ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Materiálový model náhrady kostní tkáně

Vedoucí práce:

Ing. Petr Tichý, Ph.D.

Vypracoval:

Bc. Adam Lindner

Praha 2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Lindner** Jméno: **Adam** Osobní číslo: **459576**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**

Studijní program: **Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Biomechanika a lékařské přístroje**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Materiálový model náhrady kostní tkáně

Název diplomové práce anglicky:

Constitutive model of bone substitute

Pokyny pro vypracování:

Sestavte konstitutivní model náhrady kostní tkáně na bázi polyuretanové pěny. Zohledněte hustotu kostní tkáně, resp. strukturu PU pěny, její mechanické vlastnosti a pevnost. Uvažujte velké deformace, plastické přetvoření, tepelné vlastnosti a porušení s ohledem na využití materiálového modelu při simulacích obrábění kostní tkáně. Cílem práce je návrh konstitutivního modelu s potenciálem popsat vznik termální nekrózy kostní tkáně.

Seznam doporučené literatury:

ZETTERBERG, MIKAELA. A critical overview of machining simulations in ABAQUS. Stockholm, Sweden, 2014. Degree project. KTH ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Johnson, W.K., Cook, R., 1983, A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures. Proc. 7th Inter. Symp. on Ballistics, pp.541-547.

Arrazola, Pedro & Ugarte, Done & Montoya, J & Villar, A & Marya, Surendar. (2005). Finite element modeling of chip formation process with Abaqus/Explicit.

Schermann, T & Marsolek, J & Schmidt, C & Fleischer, Jürgen. (2006). Aspects of the simulation of a cutting process.... Proceedings of the 9th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations.

Borsos, Benjámin & Csörgő, András & Hidas, Anna & Kotnyek, Bálint & Szabó, Antal & Kossa, Attila & Stépán, Gábor. (2017). Two-Dimensional Finite Element Analysis of Turning Processes. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering. 61. 44-54.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Petr Tichý, Ph.D., odbor biomechaniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **22.04.2020** Termín odevzdání diplomové práce: **07.08.2020**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Petr Tichý, Ph.D. podpis vedoucí(ho) práce	doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc. podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	prof. Ing. Michael Valášek, DrSc. podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

24. 6. 2020
Datum převzetí zadání

Podpis studenta

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Anotační list

Jméno autora:	Adam Lindner
Název DP:	Materiálový model náhrady kostní tkáně
Anglický název:	Constitutive model of bone substitute
Akademický rok:	2019 / 2020
Studijní program:	Strojní inženýrství
Zadávající ústav:	Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky
Vedoucí DP:	Ing. Petr Tichý, Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 34
	Počet obrázků: 19
	Počet tabulek: 4
	Počet příloh: 1
Klíčová slova:	Polyuretan, mechanické vlastnosti, tvrdá polyuretanová pěna, Johnson-Cook, metoda konečných prvků
Keywords:	Polyurethane, mechanical properties, rigid polyurethane foam, Johnson-Cook, finite element method
Anotace:	Práce se zabývá určením parametrů konstitutivního modelu Johnson-Cook, které byly následně použity při MKP simulaci. Simulace byly porovnány s reálným měřením.
Abstract:	The work deals with the determination of the parameters of the constitutive model Johnson-Cook, which were subsequently used in the FEM simulation. The simulations were compared with real measurements.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně a pouze s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Praze dne: ……. Bc. Adam Lindner

Poděkování

Za cenné rady, motivaci a vedení diplomové práce děkuji Ing. Petru Tichému, Ph.D. Děkuji své rodině za oporu při psaní diplomové práce a velice děkuji rodičům za vytrvalou podporu po celou dobu mých studií.

Obsah

Seznam zkratek 3

1. Úvod 4

1.1. Tvrdá polyuretanová pěna 4

1.2. Mechanické vlastnosti tvrdé polyuretanové pěny 5

1.3. Numerické simulace 8

1.4. Abaqus 8

2. Cíle práce 8

3. Teorie 9

3.1. MKP modely 9

3.1.1. Lagrangeova metoda 9

3.1.2. Eulerova metoda 10

3.1.3. ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) metoda 10

3.2. Materiálové modely 11

3.2.1. Plasticita – Johnson-Cook 13

4. Parametry konstitutivního modelu J-C 14

4.1. Naměřená data 14

4.2. Metodika 15

4.3. Dopočtené hodnoty 15

4.3.1. Parametry A, B a n 15

4.3.2. Parametr m – teplotní odpevnění 19

5. Simulační modely – Abaqus 20

5.1. Zjednodušený model 20

5.1.1. Vlastnosti materiálů 21

5.1.2. Mechanika modelu 22

5.1.3. Vyhodnocení 22

5.2. ALE model 24
5.2.1. Okrajové podmínky 25
5.2.2. Vyhodnocení 26
5.3. Diskuse 29
6. Závěr 30
Bibliografie 31
Seznam obrázků 33
Seznam tabulek 34
Přílohy 35
Příloha 1: Experimentální data 35

Seznam zkratek

PU		Polyuretan
MKP		Metoda konečných prvků
ALE		Arbitrary Lagrangian-Eulerian
SPH		Smooth Particle Hydrodynamics
DEM		Discrete Element Method
$\bar{\sigma}$	$[\,N \cdot mm^{-2}\,]$	Dynamická mez kluzu
ε_{yp}	$[-]$	Elastické prodloužení
$\bar{\varepsilon}^{\mathrm{pl}}$	$[-]$	Ekvivalentní plastická deformace
$\dot{\varepsilon}$	$[-]$	Rychlost deformace
Q, P		Cowper–Symonds parametry rychlosti deformace
A	$[\,N \cdot mm^{-2}\,]$	Napětí na mezi kluzu
B	$[\,N \cdot mm^{-2}\,]$	Koeficient zpevnění
n	$[-]$	Exponent zpevnění
C		Koeficient vlivu deformační rychlosti
m	$[-]$	Teplotní odpevnění
$\hat{\theta}$	$[-]$	Homologická teplota
T	$[K]$	Teplota
T_r	$[K]$	Referenční teplota
T_m	$[K]$	Teplota tání
C_x		Fit parametry
PCF		Pounds per Cubic Foot
E	$[\,N \cdot mm^{-2}\,]$	Modul pružnosti
v	$[\,mm \cdot s^{-1}\,]$	Rychlost
σ	$[\,N \cdot mm^{-2}\,]$	Napětí
t	$[\,s\,]$	Čas

1. Úvod

1.1. Tvrdá polyuretanová pěna

Výroba polyuretanu (dále jen PU) tkví ve smíchání dvou hlavních chemikálií, polyolu a izokyanátu, v různých poměrech dle požadovaných výsledných vlastností. Pro úpravu výsledných vlastností PU lze přidávat další příměsi, např. vlákna vlny, kovy, kartonový papír a jiné, kdy například přidání kovu zvýší pevnost v tlaku, nebo vlákna vlny způsobí snížení Youngova modulu pružnosti. [1]

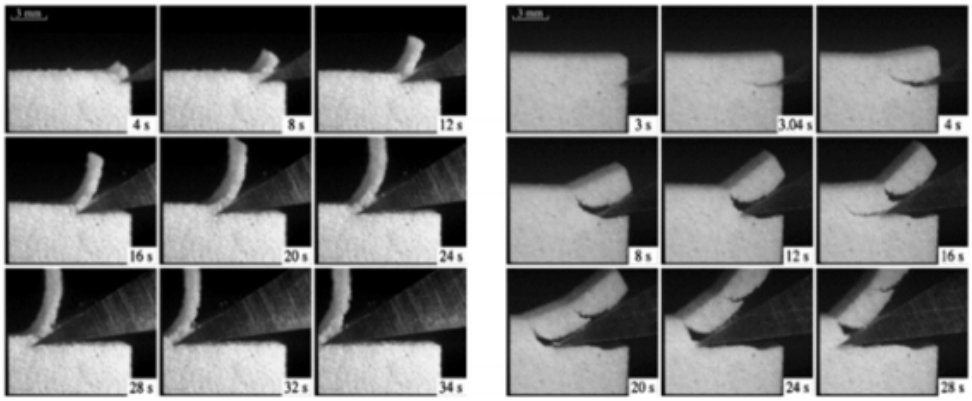
Tvrdé polyuretanové pěny se dnes používají v mnoha odvětvích. V porovnání s polyethylenem a polytetrafluoretylenem vykazuje PU nejvhodnější materiálové vlastnosti pro využití v medicínské oblasti. Polyuretany mají podstatnou roli v podobě zkušebních materiálu pro výcvik lékařů a testování medicínských nástrojů. Jsou využívány například pro ověřování a mechanické zatěžování kostních spojů pomocí šroubů. [2]

Oblíbenost PU v testování je způsobena více faktory. Jedním z hlavních problémů užívání lidských kostí je omezená dostupnost, náročné skladování a udržování. Různost jejich tvarů a velikostí, neshodná hustota a struktura u dvou rozdílných exemplářů prakticky znemožňuje opakování testů a jejich vzájemné porovnání. PU je tedy v porovnání s lidskými kostmi levnější a vhodnější materiál pro provádění opakovaných měření a jejich následné vyhodnocování a porovnávání. [3]

PU bloky se používají na testování šroubů, které jsou určeny k fixaci zlomenin a ukotvení implantátů. Měří se například axiální síla potřebná pro vytažení (spíše vytržení) plně zašroubovaného šroubu, točivý moment vhodný pro utažení nebo naopak potřebný moment k povolení šroubu.

Vrtání do PU bloku se používá k simulaci metody využívání kostních štěpů pro léčbu složitých fraktur, kdy se pacientovi odebere část tkáně ze zdravé kosti a aplikuje se do poškozené kosti pro zlepšení regenerace. Při odebírání kostních štěpů je snaha o co nejmenší poškození okolní tkáně nástrojem. Nejčastěji se používá rotační vrták, který zároveň řeže a sbírá odebranou tkáň. V závislosti na geometrii nástroje a jeho nastavení se liší odebíraná tříska, která může být plynulá, nebo dělená (Obrázek 1).

