04	
síla odpovídající horní mezi kluzu - F _h [N]	1834,7	1814,8	1845,2	1814,0	1787,3	
síla odpovídající dolní mezi kluzu - F _d [N]	1577,9	1553,2	1561,7	1572,6	1532,9	
síla odpovídající mezi pevnosti - <i>F</i> _m [N]	1767,0	1733,8	1765,4	1724,5	1751,7	
napětí na horní mezi kluzu - <i>R</i> _{eh} [MPa]	453,0	448,1	455,6	447,9	441,3	
napětí na dolní mezi kluzu - <i>R</i> _{ed} [MPa]	389,6	383,5	385,6	388,3	378,5	
napětí na střední mezi kluzu - <i>R</i> es [MPa]	421,3	415,8	420,6	418,1	409,9	
průměrná hodnota			417,1			
směrodatná odchylka			4,1			
napětí na mezi pevnosti - <i>R</i> _m [MPa]	436,3	428,1	435,9	425,8	433,6	
průměrná hodnota			431,9			
směrodatná odchylka			4,2			

3.1 Dynamická zkouška tahem - naměřené a vypočtené hodnoty – v = 2,53 m/s

číslo měření	1	2	3	4	5
dopadová výška - <i>h</i> [m]			0,425		
deformační rychlost – φ [s⁻¹]			57,4		
šířka vzorku - <i>b</i> [mm]	5,009	5,006	5,010	5,005	5,007
průměrná tloušťka vzorku - <i>t</i> [mm]	0,809				
původní průřez vzorku - <i>S₀</i> [mm ²]	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05
síla odpovídající horní mezi kluzu - F _h [N]	2037,2	2070,4	2016,1	2086,2	2067,5
síla odpovídající dolní mezi kluzu - F _d [N]	1635,4	1616,0	1549,5	1565,7	1591,2
síla odpovídající mezi pevnosti - F _m [N]	1790,9	1825,7	1782,8	1821,3	1831,8
napětí na horní mezi kluzu - <i>R</i> _{eh} [MPa]	503,0	511,2	497,8	515,1	510,5
napětí na dolní mezi kluzu - <i>R</i> _{ed} [MPa]	403,8	399,0	382,6	386,6	392,9
napětí na střední mezi kluzu - <i>R</i> es [MPa]	453,4	455,1	440,2	450,9	451,7
průměrná hodnota			450,3		
směrodatná odchylka			5,2		
napětí na mezi pevnosti - <i>R</i> _m [MPa]	442,2	450,8	451,9	449,7	452,3
průměrná hodnota			449,4		
směrodatná odchylka			3,7		

3.2 Dynamická zkouška tahem - naměřené a vypočtené hodnoty – v = 2,89 m/s

číslo měření	1	2	3	4	5
dopadová výška - <i>h</i> [m]			0,525		
deformační rychlost – φ [s ⁻¹]			64,2		
průměrná tloušťka vzorku - <i>t</i> [mm]	5,008	5,009	5,010	5,005	5,012
průměrná tloušťka vzorku - <i>t</i> [mm]	0,809				
původní průřez vzorku - S ₀ [mm ²]	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05
síla odpovídající horní mezi kluzu - F _h [N]	2245,7	2227,9	2208,1	2212,5	2185,8
síla odpovídající dolní mezi kluzu - <i>F</i> _d [N]	1641,5	1623,6	1628,1	1660,1	1586,4
síla odpovídající mezi pevnosti - F _m [N]	1938,7	1947,6	1904,7	1931,0	1910,8
napětí na horní mezi kluzu - <i>R</i> _{eh} [MPa]	554,5	550,1	545,2	546,3	539,7
napětí na dolní mezi kluzu - <i>R_{ed} [MP</i> a]	405,3	400,9	402,0	409,9	391,7
napětí na střední mezi kluzu - <i>R</i> es [MPa]	479,9	475,5	473,6	478,1	465,7
průměrná hodnota			474,6		
směrodatná odchylka			4,9		
napětí na mezi pevnosti - <i>R</i> _m [MPa]	478,7	480,9	470,3	476,8	471,8
průměrná hodnota			475,7		
směrodatná odchylka			4,0		

3.3 Dynamická zkouška tahem -	 naměřené a vypočtené hodnoty – v = 3 	3,21 m/s
-------------------------------	--	----------

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon

č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

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

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

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

V Liberci, 3.1. 2014

.....

Bc. Jakub Mareš

Declaration

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

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

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must 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 thesis to the full amount.

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

V Liberci, 3.1. 2014

.....

Bc. Jakub Mareš