

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 871

ISSN 1213-4198

thesis
?
IS

Ing. Martin Dobeš

**Vliv rychlosti rázového zatěžování
na napjatost, deformaci a spolehlivost
komponenty palivového systému
automobilu**



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

**VLIV RYCHLOSTI RÁZOVÉHO ZATĚŽOVÁNÍ
NA NAPJATOST, DEFORMACI A SPOLEHLIVOST
KOMPONENTY PALIVOVÉHO SYSTÉMU AUTOMOBILU**

**EFFECT OF VELOCITY OF IMPACT LOADING TO STRESS, DEFORMATION
AND DURABILITY OF COMPONENT OF FUEL CAR SYSTEM**

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

OBOR	Aplikované vědy v inženýrství: Inženýrská mechanika
AUTOR PRÁCE	Ing. Martin Dobeš
ŠKOLITEL	prof. RNDr. Ing. Jan Vrbka, DrSc., dr.h.c. prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
OPONENTI	prof. Ing. Petr Horyl, CSc. doc. Ing. Tomáš Návrát, Ph.D.
DATUM OBHAJOBY	30. května 2018

Brno 2019

Klíčová slova:

Crash, pasivní bezpečnost, palivový čerpadlový modul, rychlost deformace, plasticita, polymer, model porušení, SAMP, DIEM, LS-DYNA

Keywords:

Crash, Passive Safety, Fuel Supply Module, Strain Rate, Plasticity, Polymer, Failure Model, SAMP, DIEM, LS-DYNA

Místo uložení:

Vysoké učení technické
Fakulta strojního inženýrství
Technická 2896/2
616 69 Brno

© Martin Dobeš, 2019

ISBN 978-80-214-5712-6

ISSN 1213-4198

OBSAH

1	SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	5
1.1	Palivový čerpadlový modul (FSM)	5
1.2	Pasivní bezpečnost – palivový systém	6
1.3	Modelování porušení v explicitní výpočtové analýze.....	6
2	CÍLE PRÁCE	7
2.1	Formulace problému.....	7
3	ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ.....	7
4	HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE	8
4.1	Výpočtové modely polymerního materiálu.....	8
4.1.1	Základní model TSCP – elasticita.....	8
4.1.2	Základní model TSCP – plasticita	10
4.1.3	Základní model TSCP – rychlost deformace	14
4.1.4	Základní model TSCP – porušení	17
4.1.5	Pokročilý model materiálu (*MAT_SAMP-1) [1], [9], [4].....	18
4.2	Experimentální verifikace výsledků.....	21
4.2.1	*MAT_24 + *MAT_ADD_EROSION.....	22
4.2.2	*MAT_SAMP-1 + DIEM	25
5	ZÁVĚR.....	26
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	27
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	30
	AUTOROVO CURRICULUM VITAE.....	31

1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

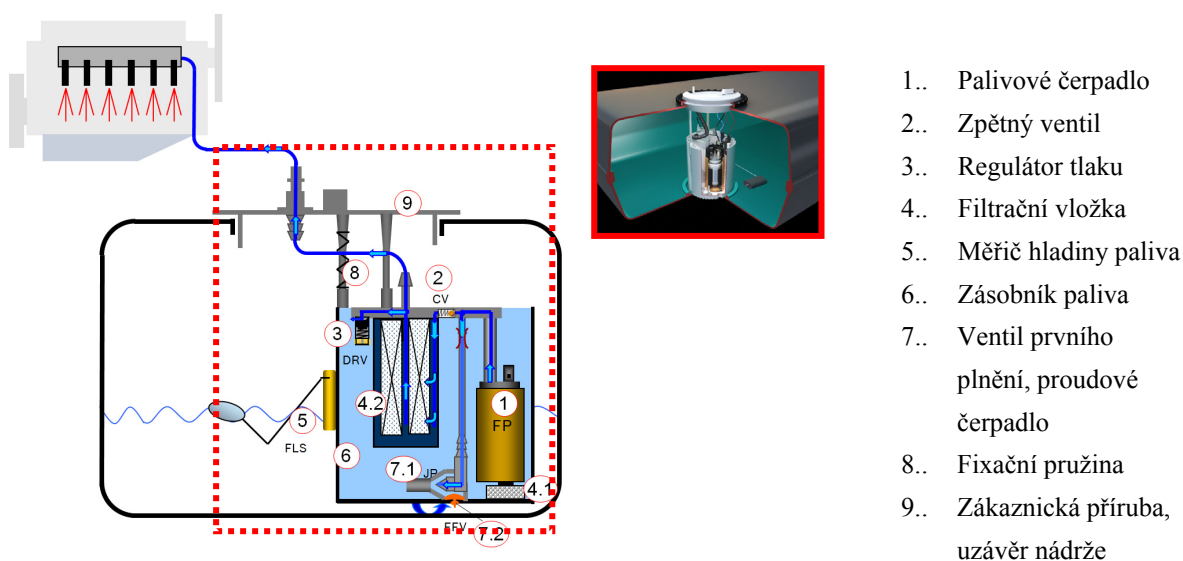
Během rešeršní části této doktorské práce bylo nastudováno a posouzeno poměrně velké množství vědeckých prací z oblasti polymerních materiálů ve spojení s rázovým zatížením a komplexním numerickým modelováním. Pro široký rozhled v různých problematikách bylo nutné vybrat literaturu a zdroje, které optimálním způsobem autorovi ukáží současný stav poznání v této problematice. Jednotlivá témata lze rozdělit následovně [2]-[10]:

- Palivový čerpadlový modul (FSM) a pasivní bezpečnost ve vztahu k FSM
- Numerické modely materiálů – vhodné pro polymerní materiály
- Numerické modely v LS-DYNA např. SAMP-1, DIEM, *MAT_24
- Experimentální stanovení mat. charakteristik pro numerické modely porušení
- Vysokorychlostní num. model TSCP (vliv triaxility, strain rate, porušení)

1.1 Palivový čerpadlový modul (FSM)

Palivový systém je tvořen několika důležitými prvky, mezi které bezesporu patří tzv. palivový čerpadlový modul. Tento modul je umístěn v palivové nádrži automobilu, či motocyklu. Skládá se z několika součástí např. zásobník paliva, tlaková nádoba, palivové čerpadlo, filtrační systém, ventil prvního plnění, regulační systém průtoku a tlaku, měřič hladiny paliva a zákaznická příruba, která vyúsťuje ve vnější části palivové nádrže. Dá se tedy říci, že jako celek palivový modul plní následující funkce [28]:

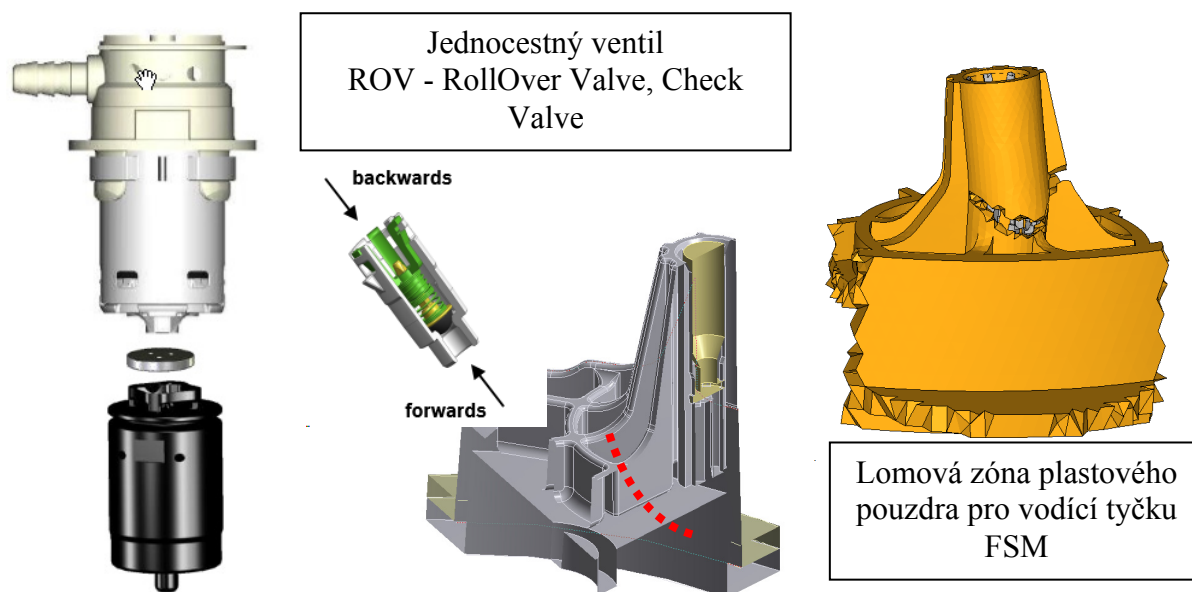
- Filtrace paliva
- Doprava paliva k motoru
- Regulace množství a tlaku paliva
- Zabezpečení úniku paliva při nestandardní provozní situaci, např. havárie
- Měření hladiny paliva v palivové nádrži



Obr. 1.1: Palivový čerpadlový modul a jeho důležité funkční prvky [28]

1.2 Pasivní bezpečnost – palivový systém

Bezpečnost automobilu lze dle jednoduchého klíče rozdělit na aktivní a pasivní. Aktivní bezpečnost zahrnuje ty prvky, které se podílejí na prevenci a předcházení dopravním nehodám, či nestandardním situacím. Mezi tyto zařízení lze zařadit brzdy, bezpečnostní elektronické systémy apod. Prvky pasivní bezpečnosti se zapojují do činnosti až v okamžiku nestandardní situace (dopravní nehody). Jedná se o konstrukční zařízení, jehož cílem je minimalizace následků, především tedy zamezení úniku paliva z uzavřeného systému, tzn. soustava jednocestných ventilů, použití mechanicky odolných materiálů a především pak správné navržení lomových zón, kde se má zařízení v případě nestandardní situace porušit takovým způsobem, že toto porušení nezpůsobí únik paliva z uzavřeného systému.



Obr. 1.2: Základní prvky pasivní bezpečnosti z hlediska palivového systému [28]

1.3 Modelování porušení v explicitní výpočtové analýze

V současné době existuje mnoho materiálových numerických modelů, které jsou schopni modelovat a predikovat porušení struktury, avšak vždy na určité úrovni zjednodušení. V oblasti polymerních materiálů se vyskytují určité fenomény, které je potřeba zahrnout do numerického modelu, např. vliv triaxiality napětí, vliv rychlosti deformace, rozlišovat tzv. Failure a Damage model apod.. Jako nejvíce pokročilé a vhodné byly vyhodnoceny materiálové numerické modely jako např. SAMP-1, GISSMO, DIEM, MAT_24, vždy ve vztahu k řešiči LS-DYNA a polymerním materiálům. Dalším důležitým tématem, které bylo nutno řešit je získání potřebných materiálových dat, zde byly podrobeny rešeršní činnosti metody jako např. DICM (Digital Image Correlation Method), hodnoty True Stress- True Strain, vysokorychlostní materiálové zkoušky apod. Komplexní rešeršní činnost je uvedena v plné verzi disertační práce.

2 CÍLE PRÁCE

Cíle práce jsou formulovány následovně:

- a) popsání současného stavu znalostí v oblasti rázového namáhání polymerních materiálů a možnosti výpočtového modelování těchto stavů
- b) tvorba adekvátního výpočtového modelu pro stanovení napjatosti a deformace tělesa z polymerního materiálu a s uvážením rychlosti zatěžování.
- c) stanovení potřebných mechanických charakteristik použitého materiálu, ve vztahu k rázovému namáhání polymerních materiálů
- d) přehled možností, jak predikovat porušení materiálu ve výpočtové analýze při rázovém zatížení

2.1 Formulace problému

Problém přichází z adekvátního požadavku průmyslové praxe v automobilovém průmyslu. Týká se zvýšení bezpečnosti plastových komponent palivového systému při rázovém namáhání, které je zde vyvozeno při nestandardních situacích, jako náraz automobilu do pevné překážky apod. V takových případech musí plastové díly odolávat zcela odlišným zatěžujícím stavům, než jsou uvažovány při konstrukci na běžný životní cyklus výrobku. Prostředkem pro zvýšení bezpečnosti je zejména tvorba přesnějšího výpočtového modelu, který lépe odpovídá skutečným zatěžovacím podmínkám i vlastnostem použitého materiálu. Pro efektivnější konstrukci s úsporou materiálu, montážních procesů apod. je nutné používat co nejvíce sofistikovaný numerický model. Platí to např. pro výpočtový model materiálu, zatížení či okrajových podmínek apod. Jedině tak můžeme vyvíjet produkty, které jsou dostatečně robustní, bezpečné a jsou vyrobeny s maximální úsporou prostředků.