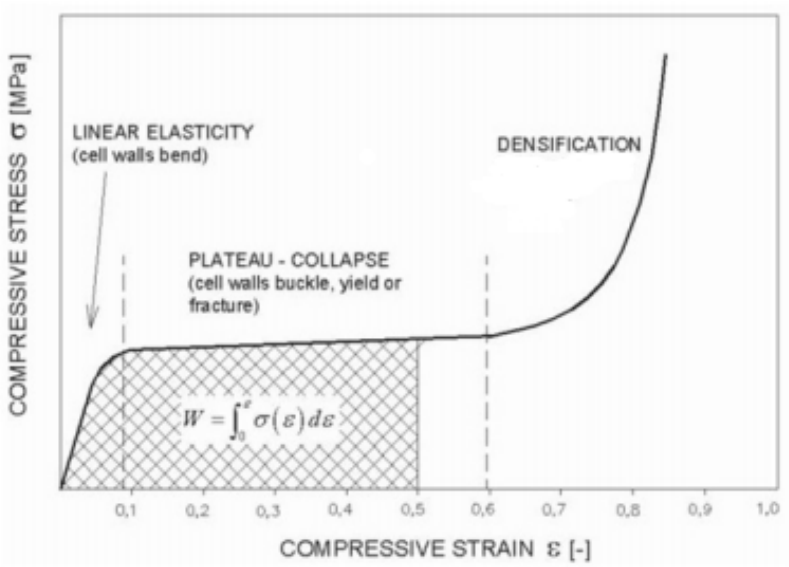
Negativním prvkem použití rotačního vrtáku je vyšší teplota, která vzniká při dělení materiálu a poškozuje okolní tkáň. Tato problematika jde ovlivnit vhodným nastavením otáček nástroje a velikosti úběru materiálu za otáčku. Všechna tato nastavení a úpravy se před uvedením do praxe nejdříve testují na PU blocích. [3]



Obrázek 1: Odebírání materiálu PU [3]

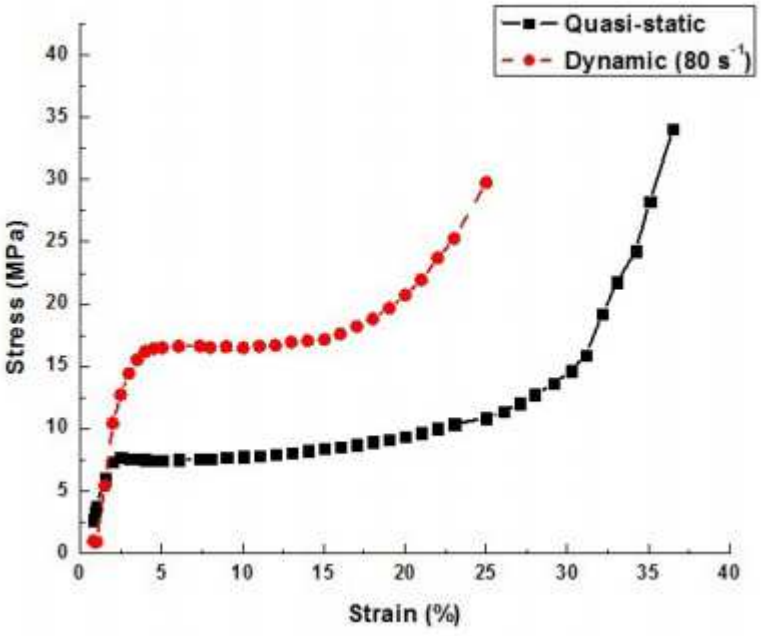
1.2. Mechanické vlastnosti tvrdé polyuretanové pěny

Typická křivka při zatěžování tlakem je zobrazena na Obrázek 2, teoreticky ji lze rozdělit do tří různých oblastí. První je oblast lineární elasticity, kdy se stěny materiálu prohýbají, dle které lze charakterizovat Youngův modul materiálu. V druhé oblasti dochází k postupnému stlačování a zhutňování materiálu, kdy na poměrně malý nárůst napětí připadá velký stupeň deformace. V třetí oblasti se materiál stlačí natolik, že již nemá další prostor ke kumulaci a nastává prudký nárůst napětí při malé deformaci. [4]



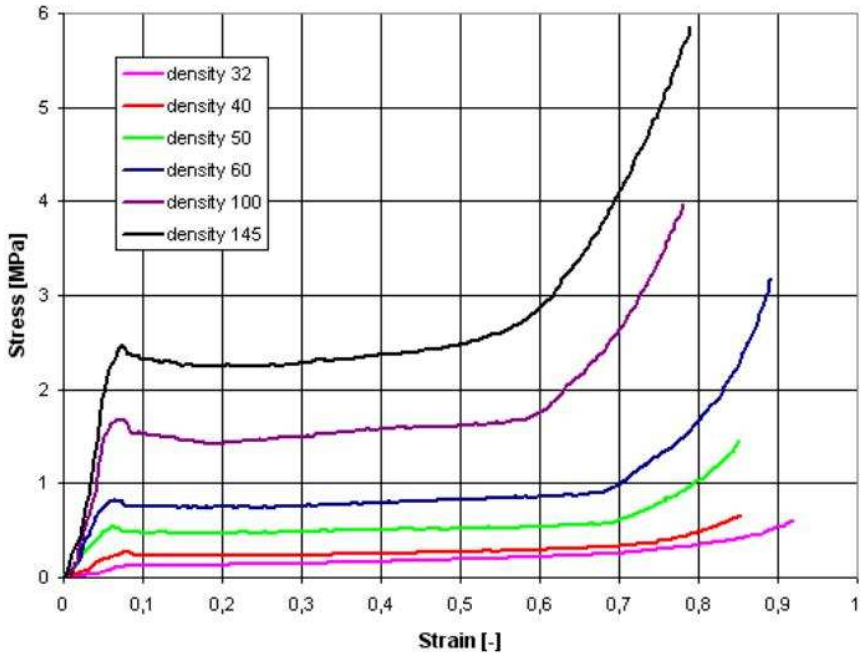
Obrázek 2: Graf typické křivky tlakového zatěžování PU [4]

Mechanické vlastnosti PU se odvíjí dle charakteru zatěžování, vliv má teplota, nicméně výraznější odchylky se projeví při změnách teplot v řádu stovek stupňů [5]. Při dynamickém zatěžování o frekvenci 80 Hz PU bloku 50x50x50 mm, hustoty 288 kg/m^{-3} je mezní napětí v tlaku vyšší než při postupném zatěžování (Obrázek 3). Zároveň třetí oblast křivky začíná při 15 % relativního stlačení oproti 25 % při postupném zatěžování. Efekt zhutnění se projevuje při menším stlačení. Z toho lze vyvodit, že velikost stlačení je závislá na způsobu a rychlosti zatížení. [4]



Obrázek 3: Graf postupného a dynamického zatížení v tlaku [4]

Z mechanických zatěžovacích testů prováděných postupným stlačováním PU desek o rozměrech 50x50x30 mm a hustotách 32, 40, 50, 60, 100 a 145 kg/m^{-3} vyplývá, že se zvyšováním hustoty PU se zároveň zvyšuje hodnota mezního napětí, které daný materiál dokáže snést (Obrázek 4). [6]



Obrázek 4: Graf zatěžovací charakteristiky PU desek při tlaku [6]

1.3. Numerické simulace

Mnoho odvětví strojírenství (např. letectví, automotive, biomechanika) v dnešní době využívá simulací při designu a vývoji svých produktů. Pro mechaniku má největší význam simulace pomocí metody konečných prvků (MKP). Některé moderní programy MKP nabízejí balíčky pro simulace proudění kapalin, tepelných, elektromagnetických jevů a jiné. Nejvíce se pomocí MKP simulují deformace a napětí materiálu při určitém druhu namáhání. Simulací lze vizualizovat daný problém, odhalit tak kritická místa, uspořit náklady na výrobu prototypů, snížit potřebu náročných a drahých destruktivních testů, optimalizovat váhu a použití materiálu. Celkově vede použití simulace ke zrychlení a snížení ceny procesu vývoje. [7]

1.4. Abaqus

Abaqus je software pro analýzu konečných prvků. První část je pre-procesor pro tvorbu geometrie mechanických komponent. Následně se modelu přiřadí mechanické vlastnosti a interakce na základě, kterých se dopočtou požadované hodnoty např. napětí a deformace. Post-procesor umožňuje grafické zobrazení výsledků a průběhu simulace. Abaqus disponuje sadou řešičů, mezi nejpoužívanější patří Standart, který řeší obecné použití konečných prvků implicitní metodou, a Explicit využívaný pro simulace dynamických dějů pomocí explicitní metody. [8]

2. Cíle práce

Cílem této práce je vytvoření konstitutivního modelu náhrady kostní tkáně na bázi polyuretanové pěny. Výsledný model zohlední velké deformace, plastické přetvoření, tepelné a mechanické vlastnosti PU pěny. Při správné predikci teploty nástroje a materiálu bude potenciál využít model k řešení problémů se vznikem termální nekrózy kostní tkáně.

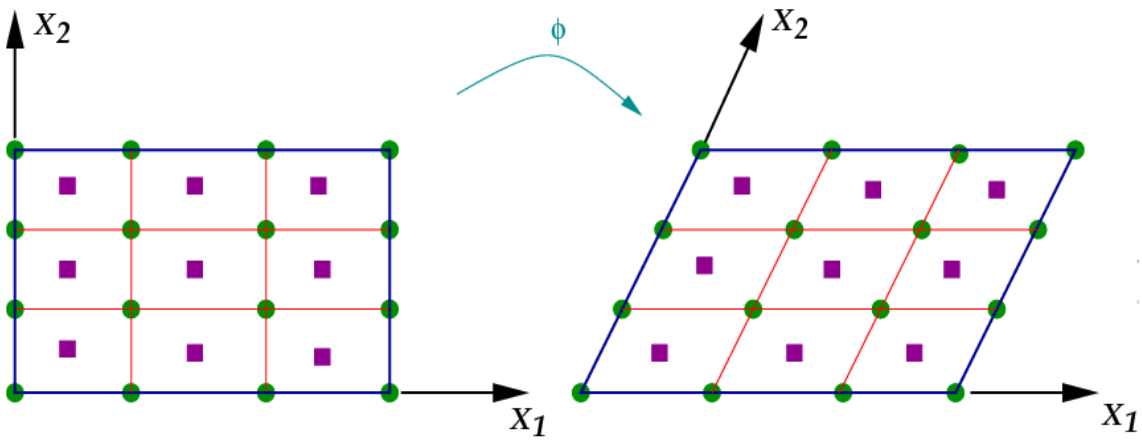
3. Teorie

3.1. MKP modely

Klasickou variantou konečně prvkové úlohy je Lagrangeova metoda, která se nejvíce používá pro simulace menších deformací a přetvoření. Má však jistá omezení při řešení úloh s velkými deformaci, kde je vhodné ji nahradit metodou Eulerovskou nebo metodou ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian), která je kombinací obou zmíněných metod. Každá z těchto metod má své výhody, nevýhody a limitace. Alternativou ke klasickým metodám kontinua, které využívají síťování k řešení problému, existují metody založené na částicích. Částicové metody dělí materiál na jednotlivé částice, které mezi sebou mají nastavenu určitou interakci. Mezi částicové metody patří SPH (Smooth Particle Hydrodynamics) a DEM (Discrete Element Method), které jsou vhodné pro simulaci hydrodynamických jevů. [9]

3.1.1. Lagrangeova metoda

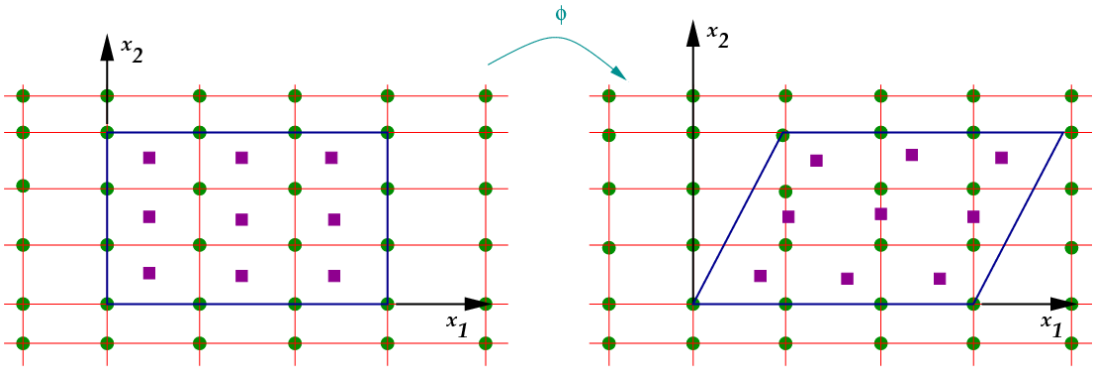
Lagrangeova metoda je nejběžněji používaná varianta, využívá síťování materiálu pomocí bodů, kde každému bodu předepisuje vlastní souřadnice. Jednotlivé elementy jsou tvořeny spojením bodů. Při deformaci se síť pohybuje a deformuje spolu s materiálem. Za pomoci nepravidelné sítě lze simulovat i tvarově složité úlohy. Metoda je vhodná pro simulaci malých deformací. Při nadměrných deformacích může docházet ke zborcení elementů, což může způsobovat nepřesné výsledky a nestabilitu výpočtu. Problému s nadměrnou deformací je částečně možné předcházet takzvaným přesíťováním, kde je deformována síť nahrazenou novou nedeformovanou, toto opatření ovšem může značně navýšit nároky na výpočet a tedy celkovou časovou náročnost. Při úběru materiálu jsou dle kritéria odstraňované zkreslené elementy, tento proces ovšem ze simulace ubírá hmotu a energii. [10] [11] [9]



Obrázek 5: Deformace sítě, Lagrangeova metoda [9]

3.1.2. Eulerova metoda

Eulerova metoda je nejvíce používaná pro simulace tekutin a materiálů při velmi velkých deformacích. Tato metoda využívá pevně danou síť, kterou materiál protéká. Při deformaci je síť neměnná. Výhodou této metody je, že nedochází ke zborcení elementů jako v případě Lagrangeovy metody. Nevýhodou je nutnost při úběru materiálu znát předem geometrii třísky. [10] [11] [9]

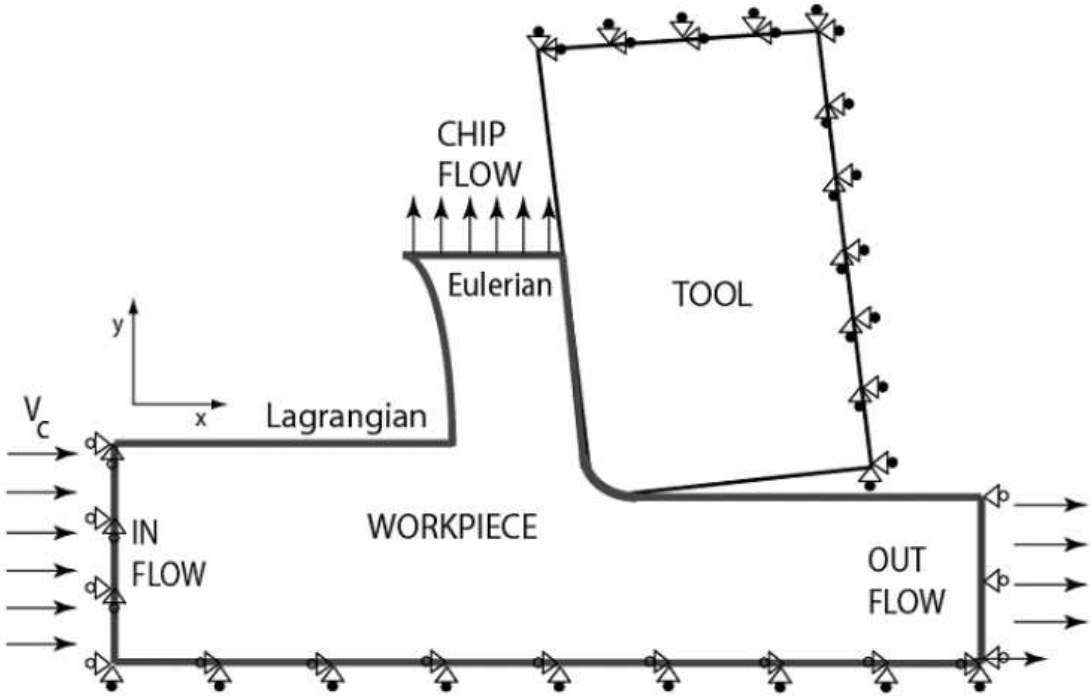


Obrázek 6: Deformace materiálu, Eulerova metoda [9]

3.1.3. ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) metoda

Metoda ALE spojuje výhody Lagrangeova a Eulerova přístupu. Nejvíce se využívá při simulaci velkých deformací či při průniku např. balistické úlohy. Hlavní myšlenkou je umožnit síti chovat se oběma způsoby, posouvat se s materiálem

Lagrangeovsky, nechat materiál proudit skrze síť Eulerovsky nebo se pohybovat libovolně určeným způsobem tedy kombinací obou přístupů. Při úběru materiálu je využit Eulerovský přístup v oblasti okolo špičky nástroje, kde dochází k oddělování materiálu. Zamezí se tím nevhodnému chování Lagrangeovy metody při velkých deformacích. Pro zbylé oblasti bez velkých deformací se použije Lagrangeova přístup. [9]



Obrázek 7: ALE metoda [10]

3.2. Materiálové modely

Při simulaci obrábění, tváření, vrtání a všeobecně mezních stavů materiálů je potřeba složitějších konstitutivních materiálových modelů zahrnujících plasticitu, porušení, závislost na teplotě, rychlosti deformace apod. Konstitutivní materiálové modely jsou odvozovány empiricky nebo polo empiricky v závislosti na přístupu k plasticitě. Jednotlivé modely se od sebe liší v popisu deformačního zpevnění, zpevnění vlivem deformační rychlosti, teplotního odpevnění a kritériu porušení. Každý model má rozdílný počet parametrů, které je potřeba stanovit pomocí mechanických zkoušek. Žádoucí vlastností konstitutivního modelu je, aby parametry materiálu byly

charakterizovány na základě několika laboratorních testů a simulace tak mohly být použity s větší jistotou. Mezi nejznámější materiálové modely plasticity patří:

Power–Law izotropní plastický model

Tento model zohledňuje efekt elastického a plastického přetvoření spolu s rychlostí deformace a deformačním zpevněním.

$$\bar{\sigma} = k(\varepsilon_{yp} + \bar{\varepsilon}^{\mathrm{pl}})^n \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{Q}\right)^{\frac{1}{P}}\right] \tag{1}$$

Johnson–Cook model

Tento model bere v úvahu deformační zpevnění materiálu, vliv deformační rychlosti a teplotního odpevňování.

$$\bar{\sigma} = (A + B\left(\bar{\varepsilon}^{\mathrm{pl}}\right)^n)(1 + Cln\dot{\varepsilon}^*)(1 - \hat{\theta}^m) \tag{2}$$

Zerilli-Armstrong model

Tento model zohledňuje deformační zpevnění, deformační rychlost a teplotu. Existují dvě varianty vázané na různé krystalické mřížky kovů.