3 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

Výše formulovaný problém v sobě zahrnuje nutnost použití výpočtových numerických analýz. Díky složitosti problému, jeho geometrii a obsáhlosti nelze daný problém řešit analyticky. Pro popis jednotlivých aspektů včetně vlivu rychlosti zatěžování na mechanické vlastnosti materiálů jsou nutné i odpovídající experimenty. Pro teoretické řešení problému jsou použity výpočtové analýzy, založené na metodě konečných prvků (MKP). Potřebné materiálové charakteristiky a verifikace výsledků výpočtových analýz jsou provedeny experimentálně. Výsledné řešení je tedy složeno z kombinace výpočtové a experimentální mechaniky těles. Pro řešení numerických analýz je použit software LS-DYNA, který byl převážně vyvinut pro výpočtové modelování velmi rychlého zatěžování. V experimentální praxi jsou použita zařízení pro tahové zkoušky materiálů, vlastní experimentální zařízení pro zkoušení odolnosti přírub při rázovém zatížení a další.

4 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

Základním problémem je pro téma této práce stanovení adekvátního výpočtového modelu rázového zatížení plastové komponenty palivového systému. V řešení problému je zaveden systém jednotlivých, dílčích výpočtových modelů pro geometrii, materiál, zatížení, prostředí, okrajové podmínky, interakci s ostatními tělesy apod. V rámci doktorské práce jsou tyto výpočtové modely detailně popsány, často i s problémy, které se řešily při vytváření jednotlivých dílčích modelů. V této kapitole jsou uvedeny důležité dílčí varianty výpočtových modelů materiálu, včetně výsledků experimentů.

4.1 Výpočtové modely polymerního materiálu

4.1.1 Základní model TSCP – elasticita [27]

Elastické chování polymerních materiálů má jisté charakteristické znaky. Odlišnost je zde i v měření elastických konstant dle Hookova zákona. Měření elastických konstant E – *Youngův modul (Modul pružnosti v tahu)*, μ – *Poissonův poměr* pro polymerní materiály předepisuje norma ČSN EN ISO 527. Polymerní materiály mají obecně velké rozpětí tuhostí, tedy i elastických konstant, ovšem jsou značně nižší než např. u oceli ($E=210000$ MPa). V praxi je tedy nutné mít jednotný postup pro měření nízkých hodnot Youngova modulu, aby bylo vyloučeno riziko, že měření bude nepřesné a ovlivněné upnutím v přípravku, či nelineárním viskoplastickým chováním polymerů. Modul pružnosti v tahu pro termoplastické polymery je dán následujícím vztahem:

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad [MPa] \quad (4.1)$$

kde σ_1, σ_2 je napětí odpovídající podélnému přetvoření $\varepsilon_1 = 0,05\%$ a $\varepsilon_2 = 0,25\%$. V literatuře bývá také tento modul pružnosti nazýván jako **Sečný modul pružnosti**. V rámci měření bylo také provedeno měření se vzorky, které byly vystaveny různým vlivům, např. absorpci vody (kondiciace vzorku), předstárnutí (autoclave), plně dokrystalizované vzorky, čerstvé po vystříknutí, zpevnění před-deformací apod. Měření bylo provedeno pro dvě různé rychlosti zatížení (kvazistatická) $v_s=0.2$ mm/s (dynamická) $v_d=1000$ mm/s. Výsledky jsou shrnuty v následující Tab. 4.1.

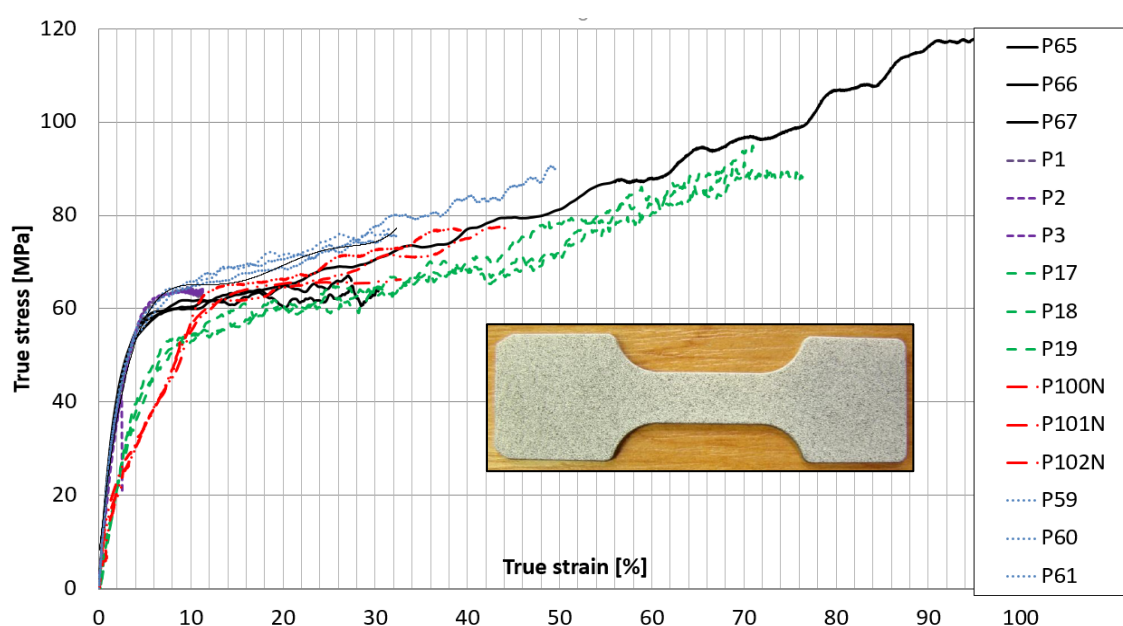
Hypotéza 1:

Z výše uvedených výsledků lze určit jednotlivé vztahy mezi okrajovými podmínkami a výsledky tahové zkoušky. Jako vztažné vzorky uvažujeme P65-P67 a R68-R70. Lze konstatovat, že největší vliv na výsledky modulu pružnosti v tahu má proces Autoclave (tzn. proces před-stárnutí, ponoření v palivu za zvýšené teploty), v tomto případě je modul pružnosti téměř poloviční. U efektu před-deformace, kdy byly tahové tělíska předepnuty před samotnou zkouškou o 15% původní délky, je efekt

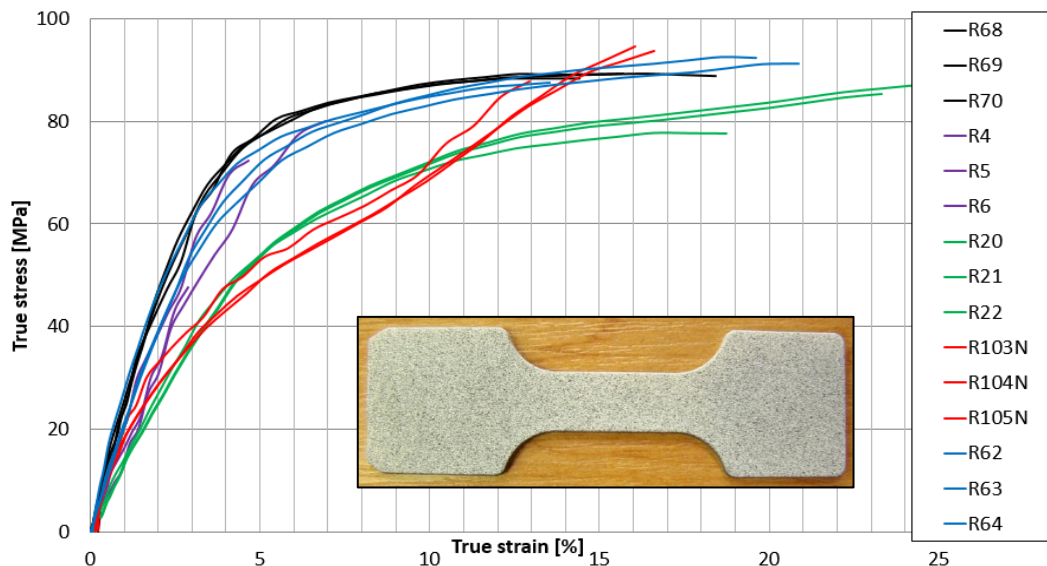
zřejmý. Materiál během tohoto procesu zpevnil, a jelikož byla deformace větší než mez elastické deformace, tak změny v materiálu byly nevratné. Opačný efekt se objevuje u vzorků, které byly vystaveny creepové deformaci, zde je analogie zcela opačná (změkčení). U vzorků, které byly vystříknuty již s předstihem před zkouškou, proběhla dokrystalizace (ustálení vazeb v materiálu). Jako poslední lze posoudit vliv rychlosti zatížení, zde je patrný a očekávaný efekt zvýšení modulu pružnosti, pro všechny stavy materiálu. Tento efekt je dán viskoplastickým chováním zkoušeného materiálu.

Stav vzorků	Vzorek v_s	E [MPa] (v_s)	E [MPa] avg. (v_s)	Vzorek v_d	E [MPa] (v_d)	E [MPa] avg. (v_d)
Creep ()	P1	2275	2292	R4	2200	2208
	P2	1950		R5	2450	
	P3	2650		R6	1975	
Autoclave	P17	1400	1400	R20	-	1850
	P18	1625		R21	-	
	P19	1175		R22	1850	
Před-deformace (15%)	N100	-	2725	N103	2375	2788
	N101	2700		N104	3075	
	N102	2750		N105	2500	
Plná dokrystal.	P59	-	2700	R62	2150	2725
	P60	2700		R63	3300	
	P61	-		R64	2400	
Volně skladované	P65	2150	2542	R68	-	2850
	P66	2900		R69	3000	
	P67	2575		R70	2700	

Tab. 4.1: Výsledky měření modulu pružnosti v tahu pro různé rychlosti zatížení



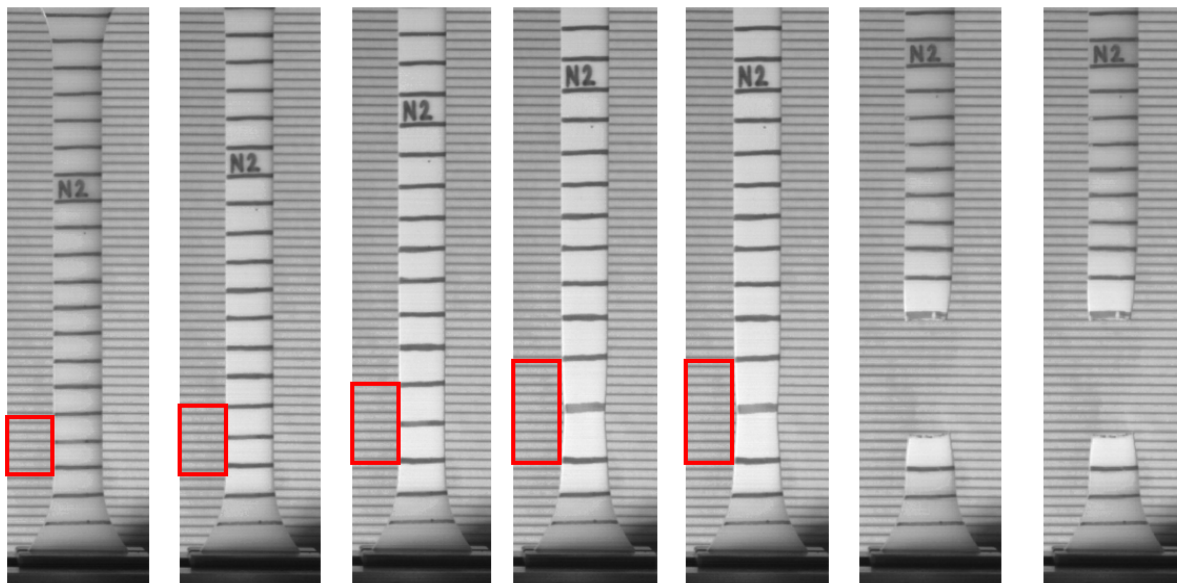
Obr. 4.1: Deformační křivky pro rychlost $v_s=0,2$ mm/s (True Strain – True Stress)