Prostorově centrovaná kubická mřížka

$$\bar{\sigma} = C_0 + C_1 \exp\left[-C_3 T + C_4 T ln\left(\dot{\overline{\varepsilon^{\mathrm{pl}}}}\right)\right] + C_5 \bar{\varepsilon}^{\mathrm{pl}} \tag{3}$$

Plošně centrovaná kubická mřížka

$$\bar{\sigma} = C_0 + C_2\sqrt{\bar{\varepsilon}^{\mathrm{pl}}} \exp\left[-C_3 T + C_4 T ln\left(\dot{\overline{\varepsilon^{\mathrm{pl}}}}\right)\right] \tag{4}$$

Nejvíce používaným modelem je Johnson-Cook, který je čistě empirický, ale v porovnání s ostatními modely nejpraktičtější. Výhodou je jeho jednoduchá forma, která neimplementuje fyzikální efekty spojené s materiálem a je tak vhodná pro jakýkoli materiál. [9]

3.2.1. Plasticita – Johnson-Cook

Johnson a Cook v roce 1983 představili svůj empirický konstitutivní model, založený na základně velkého množství dat naměřených při různých zkouškách materiálů. Využívá se pro simulace problémů s vysokou rychlostí deformace a vysokým přetvořením. Johnson a Holmquist zároveň publikovali parametry pro velkou škálu materiálu a tím tak usnadnili práci uživatelům. Model bere v úvahu deformační zpevnění materiálu, vliv deformační rychlosti a teplotního odpevňování.

$$\bar{\sigma} = (A + B\left(\bar{\varepsilon}^{\mathrm{pl}}\right)^{n})(1 + Cln\dot{\varepsilon}^{*})(1 - \hat{\theta}^{m}) \tag{5}$$

První část představuje deformační zpevnění materiálu, druhá určuje vliv deformační rychlosti a třetí představuje teplotní odpevňování. A je počáteční napětí na mezi kluzu, B je koeficient zpevnění, $\bar{\varepsilon}^{\mathrm{pl}}$ je ekvivalentní plastická deformace, n exponent zpevnění, C je koeficient vlivu deformační rychlosti na zpevnění a m je tepelný změkčující exponent.

$$\dot{\varepsilon}^{*} = \frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0} \tag{6}$$

$$\hat{\theta} = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \tag{7}$$

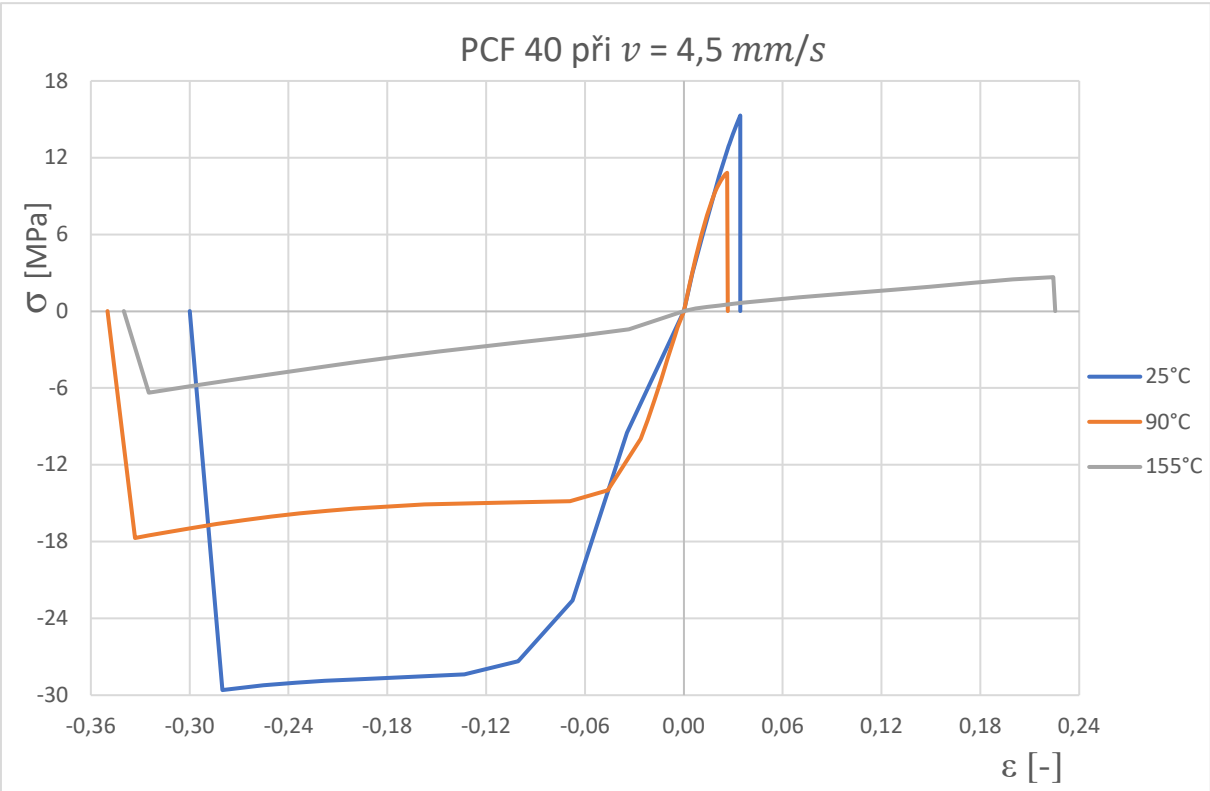
$\dot{\bar{\varepsilon}}$ je deformační rychlost, $\dot{\bar{\varepsilon}}_0$ je referenční deformační rychlost, T je teplota materiálu, T_r je referenční teplota a T_m je teplota tání. [11] [9] [12]

4. Parametry konstitutivního modelu J-C

Johnson a Holmquist zveřejnili parametry pro velkou škálu běžně používaných materiálů, ale parametry pro popis PU pěn s hustotou 10, 25 a 40 PCF [Pounds per Cubic Foot] neuvedli a neučinil tak ani žádný jiný autor. Z tohoto důvodu bylo nutno získat potřebné parametry z experimentálně naměřených dat při mechanických zkouškách materiálu.

4.1. Naměřená data

Experimentální data byla poskytnuta z Jihlavské polytechniky. Pro tři různé hustoty materiálů (PCF 10, PCF 25, PCF 40) byly vzorky zatěžovány při dvou různých rychlostech ($v_1 = 4{,}5\ mm.s^{-1}, v_2 = 45\ mm.s^{-1}$) a třech různých teplotách ($T_1 = 25°C, T_2 = 90°C,\ T_3 = 155°C$). Pro všechny tyto variace byla PU pěna zatěžována tahem a tlakem až do porušení vzorku.



Obrázek 8: Graf chování materiálu při různých teplotách

Graf zobrazuje naměřená data pro zatížení tahové (I. kvadrant) a tlakové (III. kvadrant) pro teploty $25\ °C, 90\ °C$ a $155\ °C$. Grafy všech měření jsou součástí přílohy.

4.2. Metodika

Určení jednotlivých parametrů Johnson-Cookova modelu využívá možnosti izolovat specifické části rovnice.

$$\bar{\sigma} = (A + B\left(\bar{\varepsilon}^{\mathrm{pl}}\right)^{n})(1 + Cln\dot{\varepsilon^{*}})(1 - \hat{\theta}^{m}) \tag{8}$$

Toto je původní publikovaná fotma znění J-C rovnice, pro výpočet byla použita její zjednodušená varianta, kterou využívá program Abaqus, kde je uvažována změna rychlosti deformace $\dot{\varepsilon^{*}} = 1$. Absenci druhého členu rovnice Abaqus řeší dílčí možností zadat hodnoty parametrů závislých na rychlosti deformace.

$$\sigma = (A + B(\bar{\varepsilon}^{\mathrm{pl}})^{\mathrm{n}})(1 - \hat{\theta}^{m}) \tag{9}$$

Kde A je počáteční napětí na mezi kluzu, B je koeficient zpevnění, $\bar{\varepsilon}^{\mathrm{pl}}$ je ekvivalentní plastická deformace, n exponent zpevnění, $\hat{\theta}$ je homologická teplota a m je tepelný změkčující exponent. [9] [13]

4.3. Dopočtené hodnoty

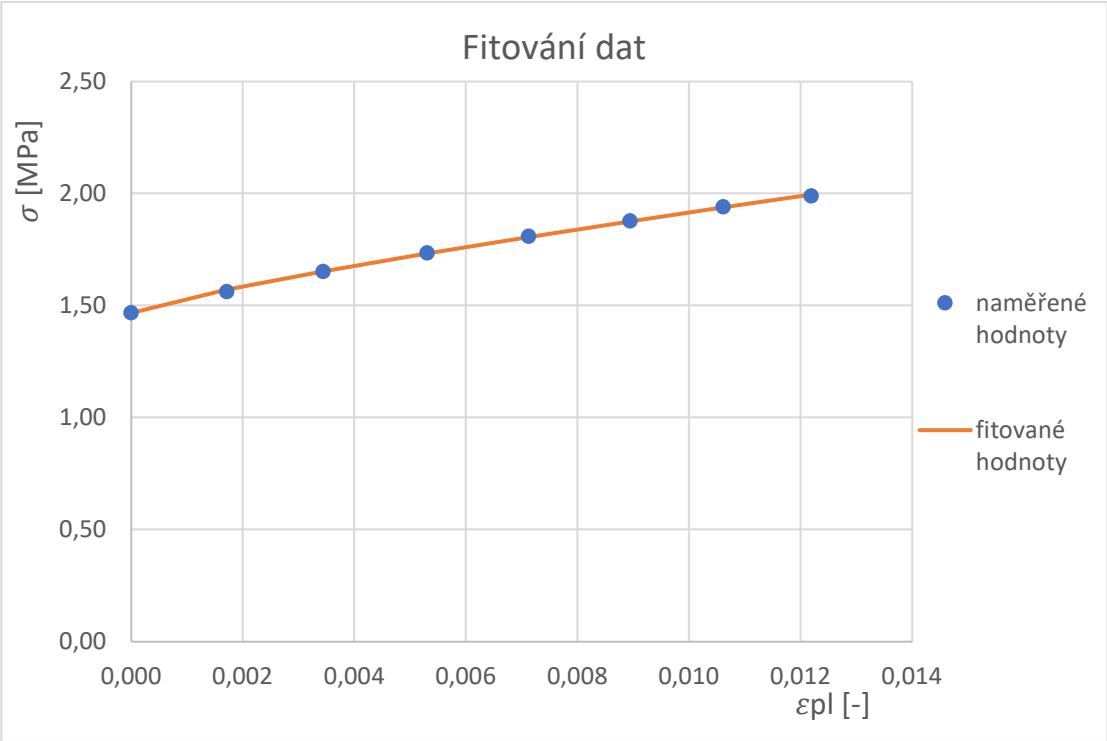
4.3.1. Parametry A, B a n

Hodnoty napětí pro parametr A byly získány z grafů, kde A je hodnota napětí na mezi kluzu. Parametry B a n byly dopočteny pomocí fitování funkce v excelu. Nejdříve byla vypočtena plastická deformace

$$\varepsilon^{\mathrm{pl}} = \varepsilon - \varepsilon_{y} \tag{10}$$

kde ε je aktualní deformace a ε_y počáteční deformace na mezi kluzu. K plastické deformaci byly doplněny hodnoty napětí a data byla následně fitována metodou nejmenších čtverců pomocí vzorce

$$\sigma = A + B(\varepsilon^{\mathrm{pl}})^{\mathrm{n}} \tag{11}$$



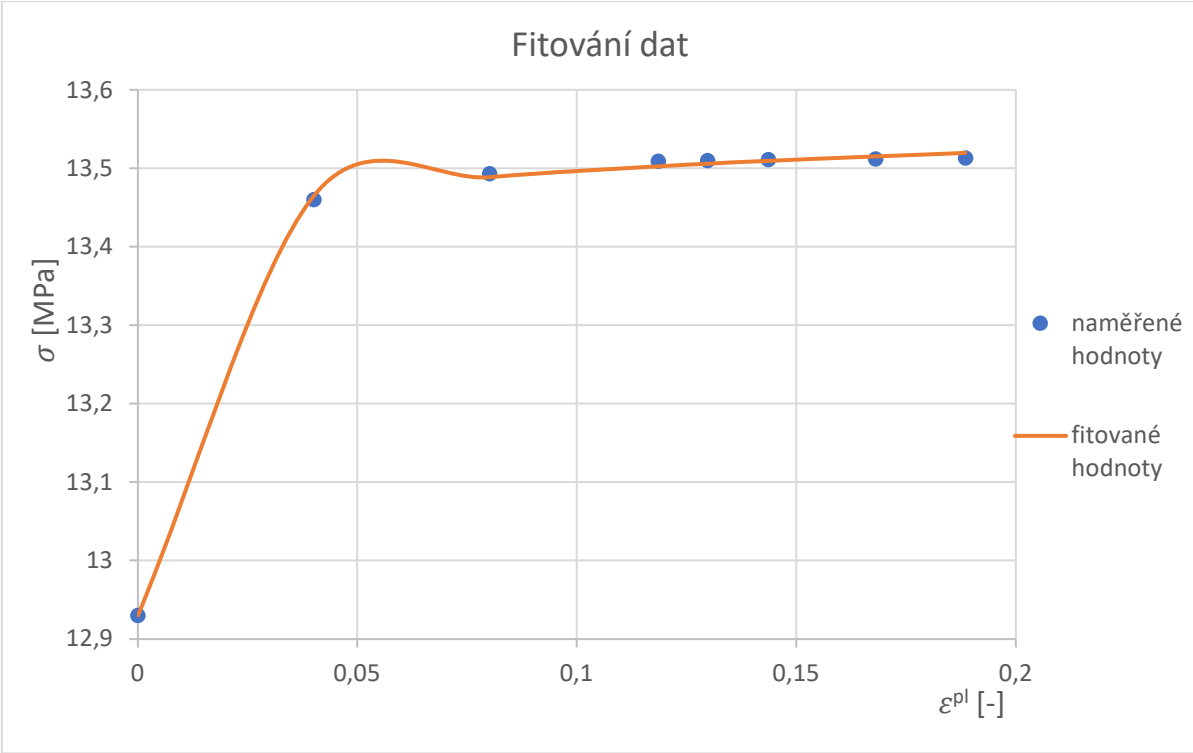
Obrázek 9: Graf aproximace plastické odezvy v tahu

Uvedený graf je pro materiál PCF 10, data byla naměřená při rychlosti $4{,}5\ mm.s^{-1}$ a teplotě $25\ °C$. Stejným způsobem bylo postupováno při vyhodnocování parametrů všech vzorků při různých teplotách a rychlostech, přehled v následující tabulce. Celkem byly zpracovány data pro 3 různé hustoty materiálů, 2 různé rychlosti deformace a 3 různé teploty, tedy 18 sad vzorků pro tlak a 18 sad vzorků pro tah.

Tabulka 1: Výsledné parametry A,B a n pro tah

druh PU	$T\ [°C]$	$v\ [mm.s^{-1}]$	$A\ [MPa]$	$B\ [MPa]$	$n\ [-]$
PCF 10	25	4,5	1,467	20,624	0,832
		45	1,647	22,669	0,822
	90	4,5	1,141	8,566	0,729
		45	1,076	13380,360	3,155
	155	4,5	0,075	1,806	1,031
		45	0,173	6,249	1,881
PCF 25	25	4,5	4,335	169,377	0,942
		45	4,089	252,175	1,002
	90	4,5	4,725	25,549	0,657
		45	4,605	27,541	0,709
	155	4,5	0,595	4,674	0,838
		45	0,894	264,736	3,533
PCF 40	25	4,5	12,932	230,128	0,918
		45	10,312	402,646	0,965
	90	4,5	8,686	66,934	0,726
		45	10,725	35,373	0,586
	155	4,5	0,653	9,691	0,933
		45	1,286	10,988	0,832

Data z tlakových zkoušek byla převrácena do kladných hodnot a byl na ně také aplikován Johnson-Cookův model. Při obrábění, vrtání, řezání se v oblasti, kde dochází k velkým přetvořením, vyskytují převážně tlakové deformace. Z tohoto důvodu byla použita data z tlakových zkoušek. Data jevila mnohem větší plastickou oblast oproti tahové zkoušce. Fitování dat lze vidět v následujícím grafu.



Obrázek 10: Graf aproximace naměřených dat - plastická odezva v tlakové oblasti materiálu PCF 25

Uvedený graf je pro materiál PCF 25, data byla naměřená při rychlosti $4{,}5\ mm.s^{-1}$ a teplotě $25\ °C$. Stejným způsobem bylo postupováno při vyhodnocování parametrů všech vzorků při různých teplotách a rychlostech, přehled v následující tabulce.

Tabulka 2: Výsledné parametry A,B a n pro plasticitu v tlakové oblasti

druh PU	$T\ [°C]$	$v\ [mm.s^{-1}]$	$A\ [MPa]$	$B\ [MPa]$	$n\ [-]$
PCF 10	25	4,5	0,442	14,252	2,087
		45	1,294	1,859	0,173
	90	4,5	0,459	0,089	0,013
		45	0,597	49,394	3,507
	155	4,5	0,271	1,658	1,064
		45	0,400	1,230	1,102

PCF 25	25	4,5	12,930	0,654	0,062
		45	13,153	0,997	0,001
	90	4,5	3,500	2,125	0,027
		45	7,307	2,263	1,065
	155	4,5	1,544	0,643	0,414
		45	1,072	2,834	0,743
PCF 40	25	4,5	27,348	4,790	0,495
		45	31,917	3,174	0,717
	90	4,5	13,995	18,351	1,326
		45	15,463	2,743	0,008
	155	4,5	3,549	20,367	1,051
		45	2,527	20,814	1,112

4.3.2. Parametr m – teplotní odpevnění

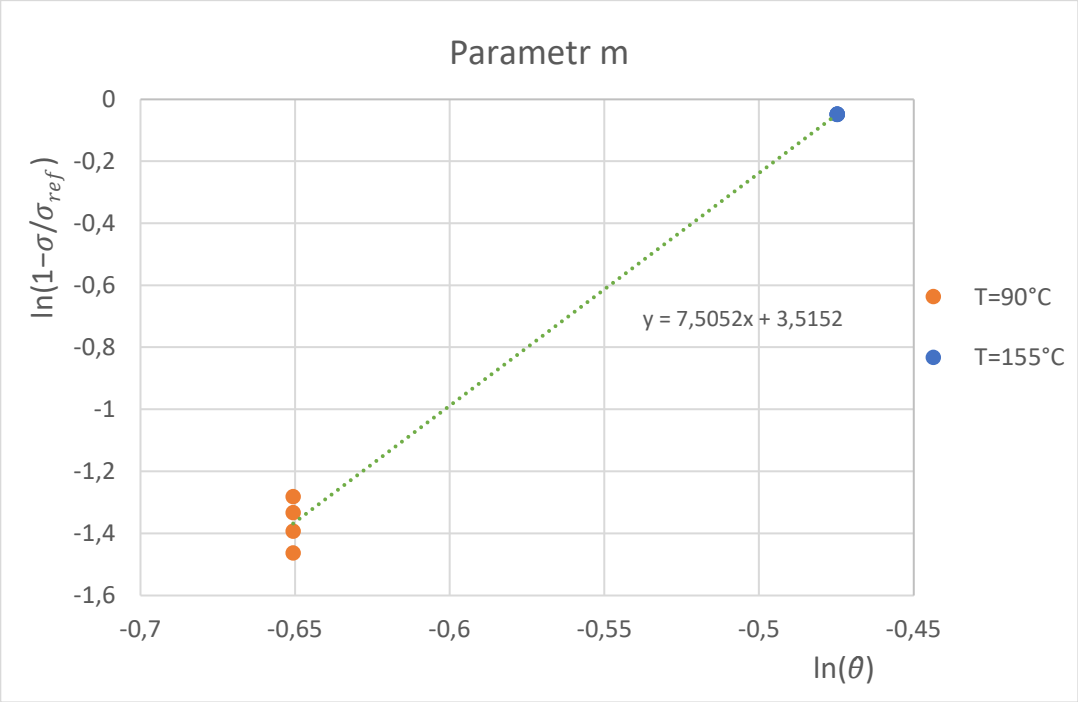
Parametr m byl vyhodnocen pomocí následujících rovnic

$$\sigma = \sigma_{ref}\left(1 - \hat{\theta}^{m}\right) \tag{12}$$

kde $\sigma_{ref} = A + B(\varepsilon^{\mathrm{pl}})^{\mathrm{n}}$ při referenční teplotě, jako referenční teplota byla zvolena $T = 25°C$. Upravením rovnic získáme

$$\ln\left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_{ref}}\right) = m \cdot ln(\hat{\theta}) \tag{13}$$

Po vytvoření grafu závislosti $\ln\left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_{ref}}\right)$ na $\ln(\hat{\theta})$ pro teploty $T_2 = 90°C$, $T_3 = 155°C$ a čtyři různé hodnoty plastické deformace $\varepsilon^{\mathrm{pl}} = \{0{,}005; 0{,}01; 0{,}015; 0{,}02\}$ byly hodnoty proloženy přímkou, jejíž směrnice je parametr m, viz následující graf pro PCF 10 při rychlosti 4,5 $mm.s^{-1}$.