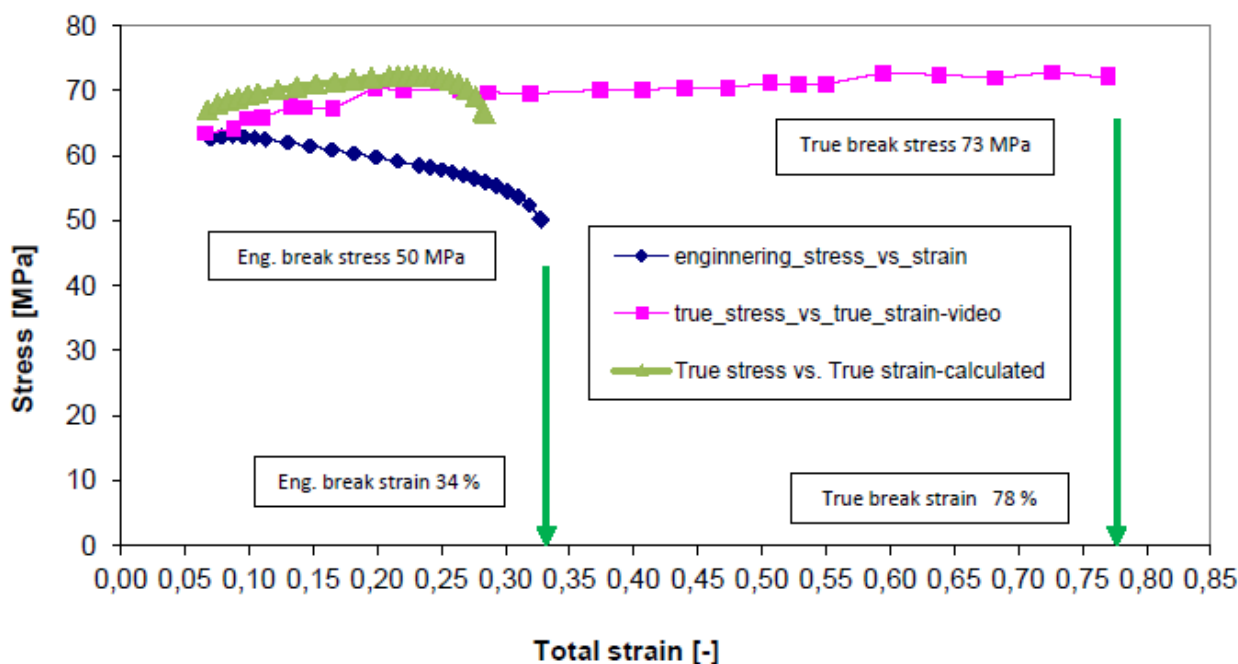
Obr. 4.2: Deformační křivky pro rychlost $v_d=1000$ mm/s (True Strain – True Stress)

4.1.2 Základní model TSCP – plasticita [33]

Pro základní model elasto-plastického chování materiálu byly provedeny tahové zkoušky do porušení. V základní verzi pouze pro statické zatížení, rychlost přírůstku deformace $\dot{\varepsilon}=10^{-4}$ mm⁻¹. V dalších, více pokročilých modelech jsou měřeny tahové zkoušky pro různé rychlosti deformace. Jako zásadní problém před provedením prvních experimentů se jeví měření tzv. skutečných hodnot napětí a přetvoření (deformace). Pro první experimenty byla vytvořena metodika měření deformace a napětí na určité vzdálenosti $l=2-5$ mm, díky nanesenému rastru na zkušební tělese. Díky tomuto přístupu, který byl publikován v příspěvku [31] se podařilo přiblížit pokročilým metodám, jako je DICM (Digital Image Correlation Method), nebo měření deformací pomocí extenzometrů (mechanické měření deformace).



Obr. 4.3: Měření skutečných hodnot napětí a přetvoření (deformace) vlastní metodou – vysokorychlostní kamera s vlastním algoritmem grafického zpracování obrazu



Obr. 4.4: Srovnání různých přístupů měření relativní deformace (strain)

Na Obr. 4.4 je zobrazena vlastní metoda vyhodnocení napětí a deformace společně s dosaženými výsledky při vyhodnocení tahové zkoušky dle ISO 527. Je zřejmé, že především v oblasti plastického chování materiálu obdržíme zcela odlišné výsledky. Materiálový výpočtový model materiálu dle vlastního vyhodnocení poskytuje přesnější popis deformačně-napjatostního chování materiálu pro různé inženýrské úlohy. Je vhodné si na tomto místě uvést jednotlivé možné přístupy výpočtu napětí a podélného prodloužení (přetvoření) z tahové zkoušky.

Dle normy ISO 527 je základní výpočet napětí a přetvoření definován následovně:

$$\sigma = \frac{F}{S_0} [MPa] \quad \varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} [-] \quad (4.2)$$

odlišný způsob výpočtu napětí a přetvoření je uveden následujícími rovnicemi:

$$\varepsilon_{nom} = \varepsilon_{nom,elastic} + \varepsilon_{nom_plastic} \quad (4.3)$$

$$\varepsilon_{true,plastic} = \varepsilon_{true} - \sigma_{true} / E \quad (4.4)$$

$$\sigma_{true} = \sigma_{nom} (1 + \varepsilon_{nom}) \quad (4.5)$$

$$\varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (4.6)$$

Jedno z prvních experimentálních měření viskoplastického chování materiálu TSCP proběhlo na stejné sadě vzorků jako v předešlé kapitole. Měření bylo provedeno pro různé rychlosti deformace $v_s=0.02\text{mm/s}$ a pro $v_d=1000\text{mm/s}$. Pro komplexní popis plasticity na dané úrovni byla provedena tahová zkouška do porušení, tudíž již bylo možné stanovit potřebné mechanické charakteristiky:

$R_{p0.2}$...Smluvní mez kluzu, R_m ...Mez pevnosti, A_{DIC} ...max. přetvoření (DICM)

dle ISO 527 – Engineering Stress

Stav vzorků	Vz. v_s	$R_{p0.2}/R_m$ [MPa] (v_s)	$R_{p0.2}/R_m$ (v_s) avg. [MPa]	Vz. v_d	$R_{p0.2}/R_m$ [MPa] (v_d)	$R_{p0.2}/R_m$ (v_d) avg. [MPa]
Creep ()	P1	34,3 / 58,7	31,8 / 52,4	R4	-	55,6 / 71,9
	P2	31,4 / 58,8		R5	58,6 / 69,0	
	P3	29,7 / 39,6		R6	52,5 / 74,7	
Autoclave	P17	33,2 / 49,8	34,8 / 50,6	R20	33,2 / 68,8	33,2 / 67,7
	P18	36,8 / 52,2		R21	34,4 / 68,2	
	P19	34,3 / 49,9		R22	32,1 / 66,0	
Před-deform. (15%)	N100	-	13,8 / 55,6	N103	25,1 / 77,1	23,7 / 79,0
	N101	14,6 / 56,8		N104	24,2 / 79,4	
	N102	12,9 / 54,2		N105	21,7 / 80,4	
Plná dokrystal.	P59	31,6 / 60,2	32,1 / 59,7	R62	38,7 / 76,0	37,1 / 77,1
	P60	31,6 / 60,1		R63	35,5 / 77,2	
	P61	33,2 / 58,6		R64	37,2 / 78,1	
Volně sklad.	P65	34,1 / 55,2	33,7 / 55,8	R68	50,8 / 78,7	49,8 / 78,8
	P66	35,2 / 55,8		R69	49,6 / 79,0	
	P67	32,0 / 56,5		R70	49,1 / 78,6	

Tab. 4.2: Výsledky viskoplast. vlastností pro materiál TSCP – mez kluzu $R_{p0.2}$, mez pevnosti R_m

Hypotéza 2:

Z uvedených výsledků v Tab. 4.2 lze pozorovat hlavní posun hodnot napětí (mez kluzu, mez pevnosti) směrem vzhůru v závislosti na rychlosti deformace, jedná se zde o významný rozdíl v plastické části chování materiálu. Lze zde říci, že materiál nedostatečně rychle reaguje na vysokou rychlost deformace, jedná o stejný efekt, jako se objevuje při stlačování tlumiče „čím rychleji tlumič stlačuji, tím větší klade odpor“. Tento efekt se vyskytuje jak v elastické složce deformace, tak především právě v plastickém chování materiálu. Další fenomén, který zde můžeme pozorovat, je zkrácení maximální celkové relativní deformace (přetvoření). Jedná se o tzv. křehnutí materiálu za vysokých rychlostí deformace. Opět se zde jedná o viskoplastické chování materiálu. Porovnání výsledků maximální celkové deformace, která byla vyhodnocena pomocí DICM je zobrazeno v

Tab. 4.3. *červeně označené hodnoty nebyly uvažovány při výpočtu průměrné hodnoty veličiny. Zapsané výsledky jsou brány jednak do okamžiku porušení vzorku, či okamžiku, kdy ještě metoda DICM byla schopná rozeznat pole deformací na optické mřížce chaotického nástřiku

dle DICM True Strain

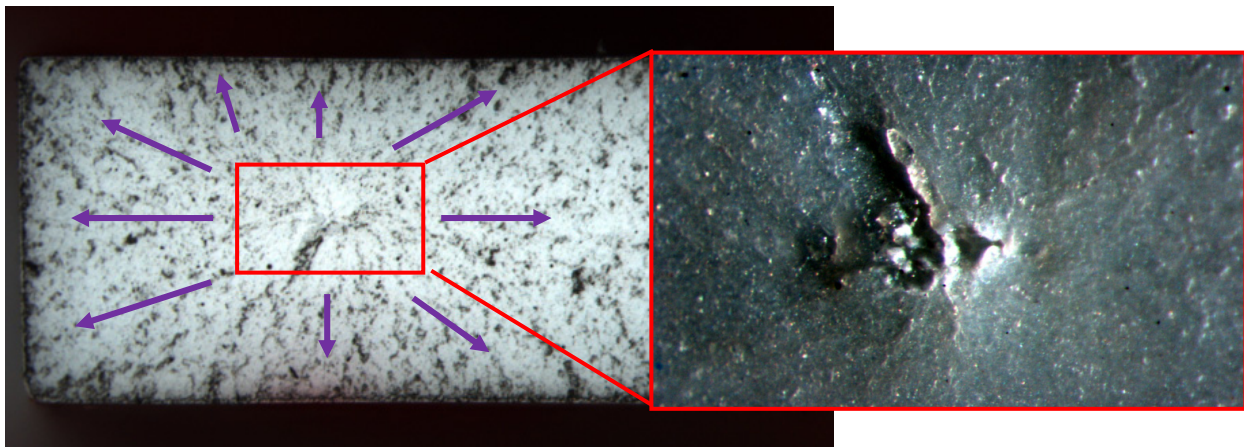
Stav vzorků	Vz. v_s	A_{DCIM} [%] (v_s)	A_{DCIM} (v_s) [%]	Vz. v_d	A_{DCIM} [%] (v_d)	A_{DCIM} (v_d) [%]
Creep ()	P1	2,8	11,5	R4	2,9	4,9
	P2	11,2		R5	4,6	
	P3	11,7		R6	7,2	
Autoclave	P17	78,2	74,6	R20	24,2	21,8
	P18	71,3		R21	23,5	
	P19	74,5		R22	17,8	
Před-deformace (15%)	N100	33,2	38,7	N103	13,1	15,2
	N101	39,1		N104	16,0	
	N102	43,8		N105	16,5	
Plná dokrystal.	P59	32,2	38,3	R62	21	17,8
	P60	49,8		R63	13,1	
	P61	33,1		R64	19,4	
Volně sklad.	P65	31,5	110,2	R68	14,4	16,0
	P66	29,8		R69	15,2	
	P67	110,2		R70	18,5	

*červeně označené hodnoty nebyly uvažovány při výpočtu průměrné hodnoty veličiny

Tab. 4.3: Výsledky viskoplast. vlastností pro mat. TSCP – max. celková deformace A_{DCIM}

Hypotéza 3:

Fenomén viskoplastického chování materiálu TSCP je vidět v Tab. 4.3. Zde můžeme vidět, že v některých případech maximální dosažená deformace při poškození se značně lišila. Tento efekt je jistě způsoben kvalitou jednotlivých vzorků. V každém vzorku se vyskytuje určité procento/promile nečistot apod. Tyto heterogenity způsobují často právě místo iniciace porušení. Jako důkaz této hypotézy je zde uveden záznam z mikroskopické analýzy vzorku po zkoušce. Hodnota maximální deformace při porušení je jedna z hlavních mechanických veličin, která je takto sensitivní na kvalitu vzorku.



Obr. 4.5: Mikroskopická analýza lomu – iniciace poškození a směr šíření trhliny

4.1.3 Základní model TSCP – rychlost deformace

V této variantě modelu materiálu budeme vycházet a navazovat na předešlé kapitoly. Ovšem viskózní vlastnosti materiálu budou stanoveny odlišnou metodikou a experimenty. V rámci doktorské práce byla navázána úzká spolupráce s firmou 4AEngineering z Rakouska, která se zabývá experimentálním stanovením mechanických vlastností materiálů včetně mapování numerických materiálových modelů na experimentální výsledky. První společný projekt byl zaměřen na stanovení numerického materiálového modelu TSCP se závislostí rychlosti deformace a to pro široký rozsah rychlostí deformace ($\dot{\epsilon} = 0.001-1000s^{-1}$). Optimalizační proces, který je nasazován při samotném tvoření numerického modelu materiálu dokáže zohlednit typ konečného prvku (shell, solid), počet integračních bodů a také velikost prvku. Po vzájemné diskuzi byly stanoveny požadované výsledky a vypracován plán experimentů.