Obrázek 11:Graf vyhodnocení parametru m

Stejný postup byl zopakován pro vyhodnocení všech vzorků, výsledné parametry jsou vypsány v následující tabulce.

Tabulka 3: Parametry m charakterizující teplotní odpevňování

druh PU	PCF 10		PCF 25		PCF 40	
$v\ [mm.s^{-1}]$	4,5	45	4,5	45	4,5	45
$m_{tah}\ [-]$	7,51	3,40	15,22	11,62	8,73	7,70
$m_{tlak}\ [-]$	3,61	0,57	2,16	3,63	2,98	3,81

5. Simulační modely – Abaqus

5.1. Zjednodušený model

Jako první byl vytvořen zjednodušený 3D model s blokem materiálu o rozměrech 20x20x135 mm, který je odebírán pomocí nástroje jednoduché geometrie. Úloha byla řešena v módu ‘Dynamic, Temp-disp, Explicit’, který se používá pro řešení

termomechanických problémů s velkou deformací. Jako druh elementů byl zvolen C3D8RT, tedy 8 uzlový s tří osou deformací a teplotou, redukovanou integrací a kontrolou hourglass efektu. Jedná se o explicitní variantu Lagrangeovy úlohy viz kap. 3.1.1.

5.1.1. Vlastnosti materiálů

Pro materiál nástroje byla předpokládána ocel a definována její hustota, elasticita, tepelná vodivost a kapacita. U nástroje nebyla předpokládána žádná výrazná deformace, proto byl celý definován jako Rigid Body.

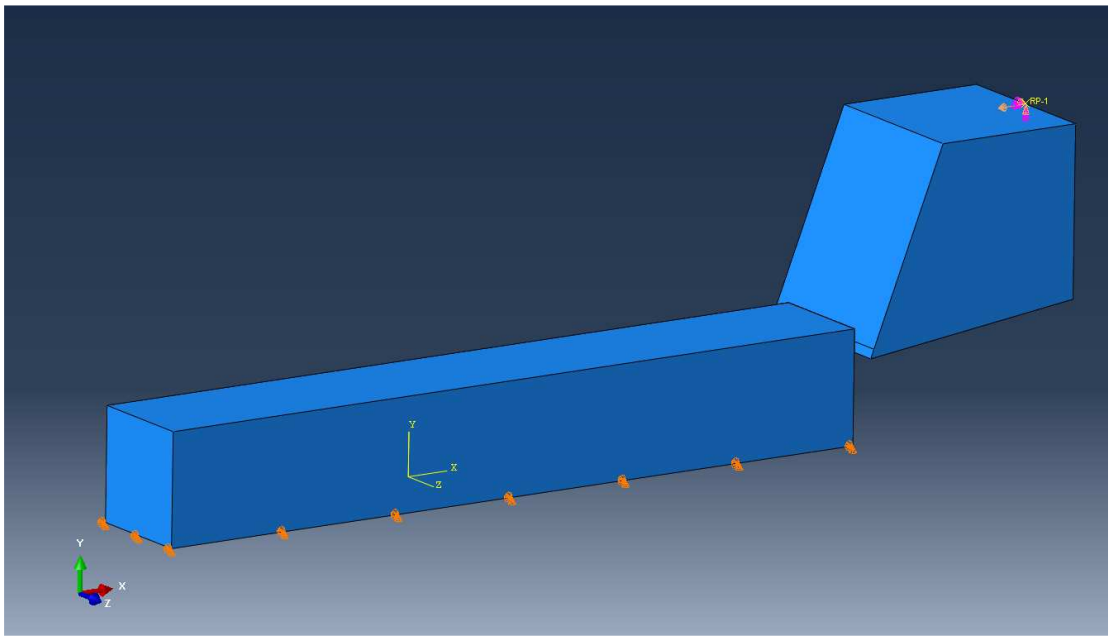
Materiálové parametry pro blok ubíraného materiálu se lišili v návaznosti na druh PU pěny. Byly specifikovány hodnoty pro hustotu, elasticitu, plasticitu, tepelnou kapacitu, tepelnou vodivost, neelastickou tepelnou frakci, tažné poškození a jeho vývoj. Byl použit plastický model J-C a využity parametry z předchozí kapitoly pro rychlost $45\ mm.s^{-1}$. Ostatní hodnoty byly přejaty z jiných prací a dokumentů ([2], [14]).

Tabulka 4: Použité parametry

druh PU	$T\ [°C]$	modul pružnosti $[MPa]$	hustota [2] $[kg.m^{-3}]$	tepelná vodivost [14] $[W.m^{-1}.K^{-1}]$
PCF 10	25	84,8	160	0,038
	90	59,65		
	155	1,69		
PCF 25	25	332,17	400	0,075
	90	283,46		
	155	12,53		
PCF 40	25	837,66	640	0,110
	90	574,42		
	155	16,186		

5.1.2. Mechanika modelu

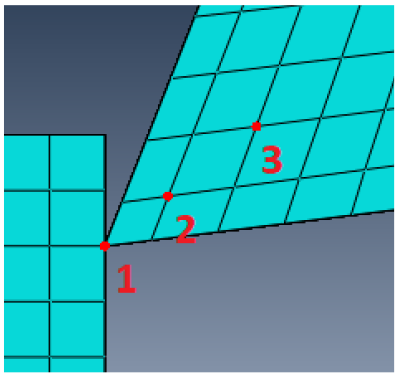
Byl zvolen obecný kontakt dvou prvků, kde spodní část modelu je pevně uložena a nástroj se pohybuje pouze v ose x rychlostí $v = 475\ mm.s^{-1}$. Tato rychlost přibližně odpovídá vrtáku o průměru 3 mm při 3000 $ot.min^{-1}$. Koeficient tření byl zvolen 0,15 a teplo vzniklé třením se z 50 % přenáší do nástroje a z 50 % do PU. Počáteční teplota celého modelu byla nastavena na 20 $°C$.



Obrázek 12: Zjednodušený model

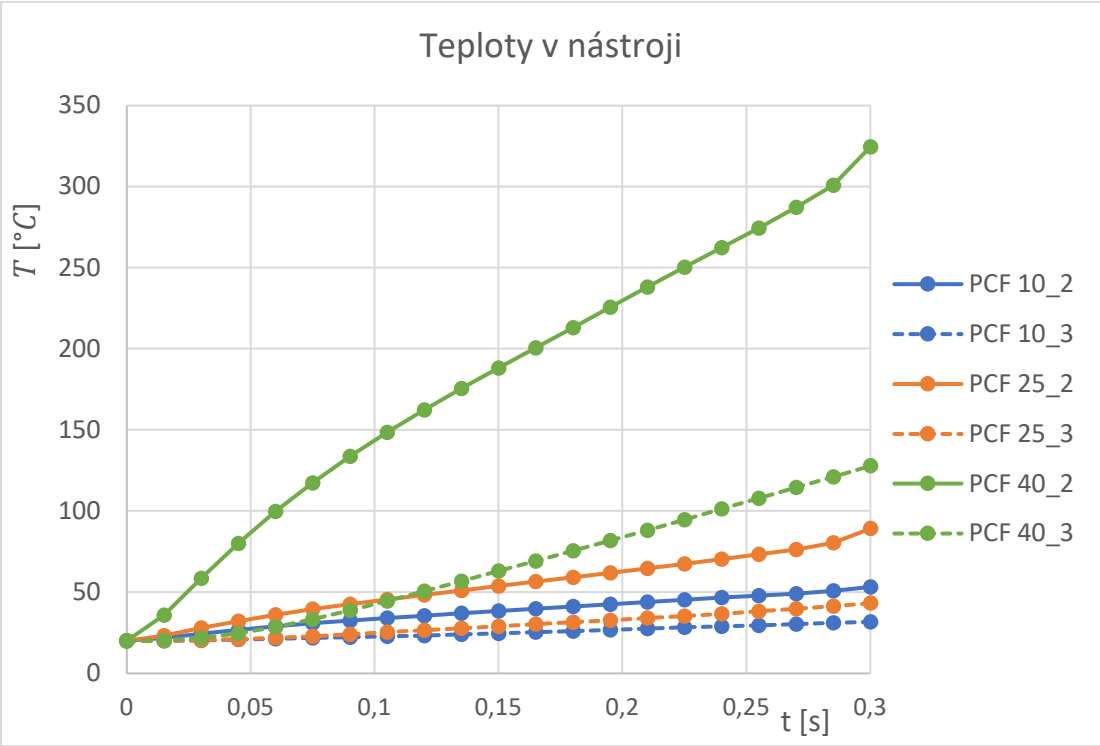
5.1.3. Vyhodnocení

Hlavním parametrem bylo vyhodnocení teploty nástroje a PU pěny. Pro určení teploty nástroje byly vybrány tři body viz obrázek. První bod není uváděn v grafech, protože u něj docházelo k extrémním a nereálným výsledkům z důvodu jeho polohy na okraji.



Obrázek 13: Výběr bodů

V následujícím grafu je zobrazen vývoj teploty v bodech 2 a 3 nástroje pro tři různé materiály.