Cílené typy konečných prvků:

Element type SHELL 16 (LS-DYNA), fully integrated, element size 2mm

Element typ SOLID 16 (LS-DYNA), 10-noded tetrahedron, element size 0.6mm

Rozsah rychlostí deformace:

$\dot{\epsilon} = 0.001-50s^{-1}$, testovaný rozsah; požadovaný rozsah $0.001-1000s^{-1}$, bude aproximován pomocí analogie s Johnson Cook modelem

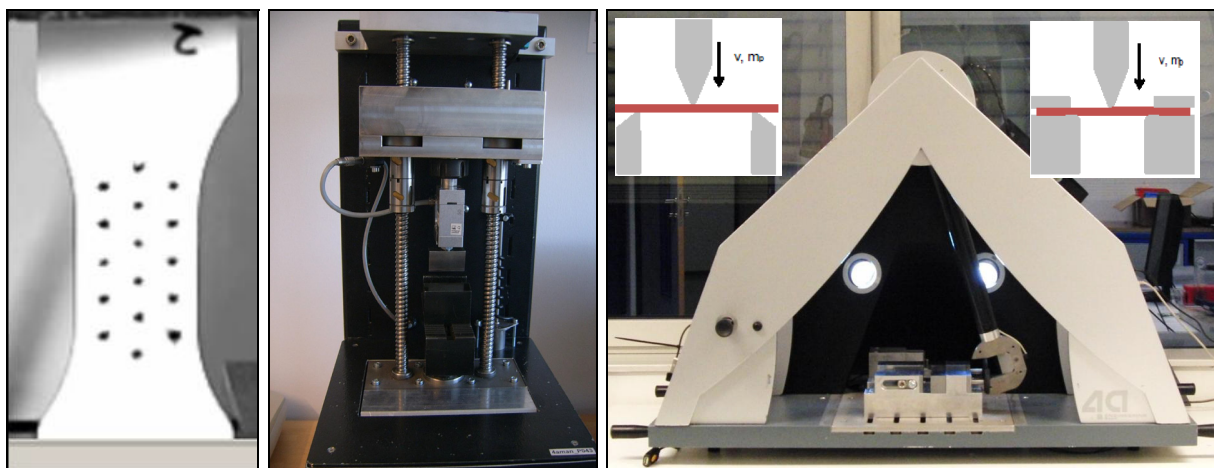
Experimenty nutné pro testovaný rozsah rychlostí deformace:

Statická tahová zkouška, Statický 3-bodový ohyb, Dynamický 3-bodový ohyb, Dynamický 3-bodový ohyb s fixací. Testovací plán je uveden na Tab. 4.4.

type of test	temperature [°C]	testing speed [m/s]	bearing distance [mm]	thickness [mm]	expected starting strain rate	quantity
static 3PB	23	0.0001	40	2	0.001	5
static 3PB	23	0.001	40	2	0.008	5
dynamic 3PB	23	1	40	2	7.500	5
dynamic 3PB	23	3	40	2	22.500	5
dynamic 3PB	23	5	40	2	37.500	5
dynamic 3PB	23	4	30	2	53.333	5
dynamic 3PBG	23	3	50	2	14.400	5
static tensile test	23	0.0002	50	2	0.001	5

Tab. 4.4: Testovací plán pro zjištění deformačních křivek se závislostí na rychlosti def.

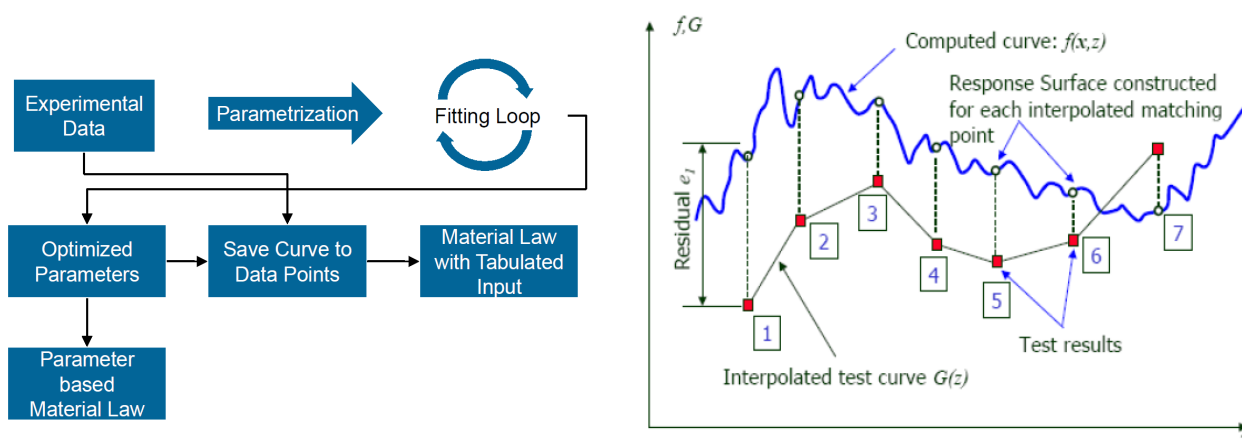
Tahová zkouška byla provedena na klasickém trhacím stroji. Statický třibodový ohyb byl realizován na zařízení stejného typu s vyměnitelným upínacím přípravkem. Pro dynamické zkoušky bylo použito modifikované SHARPYHO kladivo s komerčním názvem IMPETUS. Deformace byly vyhodnocovány pomocí DICM, ovšem modifikované na danou vzdálenost $l=2mm$. Pro názornost jsou zde uvedeny příklady jednotlivých zařízení na Obr. 4.6.



Obr. 4.6: a) DCIM rastr b) Statický 3-bodový ohyb, c) Impetus – dynamický 3-bodový ohyb bez a s fixací [28]

Optimalizace parametrů numerického modelu materiálu

Pro optimalizační proces parametrů numerického modelu materiálu TSCP byla použita korelace mezi numerickým modelem materiálu a experimentálními výsledky ze všech provedených zkoušek. S tím, že v této fázi vývoje materiálu, není uvažován vliv asymetričnosti deformačních křivek pro tah/tlak. Pro optimalizaci byla použita metoda minimalizace středních odchylek, jak je naznačeno na Obr. 4.7.



Obr. 4.7: Schéma procesu optimalizace – reverse engineering [28]

Optimalizační technika je postavena na srovnání střední odchylky v odezvě síla-posuv a to pro numerickou simulaci, která je vždy porovnávána s experimentální křivkou. Pro numerický model materiálu je zde použito několik teoretických vztahů, kterými lze efektivně pracovat v prostoru optimalizačních technik. Je nutné definovat vztah mezi napětím a přetvořením, tak aby se v tomto vztahu vyskytovaly proměnné. Tyto proměnné lze v průběhu iterací měnit, tak abychom dostávali stále spojitou funkci. Pro tyto účely je zde použit vztah dle Schmachtenberga (4.7). Dále je zde použita definice rychlostní závislosti dle části Johnson Cookovy rovnice (Strain-rate dependence), vztah (4.11).

Algoritmus minimalizace funkce vyhodnocuje hodnotu střední odchylky mezi num. modelem a experimentem, dle vztahu (4.8) až (4.10):

$$\sigma = E\varepsilon \frac{1 - D_1\varepsilon}{1 + D_2\varepsilon} \quad (4.7)$$

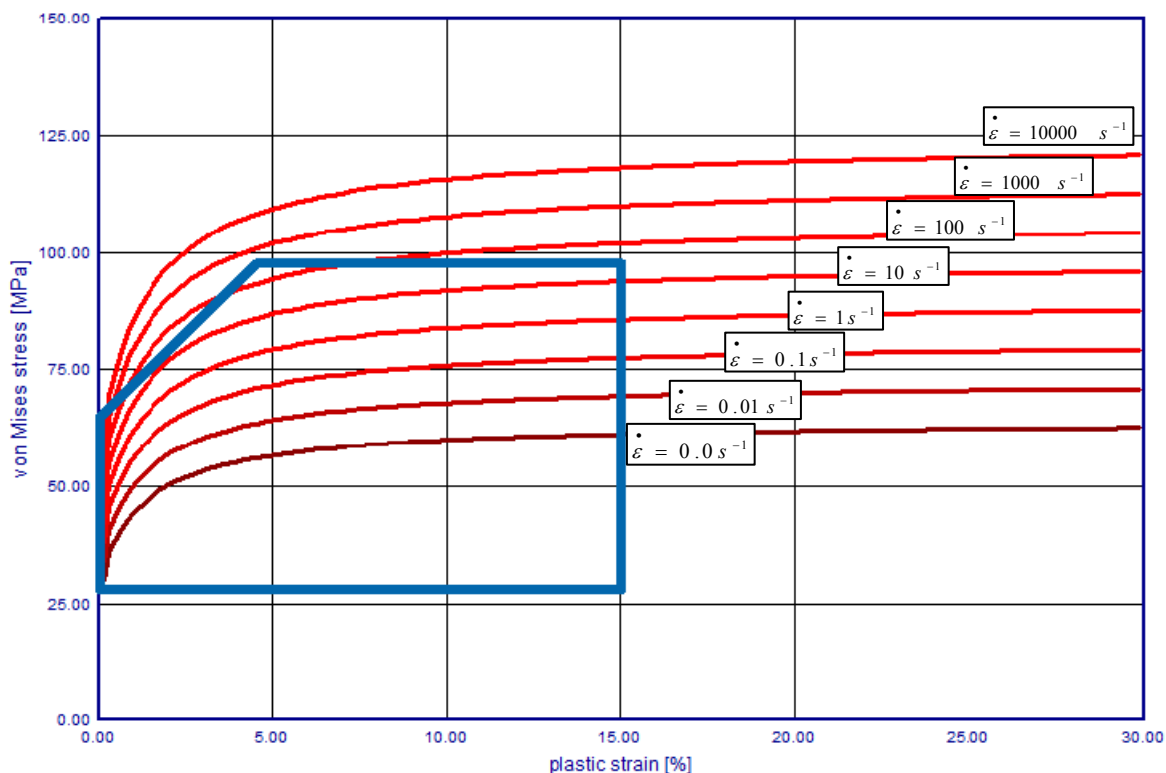
Parametry D_1, D_2 jsou proměnné při optimalizaci numerického modelu.

$$S(E, D_1, D_2) := \sum_{k=1}^n \left[\sigma_k(\varepsilon_k) - E\varepsilon \frac{1 - D_1\varepsilon}{1 + D_2\varepsilon} \right]^2 \rightarrow \text{MIN} \quad (4.8)$$

$$x^{k+1} = x^k - \alpha \nabla S^k, x^k = [E, D_1, D_2]^k \quad (4.9)$$

$$\nabla S^k = \left[\frac{\partial S}{\partial E}, \frac{\partial S}{\partial D_1}, \frac{\partial S}{\partial D_2} \right]^k \quad (4.10)$$

$$\sigma_y(\dot{\varepsilon}, \varepsilon_p) = \sigma_y(0, \varepsilon_p) \left[\frac{1 + \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C}\right)}{p} \right] \quad (4.11)$$



Obr. 4.8: Numerický model materiálu TSCP se závislostí na rychlosti deformace (plastická část)

4.1.4 Základní model TSCP – porušení [35]

V určitém smyslu můžeme v tomto odstavci hovořit o základním modelu porušení pro TSCP materiál. Podstata je v možnosti predikovat porušení a graficky ho interpretovat, ovšem v tomto případě se nejedná o komplexní materiálový model s porušením, který by v sobě zahrnoval akumulaci porušení, vliv triaxiality, vliv změkčení/zpevnění materiálu apod.

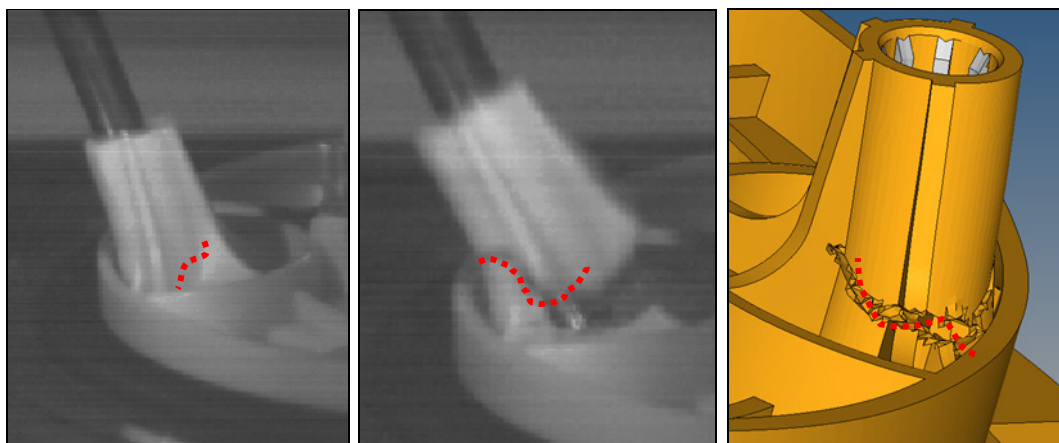
Failure model (Model vzniku porušení) – porušení se v numerickém modelu začíná rozvíjet, pokud parametr porušení dosáhne své kritické hodnoty

$$\omega_D = \int_0^{\varepsilon^P} \frac{d\varepsilon^P}{\varepsilon_D^P} \quad (4.12)$$

Damage model (Model poškození) – poškození, či skoková změna tuhosti materiálu nastává, pokud funkce poškození dosáhne svého maxima (kumulace poškození),

$$\dot{D} = \frac{\dot{u}^P}{\frac{\partial u_f^P}{\partial D}} \quad (4.13)$$

přičemž ω_D je parametr iniciace porušení, ε^P je plastické přetvoření, D je funkce poškození, u^P je posuv odpovídající příčinnému plastickému přetvoření. V tomto základním modelu porušení jde o určitý empiricky stanovený numerický model, jehož základ je ve stanovení parametrů vzniku porušení bez kumulace poškození. Výchozím testem pro stanovení parametrů modelu byla zkouška rázové odolnosti příruby – Impact Test, který byl i v rámci této doktorské práce vyvinut k výzkumným účelům v oblasti rázového namáhání plastových komponent palivového systému. Průběh zkoušky byl snímán vysokorychlostní kamerou se snímkováním cca $f=15000s^{-1}$. Na základě tohoto záznamu byl přesně stanoven okamžik vzniku porušení a místo prvotní iniciace. V tomto okamžiku bylo úkolem použít dostupný jednoduchý model eroze konečných elementů v LS-DYNA. Jako efektivní se nabízí použít kartu `*MAT_ADD_EROSION` k dosavadnímu viskoplastickému modelu.



Obr. 4.9: Porovnání místa iniciace a průběhu deformace vodící tyčky v čase

Výše zmíněná dodatečná materiálová karta poskytuje volbu několika parametrů, kterými lze řídit samotné porušení. Pro účely této práce a vzhledem k tomu, že jsou zde řešeny polymerní materiály, kde jde ve většině případů o porušení v tahové oblasti namáháním, byly zvoleny dva parametry. Ty jsou v průběhu výpočtu vyhodnoceny. Jedná se o maximální tahové napětí ($S1max$) a o maximální tahové přetvoření ($Eptol$). Několikanásobnou variací těchto dvou parametrů, které musí být splněny vždy společně, jsme získali konečné hodnoty $S1max=100MPa$ a $Eptol=10\%$. Při nastavení těchto hodnot v materiálové kartě jsme pro patřičnou rychlost testu obdrželi velmi uspokojivou korespondenci mezi místem vzniku porušení a časem iniciace porušení. Tento koncept modelu porušení byl testován pro dva různé designové koncepty příruby a to pro koncept s plastovými vodícími tyčkami a pro koncept s ocelovými tyčkami. Tímto způsobem verifikace se částečně také otestovala robustnost řešení problému.

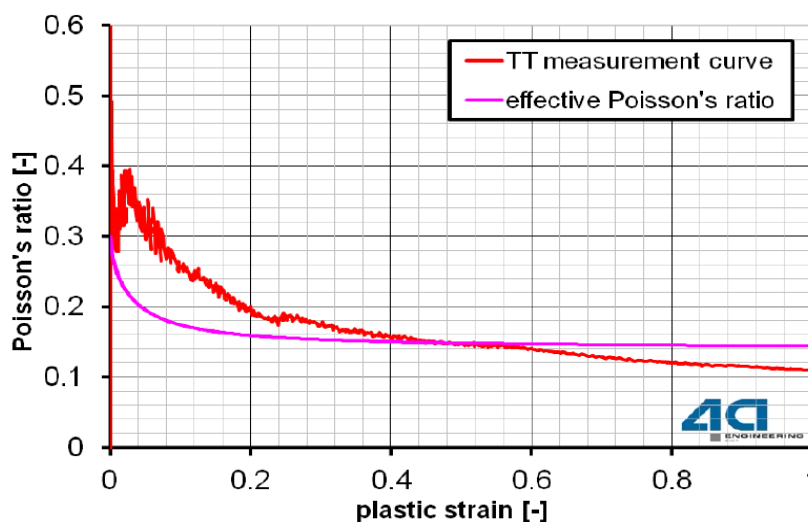
*MAT ADD EROSION								
\$#	mid	excl	mxpres	mneps		numfip		
	101000					1		2
\$#	mnpres	sigp1	sigvm	mxeps	epssh	sigth	impulse	failtm
	0.000	100.000	0.000	0.1				

Obr.4.10 Schéma nastavení mater. karty pro erozi elementů - *MAT_ADD_EROSION

4.1.5 Pokročilý model materiálu (*MAT_SAMP-1) [1], [9]

V předchozích podkapitolách jsme se zabývali dílčími vlastnostmi numerického modelu materiálu pro účely řešených úloh. V závěrečném komentáři byly zmíněny i nedostatky těchto modelů, popř. kombinace modelů. V posledních letech se sofistikovanějšími modely pro polymerní materiály zabývají poměrně intenzivně i vývojáři konečno-prvkových řešičů. LS-DYNA nabízí poměrně širokou škálu materiálových modelů, k verzi 9.0.0. jich čítá přes 320 různých typů. V každé nově uvolněné verzi se objevují nové typy modelů materiálů. Pro lepší orientaci v numerických modelech materiálů vhodných pro polymery je vhodné si zde uvést zjednodušený výčet jednotlivých typů. Pro účely této doktorské práce je pracováno dále pouze s materiálovým modelem *MAT_SAMP-1, což je klíčové slovo pro *Semi-Analytical Model for the Simulation of Polymers*. Tento model materiálu byl implementován do knihovny numerických modelů materiálů v roce 2005 a dodnes je neustále aktualizován a vývoj jeho pokročilejších funkcí stále pokračuje. Tento model materiálu v sobě dokáže obsáhnout mnoho materiálových mechanických vlastností, které jsou pro polymerní materiály důležité, např. vliv rychlosti deformace, Poissonův poměr v plastické oblasti deformace, asymetrická mechanická odezva v tahu, smyku a tlaku, vliv triaxiality napětí na deformačně-napjatostní chování modelu, vliv „cesty“ zatížení (Lode Factor) a pokročilé modely porušení (GISSMO, DIEM, atd.). Na druhou stranu je nutné říci, že pokud chceme mít plně obsáhlý tento materiálový model, tak potřebuje nemalou řadu experimentů, abychom byli schopni využít celý rozsah tohoto modelu.

Na začátku vývoje tohoto pokročilejšího materiálového modelu bylo nutné stanovit, jaké podstatné dílčí experimenty bude nutno provést. V minulosti, jak je uvedeno v předešlém textu, byla navázána úzká spolupráce s rakouskou firmou 4A Engineering, nabízelo se tedy na této bázi dále pokračovat. Jako základ nového výpočtového modelu posloužily výsledky s předešlých měření, jako např. Statické tahové zkoušky, dynamické tahové zkoušky a tří-bodové ohyby, ať už s volnými konci, či fixovanými. Tyto testy byly doplněny o stanovení mechanického chování v tlaku tzv. Puncture test, tří-bodový ohyb a stanovení plastického Poissonova poměru. Pro posouzení, zda testovací vzorky mají stejné mechanické parametry, jako materiál v původních experimentech v roce 2012 byly provedeny porovnávací testy. Jako relevantní byly vybrány následující testy: tří-bodový ohyb (vázaný, volný), tahová statická zkouška. Abychom vyloučili vliv materiálových nečistot a imperfekcí v materiálu, byly vždy v daném testu testovány 3 vzorky. Vzorky byly vystříknuty na speciálním vstřikovacím zařízení a byla zde použita přesná forma, dle požadavků na požadované zkoušky. Dále bylo provedeno srovnání experimentu a FE simulace pro nalezení plastického Poissonova poměru μ_{pl} , který vyžaduje materiálový model SAMP-1. Pro stanovení plastického Poissonova poměru byl použit vztah (4.14).

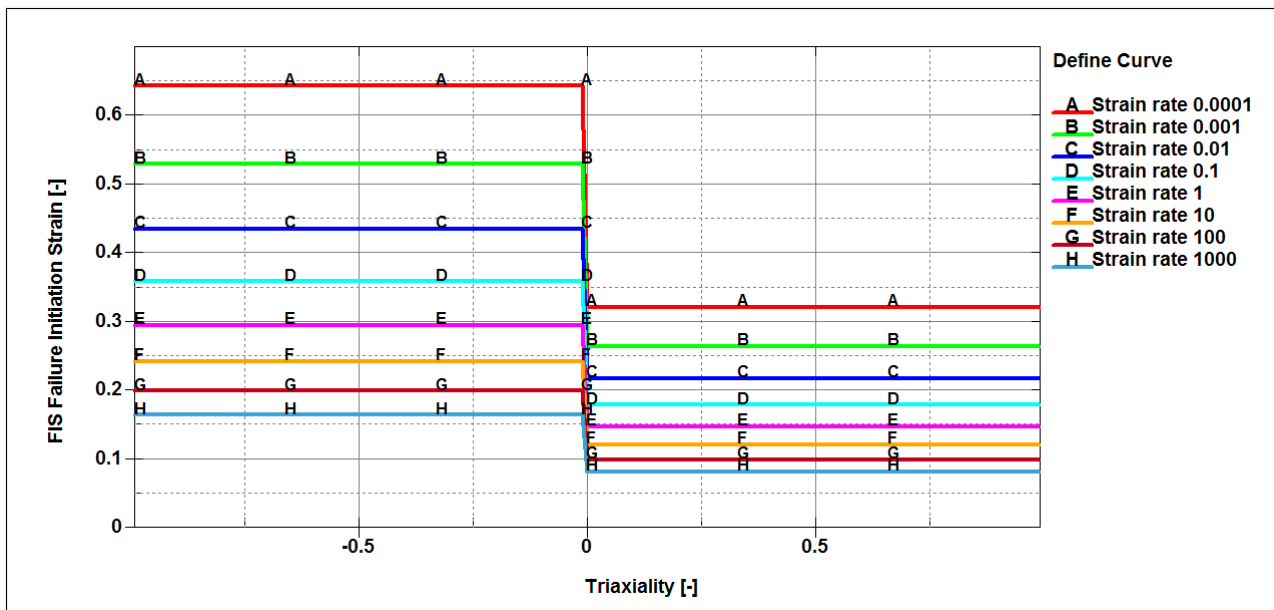


$$\mu_{RES} = \frac{\mu_{el} \varepsilon_{el} + \mu_{pl} \varepsilon_{pl}}{\varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl}}$$

(4.14)

Obr. 4.11: Stanovení efektivního Poissonova poměru z tahové zkoušky pomocí DCIM

Jak bylo řečeno v úvodu předešlé kapitoly, pokročilejší materiálové modely vyžadují poměrně velké množství experimentů. V našem případě byly k dispozici pouze omezené prostředky, tudíž nebylo možné testovat komplexní oblast triaxiality: smyk, biaxiální tah, biaxiální tlak apod. Bylo možné stanovit pouze hodnoty pro axiální tah a pomocí optimalizace CTF (Compression/Tension Factor) parametru také křivku pro axiální tlak. Model byl tedy v neměřených oblastech aproximován vždy v souladu s poslední kalkulovanou hodnotou a dále v horizontálním směru.