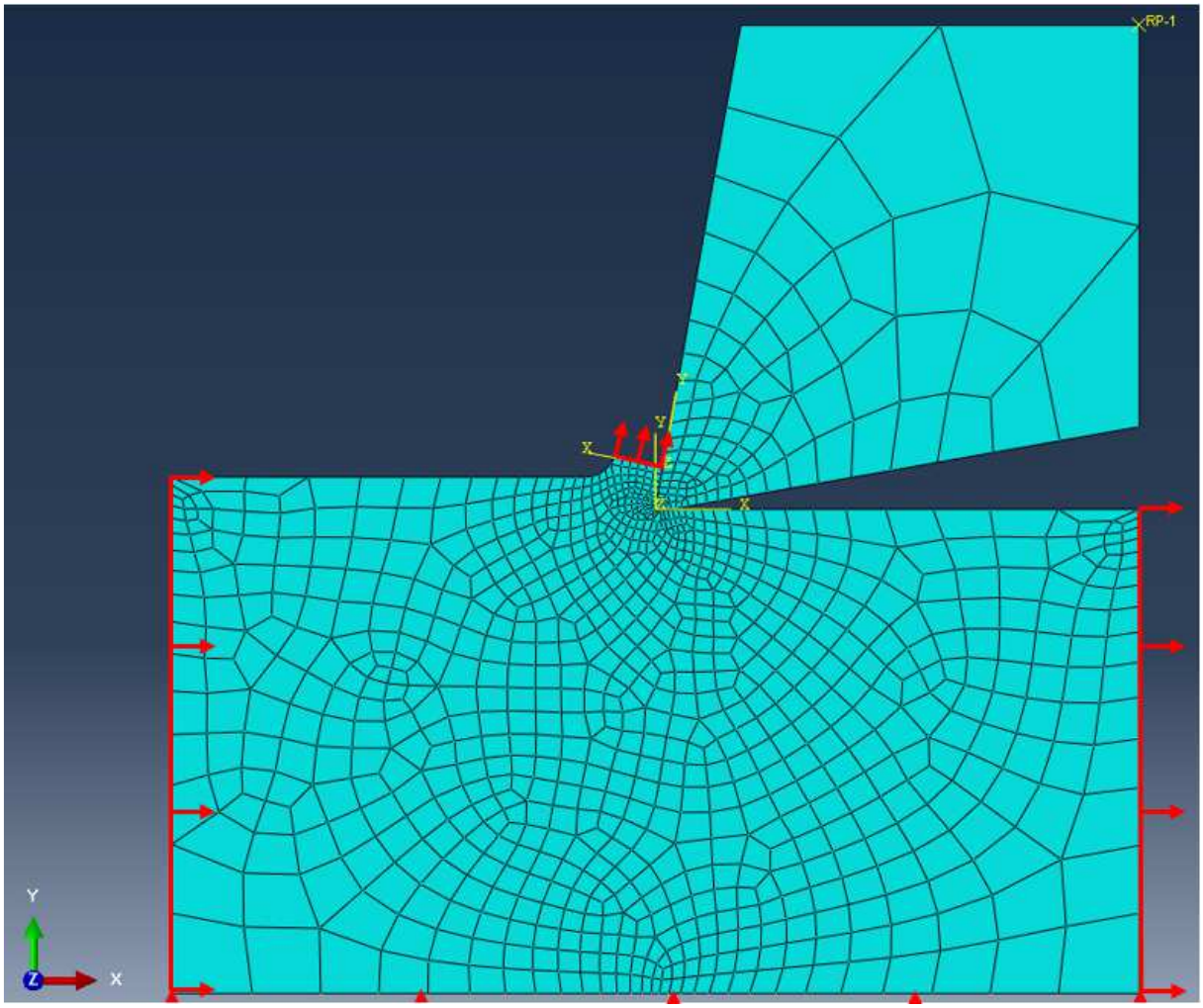
Obrázek 14: Graf teploty v nástroji pro zjednodušený model

S větší hustotou materiálu se zároveň zvyšuje teplota. Teploty stále rostou z důvodu absence odvodu tepla z nástroje. Tento model s přihlédnutím na jeho zjednodušení relativně dobře popisuje teploty nástroje, nicméně pro teploty PU je nevhodný. Při této konfiguraci se teplota PU zvedla jen o pár jednotek stupňů, nástroj přes daný povrch přejede pouze jednou a nedochází tak ke kumulaci tepla vlivem tření

při opakování daného jevu ve stejném místě jako při skutečném vrtání. Dominantním zdrojem tepla v úloze je teplo vznikající v důsledku plastického přetvoření. Energie z plastického přetvoření se z 80 % přetváří na energii tepelnou.

5.2. ALE model

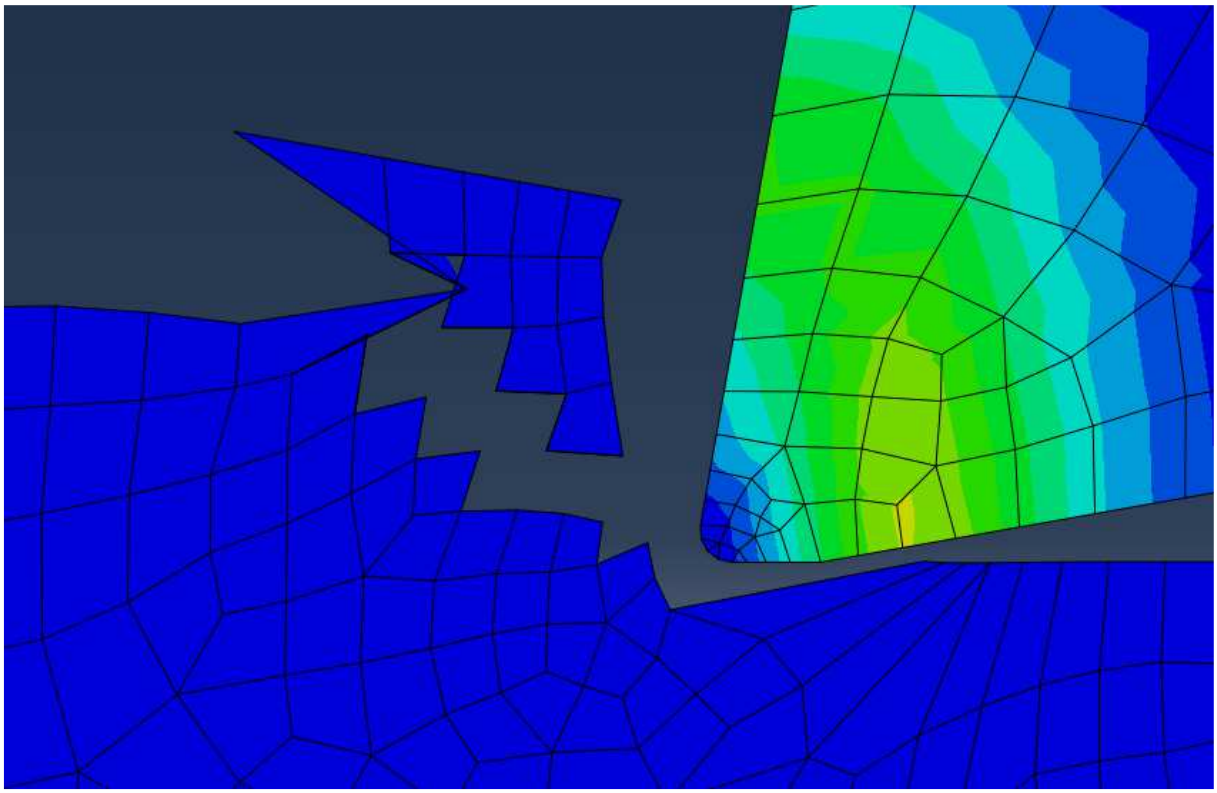
Model založený na metodě Arbitrary Lagrangian-Eulerian vysvětlené v úvodu byl proveden ve formě 2D pro zjednodušení výpočtu. Úloha byla řešena v módu 'Dynamic, Temp-disp, Explicit'. Materiálové parametry byly použity totožné s předchozím modelem. Nástroj se sklonem 10° byl opět proveden jako Rigid Body. Kontakt nástroje s PU pěnou byl nastaven jako surface to surface s koeficientem tření 0,15, teplo vzniklé třením se z 50 % přenáší do nástroje a z 50 % do PU. Energie z neelastického přetvoření se z 80 % přetváří na energii tepelnou. Jako druh elementů byl nastaven CPE4RT, tedy 4 uzlový bilineární pro deformaci a teplotu s redukovanou integrací a kontrolou hourglass efektu.



Obrázek 15: ALE model

5.2.1. Okrajové podmínky

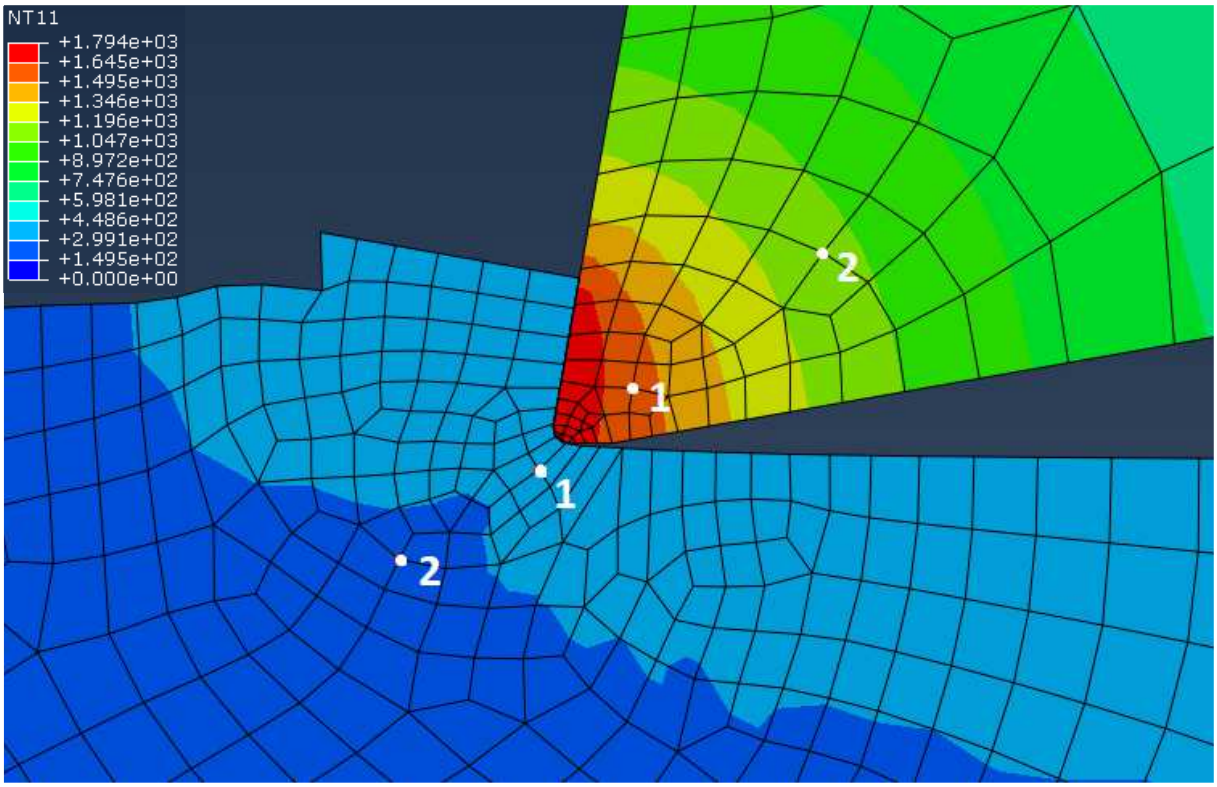
Okrajová podmínka pro vtok materiálu byla nastavena na $475\ mm.s^{-1}$, spodní část PU pěny a nástroj byly pevně uloženy. Teplo je odváděno vrchním a bočním povrchem nástroje. Počáteční teplota celého modelu byla nastavena na $20\,°C$. Kritérium porušení bylo definováno pomocí prodloužení při deformaci. Při pokusu definovat vývoj poškození lomovou energií, docházelo k narušení výpočtu excesivními deformacemi elementů.