Obr.4.12 Výpočtový model porušení (eroze elementů) – tabelovaná varianta zadání

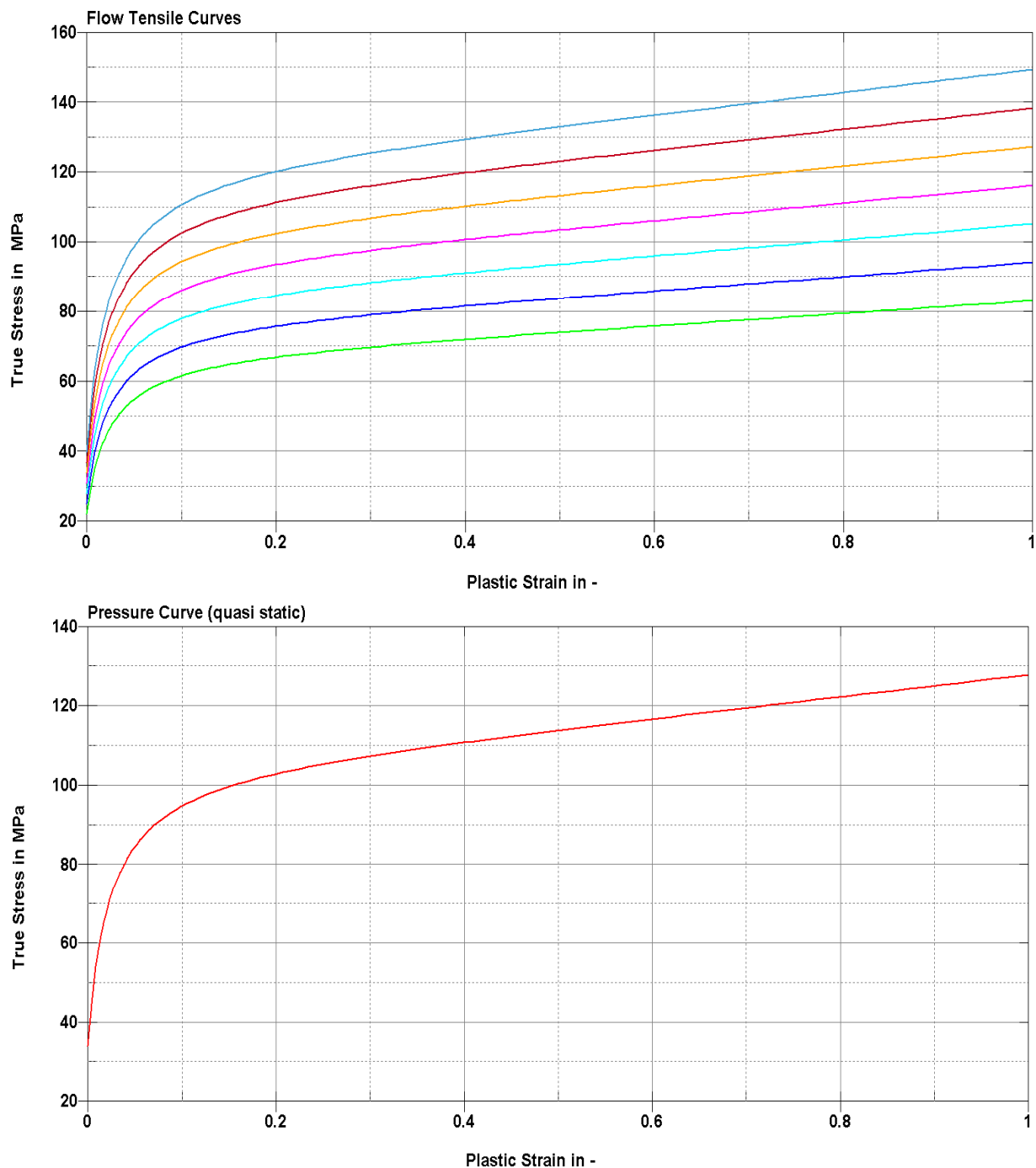
Materiálový model také zahrnuje kumulaci poškození (Damage), kde je redukována tuhost materiálu, v našem případě skokově, jelikož se jedná o křehké chování materiálu za vysokých rychlostí deformace. Přírůstek plastické deformace do úplného porušení (eroze elementů) je dán vztahy (4.15), (4.16), (4.17),

$$\omega_D = \int_0^{\varepsilon^P} \frac{d\varepsilon^P}{\varepsilon_D^P} \quad (4.15)$$

$$\dot{D} = \frac{\dot{u}^P}{\frac{\partial u_f^P}{\partial D}} \quad 0 \leq \dot{D} \leq 1 \quad (4.16)$$

$$\dot{u}^P = \begin{cases} 0 & \omega_D < 1 \\ h \dot{\varepsilon}^P & \omega_D \geq 1 \end{cases} \quad (4.17)$$

kde \dot{D} je funkce poškození, ε_D^P je FIS hodnota, $d\varepsilon^P$ je přírůstek plastického přetvoření, h je charakteristická délka elementu, \dot{u}^P přírůstek plastické deformace. Konečné odstranění elementu je tedy dosaženo, když funkce poškození \dot{D} dosáhne hodnoty $\dot{D}=1$.



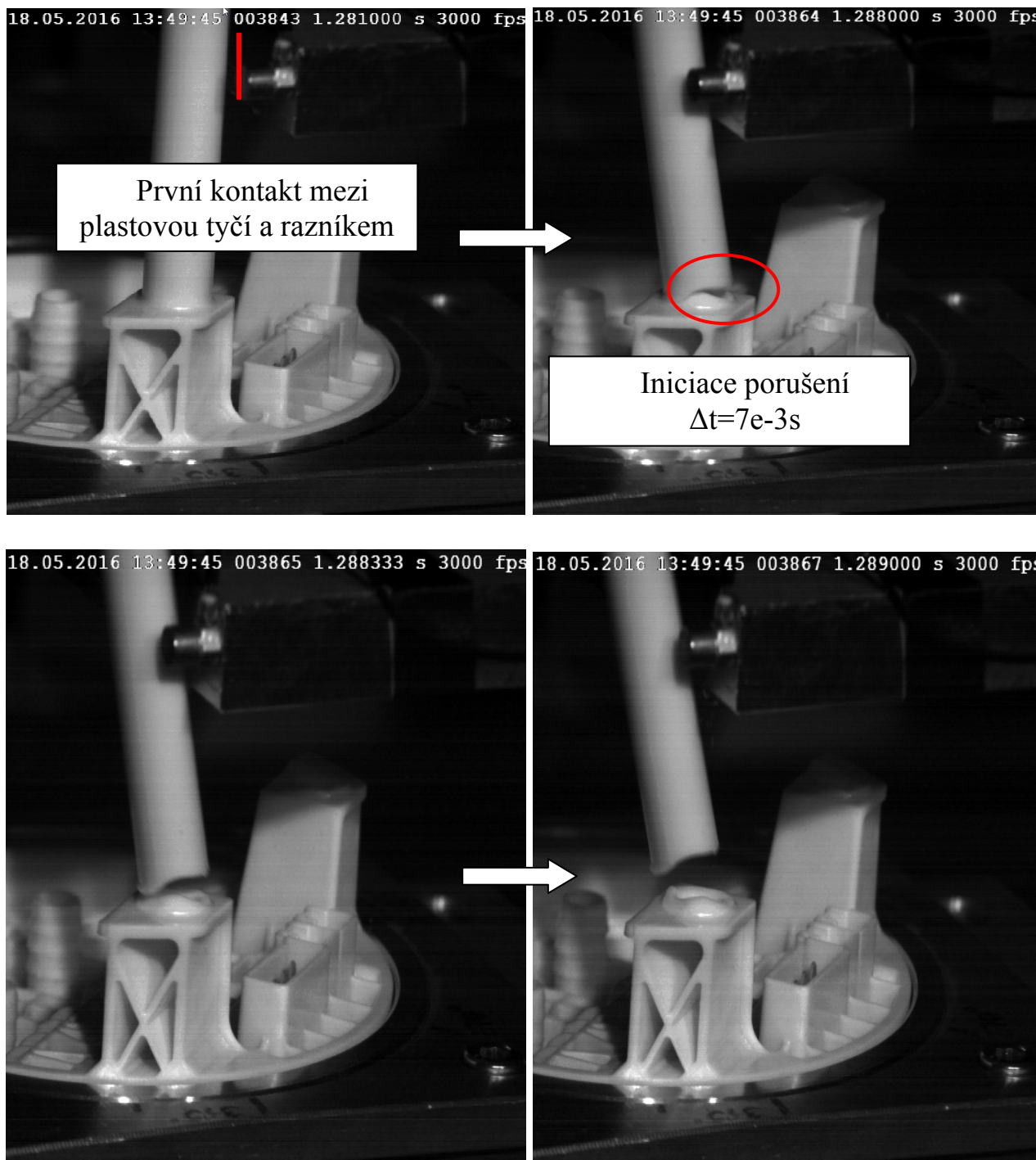
Obr.4.13 True Strain/True Stress křivky pro oblast tahu a tlaku

4.2 Experimentální verifikace výsledků

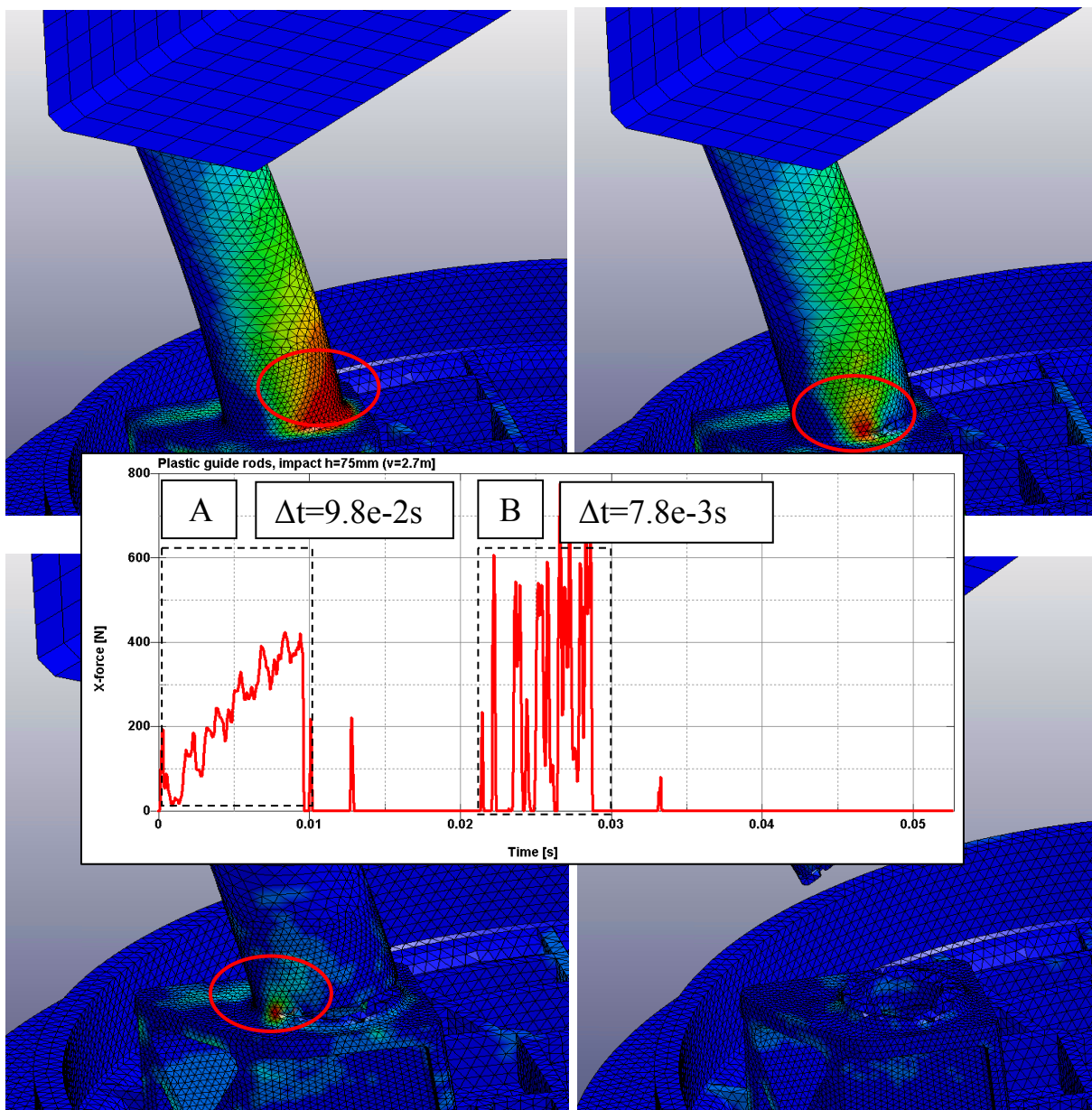
Následující podkapitoly jsou věnovány verifikaci numerického modelu FSM v praktických úlohách a různých geometrických konfiguracích. Uváženy byly také různé vývojové varianty materiálového modelu příruby, tak jak je popsáno v kompletní verzi této disertační práce.

4.2.1 *MAT_24 + *MAT_ADD_EROSION

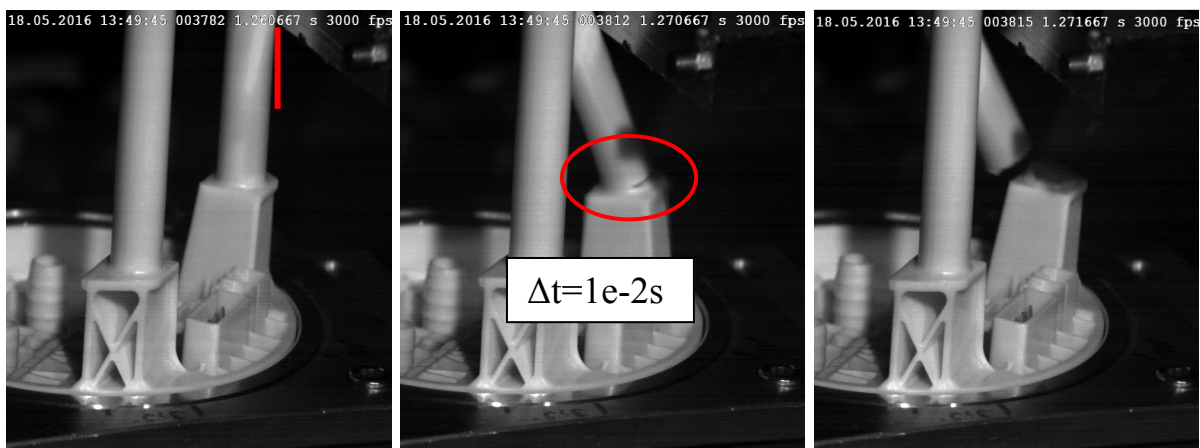
Výpočtový model byl testován ve dvou variantách FSM. Prvním z nich byl koncept plastových tyček. Pro srovnání experimentu a výpočtové analýzy bylo vždy využito záznamu vysokorychlostní kamery ke sledování okamžiku, místa iniciace a propagace porušení ve struktuře. Dílčí výsledky těchto porovnání byly již publikovány na několika odborných konferencích.



Obr. 4.14: Videozáznam z vysokorychlostní kamery (3000 fr/s), porušení vodící tyče B

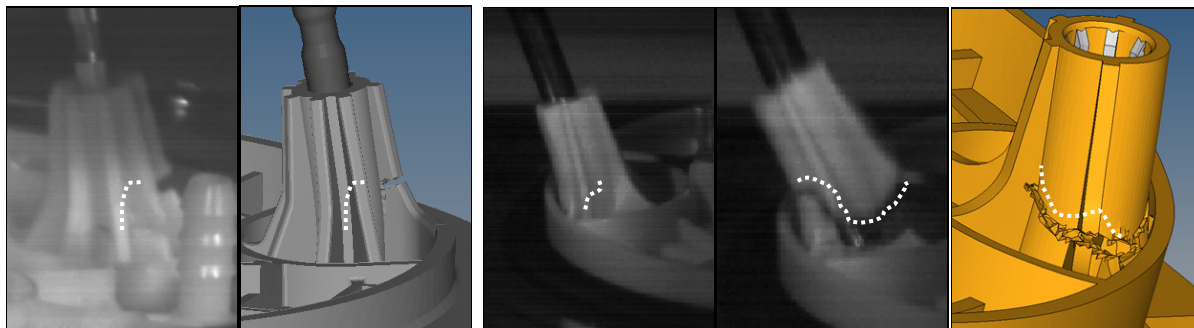


Obr. 4.15: Výpočtová analýza – iniciace porušení v čase od prvního kontaktu razníku



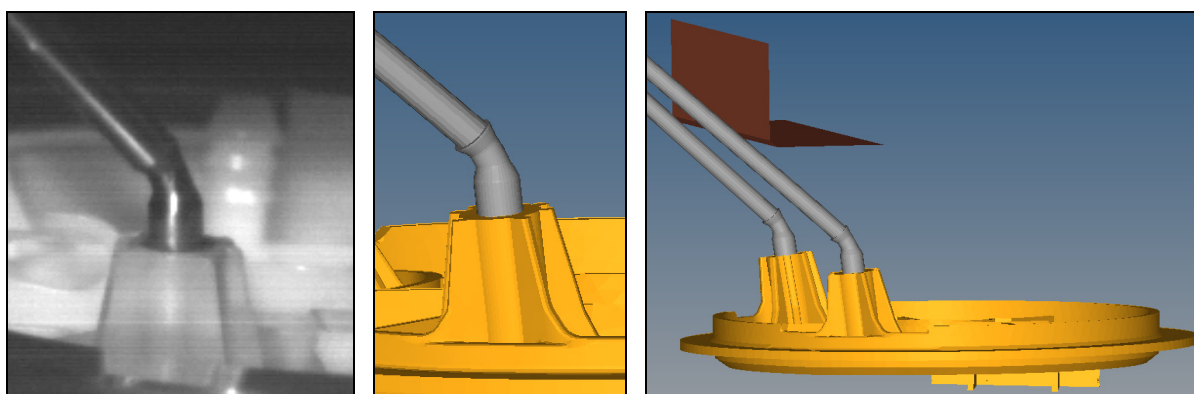
Obr. 4.16: Videozáznam porušení plastové vodící tyče A

Dalším konceptem příruby, který byl srovnáván s experimentem byla klasická příruba pro ocelové vodící tyče. V tomto experimentu bylo sledováno deformační chování pouzder pro vodící tyče a samozřejmě okamžik vzniku porušení. V tomto případě byla jako relevantní pouze deformace pouzdra při vzniku porušení a typ porušení.



Obr. 4.17: Porovnání deformačního chování pouzdra pro vodící tyč

Na Obr. 4.17 je patrné, že srovnání experimentu pomocí záznamu z vysokorychlostní kamery udává uspokojivou míru shody s numerickou simulací. Posledním konceptem, kde nebylo primárním cílem sledovat vznik porušení, jelikož dle experimentu by nemělo pro danou konfiguraci příruby porušení materiálu vůbec nastat, byl koncept vodících tyčí s vrubem. Zde se sledoval vznik plastické deformace a ohybu vrubované vodící tyče a také zda pouzdro vodící tyče vydrží tento test bez vzniku porušení. Výpočtový model poměrně přesně zachytil ohyb vodící tyče a potvrdil tak robustnost modelu.

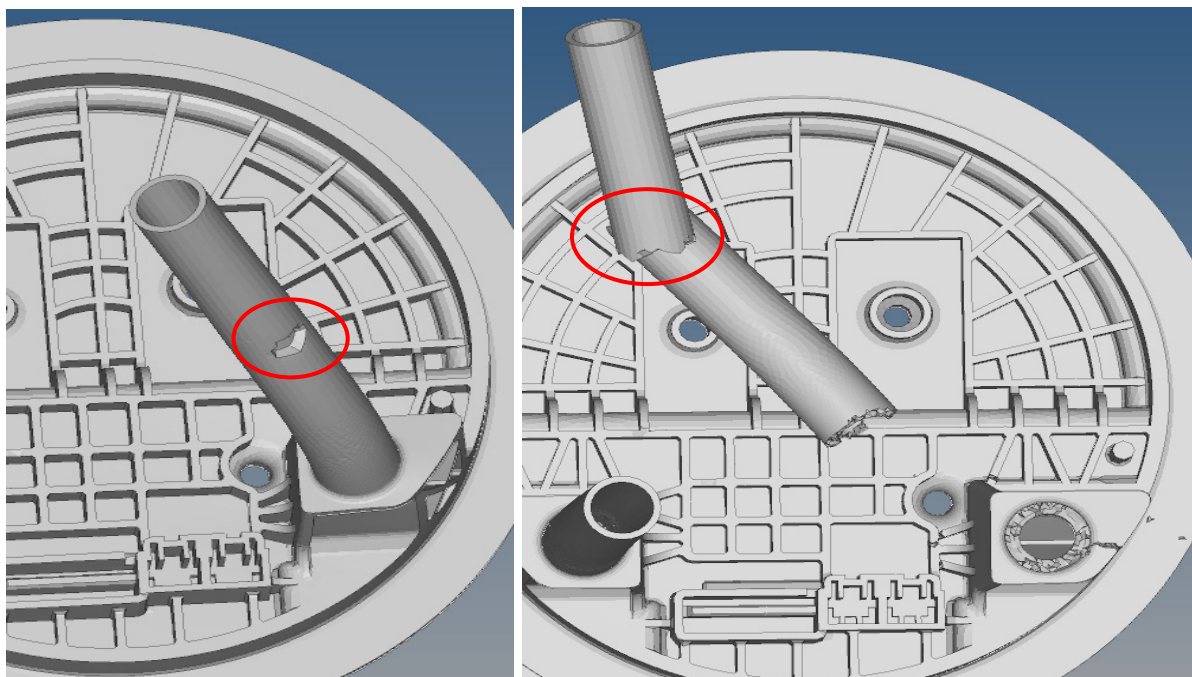


Obr. 4.18: Koncept vodící tyče s vrubem a porovnání deformací (experiment, CAE)

Poslední testovanou variantou, byla atypická příruba s nesymetrickým designem pouzdra pro vodící tyč. Zde již numerický model nebyl až tak přesný, jelikož odhalil přesné místo vzniku porušení a při odpovídající deformaci pouzdra. Ovšem šíření (propagace) trhliny v pouzdra bylo nepřesné. Díky tomuto efektu, který se u některých úloh ukazuje se začala objevovat myšlenka použití jiného sofistikovanějšího modelu porušení, např. SAMP-1. Výsledky pro tento typ modelu poškození jsou popsány v další podkapitole.

4.2.2 *MAT_SAMP-1 + DIEM [38]

Tento nejnovější model, který je v nynější době předmětem vývoje a není tak zatím použitelný pro zákaznické projekty, byl prozatím testován pouze na dvou typových úlohách. Prvním z nich je koncept plastových tyčí integrovaných přímo v přírubě. Geometrická konfigurace byla použita jako v předchozí kapitole. Výsledky byly posuzovány stejným způsobem, ovšem již při prvním testování tohoto výpočtového materiálového modelu s porušením docházelo k nefyzikálnímu chování modelu porušení. Tento problém byl již také publikován na poslední uživatelské evropské konferenci LS-DYNA (11th European LS-DYNA Conference 2017, Salzburg, Austria. Neodpovídající chování materiálového modelu bylo dáno vznikem porušení v tlakově namáhané oblasti pod razníkem, kde se v experimentu neobjevují sebemenší známky vzniku porušení materiálu. Na problému se v nynější době usilovně pracuje. Tento model je použit v dané úloze s objemovými prvky. Tento efekt, by mohl být jednou ze příčin, jelikož původní model SAMP-1 byl vyvíjen prioritně pro skořepinové prvky, byť manuál pro řešič udává, že by měl být bez problému použitelný i pro objemové prvky, ale není tomu tak. Výsledek řešení by měl být publikován v některých z navazujících odborných prací. Do problému je zapojen i další vývojářský tým řešiče RADIOSS, fa ALTAIR.



Obr. 4.19: Nefyzikální chování num. modelu při použití materiálového modelu SAMP-1

Jedno z řešení, které podporuje myšlenku chyby v numerickém modelu, spočívá v nahrazení objemových elementů (SOLID, typ 16) prvky prvního řádu, tedy bez středových uzlů (SOLID, typ 4). Při použití této záměny byl problém eliminován (zatím testováno pouze na konceptu plastových tyčí). Ovšem tento přístup není robustním a konečným řešením. Poukazuje pouze na to, kam směřovat pozornost při hledání chyby.

5 ZÁVĚR

Počáteční fáze disertační práce je věnována detailní rešeršní práci, během ní byly studovány odborné texty, články apod. z oblasti rázového zatížení, nejen polymerních materiálů. Další rešeršní činnost byla věnována výpočtovým materiálovým modelům, vhodných pro modelování rázového zatížení polymerních materiálů. Praktická část disertační práce řeší poměrně široké množství dílčích témat. Disertační práce je zpracována v duchu systémového pojetí. Tento přístup vytváření vědecké práce, a nejenom vědecké práce, vede řešitele zamyslet se nad jednotlivými dílčími problémy z několika hledisek, tak aby autor práce některá důležitá fakta neopomněl apod. Systematičnost je pak detailněji použita v praktické části při vytváření výpočtového modelu problému. Zde je problém zobrazen v systému podstatných veličin a jeho důležitých aspektech. Autor se zabývá jednotlivými výpočtovými modely do důsledku, ať už výpočtovým modelem materiálu, zatížení, vazeb či okolí.

V disertační práci je uvedeno několik numerických modelů materiálu, které byly stanoveny v rámci této práce. Použití těchto modelů bylo vždy konfrontováno s reálnými experimenty, tak aby byla zjištěna míra shody numerického modelování a fyzického chování struktur. Lze konstatovat, že v době dokončení této práce nejlépe korespondují výsledky fyzických testů s přístupem použití výpočtového materiálového modelu *MAT_24+MAT_ADD_EROSION, který byl stanoven empiricky, na základě vlastních experimentů a jejich srovnáním s numerickými analýzami pomocí záznamů z vysokorychlostní kamery. Posledním testovaným výpočtovým materiálovým modelem byl *MAT_SAMP-1, zde byly ovšem některé zvláštnosti, které zatím neumožňují plné nasazení ve výše zmiňované průmyslové praxi.

Disertační práce má částečně charakter vědecké práce z průmyslové praxe, tento efekt je jednak vázán na téma práce a na formu jakou byla zpracována. Práce tak může najít své hlavní uplatnění opět v průmyslové praxi, kde je nemalé množství podobných problémů, které jsou v této disertační práci řešeny. Čtenáři tak poskytují nejen obsáhlý teoretický základ k řešeným problémům, ale také vždy praktický příklad, tedy i určitý nadhled a praktický přístup k dané věci, který je v průmyslové praxi vždy preferován. Cíle, které si kladla za své tato práce před samotným vypracováním, se dle autora podařilo splnit. Řešené numerické úlohy jsou do jisté míry velice specifické, tzn. určeny především čtenářům znalých dané problematiky. S kombinací obecně známých teorií a přístupů numerického modelování určitě najde své čtenáře i mimo oblast palivových systémů, či pasivní bezpečnosti komponent palivového systému.

Verifikované výpočtové modely budou bezprostředně využity při návrhu a optimalizaci nových konstrukčních variant FSM v palivových systémech a případně dalších plastových komponent.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KOLLING S., HAUFE A, FEUCHT M. a P.A. DU BOIS. SAMP-1: A Semi-Analytical Model for Simulation of Polymers, 4. LS-DYNA German Forum 2005, Bamberg, Germany
- [2] NUTINI M., M. VITALI. Characterization of Polyolefins for Design Under Impact: from True stress/Local strain Measurements to the F.E. Simulation with LS-DYNA, Mat. SAMP-1. In: 7. LS-DYNA Anwenderforum. Bamberg, 2008.
- [3] VOGLER, M., S. KOLLING a A. HAUFE. A Constitutive Model for Plastics with Piecewise Linear Yield Surface and Damage. In: 6. LS-DYNA Anwenderforum. Frankenthal, 2007
- [4] ROLAND C. M., J.N. TWIGG Y. VU a P.H. MOTT. High strain rate mechanical behavior of polyurea. In: Chemistry Division, U.S. Naval Research Laboratory. Washington, DC 20378, United states, 2006.
- [5] BOŘKOVEC J., SUCHÁNEK M. Výpočtové modelování tvárného porušování kovů v simulaci technologických procesů. In: Závěrečná zpráva projektu FRVŠ 2842/2066/G1. Brno, 2006.
- [6] YAMASAKI H., NISHIMURA R. Development of Material Model for Crack Propagation of Casted Aluminum, Toyota technical development corporation, Japan 2007
- [7] DIETENBERGER M., BUYUK M., KAN C-D. Development of a High Strain Rate Dependent Vehicle Model, University of Stuttgart, Stuttgart 2005 , Bamberg
- [8] TAKOSHI K., NIWA K. Validation and Material Modeling of Polymers by Employing MAT_SAMP-1, International LS-DYNA conference, Dearborn, 2012
- [9] LOB, H., CROOP B., ROY D. Applying Digital Image Correlation Methods To SAMP-1 Characterization, 9th European LS-DYNA Conference 2013, Manchester, UK
- [10] ANDRADE F., FEUCHT M., HAUFE A. On the prediction of Material Failure in LS-DYNA A Comparison between GISSMO and DIEM, LS-DYNA German Forum 2014 Bamberg, Germany
- [11] KOLLING S. Polymers in Crash and Impact Simulation. In: Laboratory of Mechanics, Giessen University of Applied Sciences, Technologietag. Schladming, Austria, 2010.
- [12] SEONG, Y. K., H. K. CHAE, H. K. SUNG, H. J. OH a R. Y. JAE. Measurement of residual stresses in film insert molded parts with complex geometry. Polymer Testing. 2009, roč. 2009, č. 28, s. 500-507.
- [13] ARRUDA ELLEN M., M. C. BOYCE a R. JAYACHANDRAN. Effects of strain rate, temperature and thermomechanical coupling on the finite strain deformation of glassy polymers. Mechanics of Materials. 1995, vol. 19, 2-3, s. 193-212. DOI: 10.1016/0167- 6636(94)00034-E.

- [14] BARDENHAGEN, S.G., M.G. STOUT a G.T. GRAY. Three-dimensional, finite deformation, viscoplastic constitutive models for polymeric materials. *Mechanics of Materials*. 1997, vol. 25, issue 4, s. 235-253. DOI:10.1016/S0167-6636(97)00007-0.
- [15] MULLIKEN, A.D., M.C. BOYCE a G.T. GRAY. Mechanics of the rate-dependent elastic–plastic deformation of glassy polymers from low to high strain rates. *International Journal of Solids and Structures*. 2006, vol. 43, issue 5, s. 1331-1356. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2005.04.016.
- [16] LI, ZHOUHUA, John LAMBROS a G.T. GRAY. Strain rate effects on the thermomechanical behavior of polymers. *International Journal of Solids and Structures*. 2001, vol. 38, issue 20, s. 3549-3562. DOI:10.1016/S0020-7683(00)00223-7.
- [17] THIRUPPUKUZHI, Srikanth V., C.T. SUN a G.T. GRAY. Models for the strain-rate- dependent behavior of polymer composites. *Composites Science and Technology*. 2001, vol. 61, issue 1, s. 1-12. DOI: 10.1016/S0266-3538(00)00133-0.
- [18] SAMANTARAY, Dipti, Sumantra MANDAL a A.K. BHADURI. A comparative study on Johnson Cook, modified Zerilli–Armstrong and Arrhenius-type constitutive models to predict elevated temperature flow behaviour in modified 9Cr–1Mo steel. *Computational Materials Science*. 2009, vol. 47, issue 2, s. 568-576.
- [19] ZIENKIEWICZ, O. C., J. Z. ZHU, R. L. TAYLOR. *The finite element method: its basis and fundamentals*. 6th ed. Amsterdam: Elsevier, 2005, 733 s. ISBN 0750663200.
- [20] T.J.R. HUGHES, W.K. LIU, *Implicit-explicit finite elements in transient analysis: Implementation and numerical examples* *ASME J. Appl. Mech.*, 45 (1978), pp. 375–378
- [21] HULBERT, GREGORY M. a J. CHUNG. Explicit time integration algorithms for structural dynamics with optimal numerical dissipation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1996, vol. 137, issue 2, s. 175-188. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045782596010365>
- [22] D.R. BLAND: *The theory of Linear Viscoelasticity*, (Pergamon Press, Volume 10 in the International Series of Monographs on Pure and Applied Mathematics, 1960)
- [23] BREPTA R., PROKOPEC M., *Šíření napět'ových vln a rázy v tělesech*, Academia, Praha, t.ST05, 1972
- [24] MEISSNER B., ZILVAR V. *Fyzika polymerů Struktura a vlastnosti polymerních materiálů*. Praha: SNTL/Alfa Bratislava, 1987.
- [25] JANÍČEK P. *Systémové pojetí vybraných oborů pro techniky: hledání souvislostí: učební texty*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 978-80-7204-554-9.
- [26] VLK M., *Mezní stavy a spolehlivost*. Brno: VUT, 1991

- [27] Technická Evropská norma ISO 527/1-2
- [28] Interní vývojové materiály fa. Robert BOSCH s.r.o. České Budějovice
- [29] LA RIVE BOX, Rob de. *Svět automobilů: veteráni, osobní*. 2. vyd. Překlad Jiří Baudyš. Čestlice: Rebo, 2010, 912 s. ISBN 978-80-255-0406-2.
- [30] HAYASHI S. Prediction of Failure Behaviors in Polymers Under Multiaxial Stress State, 12th Internat. LS-DYNA Users Conference 2012, Detroit, US
- [31] DOBEŠ M., VRBKA J. Experimental Determination of Polymer Material characteristics having regard to the FEM Computational Analysis, In Engineering Mechanics 2013. Svratka: Brno University of Technology, 2013
- [32] DOBEŠ M., VRBKA J. Stress and Deformation Response of a Car Safety Frame on Static and Impact Loading, In *Výpočty 2013*. Praha: Czech Technical university in Prague
- [33] DOBEŠ M., VRBKA J. Local Experimental Determination of Material Characteristics for Polymers Related to FEM Analysis, *Engineering Mechanics*, Vol. 21, 2014, p. 1-8
- [34] DOBEŠ M., NAVRÁTIL J. Application of the Different Computational Material Models of Polymer Material for Explicit Solution of FEM in LS-DYNA, In *22nd SVSFEM ANSYS Users Group Meeting and Conference 2014*, Nízské Tatry, p. 10-19
- [35] DOBEŠ M., NAVRÁTIL J. Solving Crash Problems of the Fuel Supply Modules in the Fuel Tank, generally Plastic Parts, 10th European LS-DYNA Conference 2015, Wurzburg, Germany
- [36] DOBEŠ M., NAVRÁTIL J. Damping - Oscillation Elimination after Rupture, German LS-DYNA forum 2016, Bamberg, Germany
- [37] DOBEŠ M., Damping - Oscillation Elimination after Rupture, - přednáška na semináři Výpočty MKP 2016, FSI VUT v Brně (*Oceněno Cenou sponzora – kategorie: Příspěvek z průmyslové praxe*)
- [38] DOBEŠ M., NAVRÁTIL J. Computational Material Models for TSCP Plastics Comparison of the Deformation Behavior with *MAT_24 and *MAT_SAMP-1 with DIEM, 11th European LS-DYNA Conference 2017, Salzburg, Austria

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

σ	napětí	[MPa]
σ_1	maximální tahové napětí (1. hlavní napětí)	[MPa]
σ_{true}	skutečné napětí (true stress)	[MPa]
σ_{nom}	nominální napětí	[MPa]
$R_{p 0.2}$	smluvní mez kluzu	[MPa]
R_M	mez pevnosti	[MPa]
E	Modul pružnosti (Youngův modul)	[MPa]
ε	poměrné prodloužení (přetvoření)	[-]
ε_{true}	skutečné poměrné prodloužení (přetvoření)	[-]
$\dot{\varepsilon}$	rychlost změny deformace (strain rate)	[s ⁻¹]
ε_{fail}	poměrné prodloužení pro iniciaci poškození (failure)	[-]
ε_{rupt}	poměrné prodloužení při porušení (eroze elementů)	[-]
ε_{pl}	plastická složka poměrného prodloužení (přetvoření)	[-]
μ	Poissonův poměr	[-]
μ_p	Poissonův poměr v plastické oblasti materiálu	[-]
F	síla	[N]
η	triaxialita napětí	[-]
D	funkce poškození, <0-1>	[-]
ω_p	parametr vyhodnocení funkce poškození	[-]
$p_1..p_n$	hybnost soustavy	[kg m s ⁻¹]
Δt	časový krok	[s]
ρ	hustota	[kg m ⁻³]
h	charakteristický rozměr konečného prvku	[mm]
$S_1..S_n$	podmnožiny systému podstatných veličin	[-]
v_s	statická rychlost zatížení	[m s ⁻¹]
v_d	dynamická rychlost zatížení	[m s ⁻¹]
$D_1..D_3$	parametry Johnson-Cookova modelu	[-]
eptol	první hlavní přetvoření (parametr v LS-DYNA)	[-]
s_1max	první hlavní napětí (parametr v LS-DYNA)	[MPa]
CTF	compression/tension factor	[-]
ABS	Anti-lock Braking Systém	
ASR	Anti-slip regulation	
ESP	Electronic stability programs	
FSM	Fuel Supply Module	
LS-DYNA	konečně-prvkový řešič	
TSCP	Typical Semi-Crystal Polymer	
MAT_24	mat. karta v LS-DYNA (*MAT_SAMP-1 *MAT_ADD_EROSION)	
DIEM	Damage Initiation and Evolution Model	
GISSMO	materiálový model porušení především pro tvárné porušení	
POM	PolyOxyMethylen, PA - Polyamid	
RBCB	Robert Bosch České Budějovice	

AUTOROVO CURRICULUM VITAE

Jméno a příjmení: Ing. Martin Dobeš
Datum narození: 26.11.1986
Národnost: česká
Trvalé bydliště: Stříbřec 44, 379 01 Třeboň
Telefon: +420 728 426 065
Email: martin.dobes@cz.bosch.com, dobym@seznam.cz

Vzdělání:

2011 – dosud: doktorské studium: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství
obor: Inženýrská mechanika a biomechanika

2009 – 2011: magisterské studium: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství
obor: Inženýrská mechanika a biomechanika, titul Ing.

2006 – 2009: bakalářské studium: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství
obor: Strojní inženýrství, titul Bc.

2002 - 2006: Vyšší odborná škola, Střední průmyslová škola automobilní a
technická, České Budějovice, obor: Diagnostika motor. vozidel

Zaměstnání:

2011 – 2018: Simulační inženýr – Výzkum a vývoj palivových čerpadlových
modulů, Robert BOSCH s.r.o., České Budějovice

Odborné zaměření:

- Výpočtové modelování MKP (CAE analýzy) v oblasti mechaniky těles
- Experimentální verifikace CAE analýz
- Specializace: **Rázové zatížení plastových komponent FSM**
 - explicitní CAE analýzy
 - měření mechanických materiálových charakteristik
- Experimentální měření deformací pomocí obrazové korelace (DCIM)

Projekty:

- Vývoj testovacího zařízení pro rázové zatížení přírub FSM (GS-FS/ENG-Bj)
- Výzkum v oblasti viskoplastického chování polymeru vzhledem k rázovému zatížení (GS-FS/ENG-Bj)
- Inovativní řešení absorpce rázové energie v produktu FSM, TRIZ metodika

Zahraniční stáže:

Robert BOSCH, Schwieberdingen, Germany – Simulation training
Robert BOSCH, Bangalore, India – Simulation support of BAJAJ project