Obrázek 16: Excesivní deformace

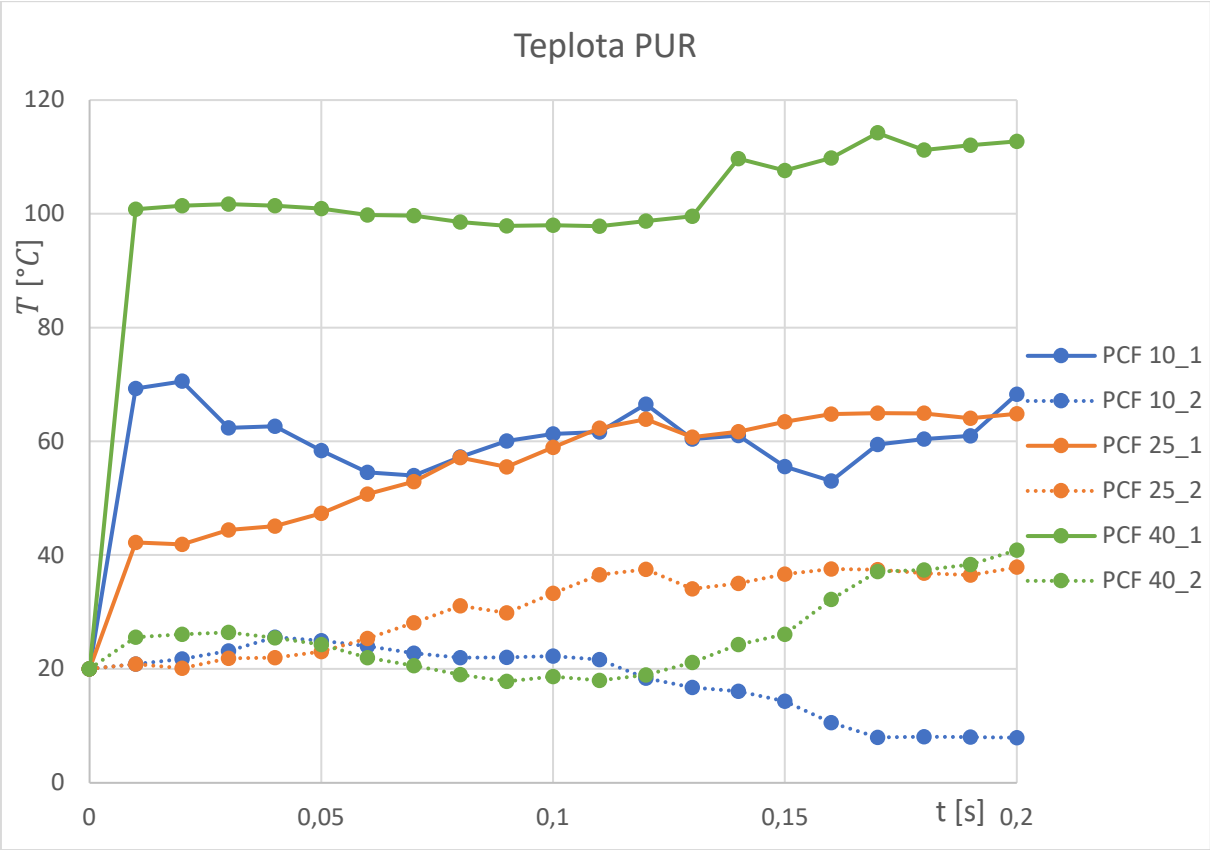
5.2.2. Vyhodnocení

Čas simulace byl nastaven na $0{,}2\,s$ s automatickým krokem $0{,}01\,s$. Vyhodnocovací grafy jsou uváděny pro 2 různé body v materiálu a 2 různé body v nástroji (zobrazené v Obrázek 17). Body byly vybrány v blízkosti kontaktu ovšem ne přímo na povrchu, aby se předešlo možným extrémům vznikajícím na hranicích těles. Při použití parametrů získaných z tahové zkoušky se simulace nepodařilo dopočítat z důvodu nepřirozené deformace některých elementů. Proto pro vyhodnocování byly použity parametry získané z převrácených hodnot tlakové zkoušky. Pro PCF 10 a PCF 40 byly použity parametry dopočtené při $25\ °C$ a pro PCF 25 při $155\ °C$ ze stejného důvodu proč byly použity parametry z tlakové zkoušky.



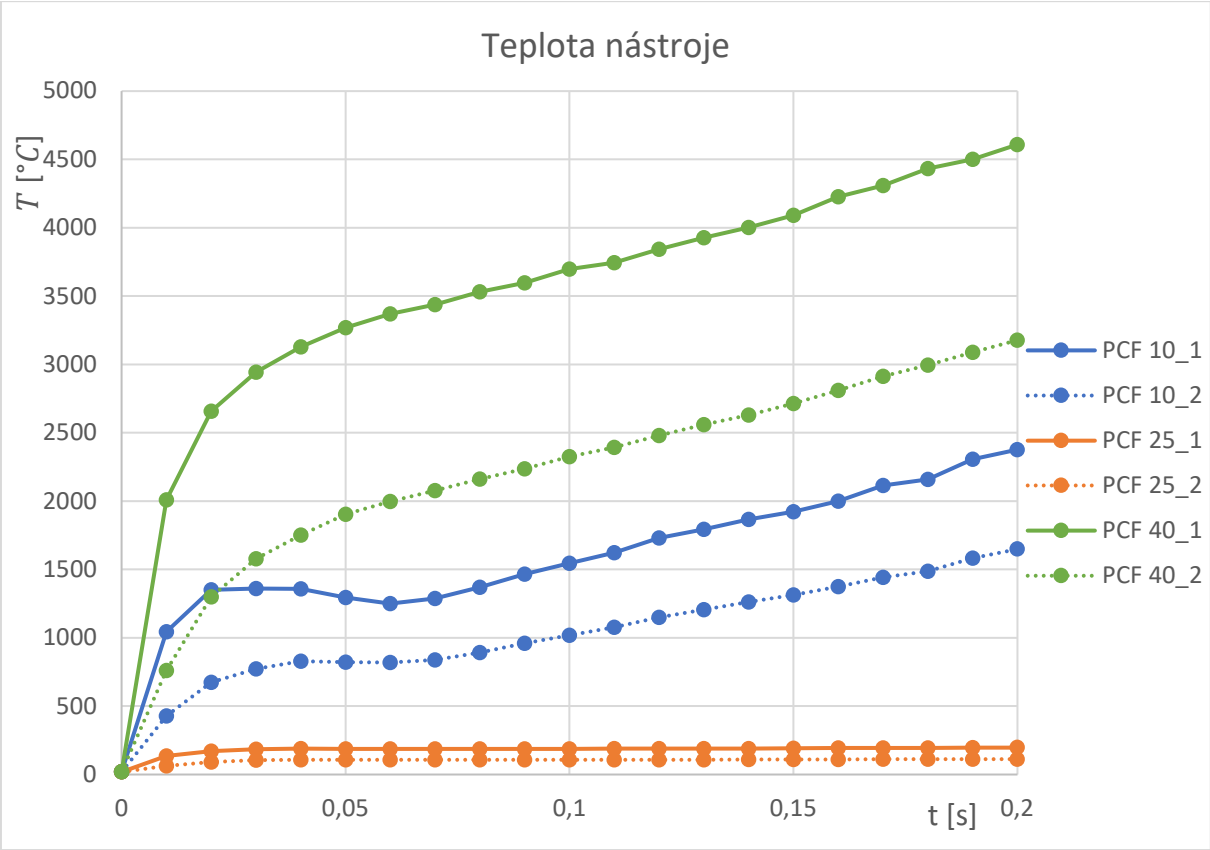
Obrázek 17: Označené body uváděné v grafech

V materiálu lze pozorovat rychlí nárůst teploty na začátku procesu. Teplota se následně relativně ustálí s drobnými výkyvy. Teplota těsně pod povrchem je výrazně vyšší než ve zbytku materiálu, což podporuje fakt, že PU má nízkou tepelnou vodivost. V následujícím grafu je zobrazen průběh teploty PU pěny pro všechny tři hustoty v označených bodech. Jen v případě PCF 10 v druhém bodě teplota klesá, což může být způsobeno odvodem materiálu. PCF 40 má nejvyšší hustotu materiálu a zároveň i nejvyšší teplotu v průběhu simulace. S vyšší hustotou by se měla zvedat i teplota při procesu úběru materiálu, tento jev ovšem není patrný mezi PCF 10 a PCF 25. Toto je možný důsledek výběru parametrů u PCF 25 naměřených při teplotě $155\ °C$, materiál vykazuje menší deformační zpevnění, a proto nevzniká tolik tepla při plastické deformaci materiálu., které se následně přenáší i do nástroje.



Obrázek 18: Graf teploty v PU pěně pro ALE model

V nástroji vznikají vysoké teploty s rychlím nárůstem v počátku simulace, který následně zpomalí, ale nikdy se zcela neustálí. Nepřestávající nárůst teploty může být způsoben nedostatečným odvodem tepla. Jen v případě PCF 25 dojde k ustálení teploty okolo $195\ °C$. Pro tento model byly použity parametry A, B a n z dat naměřených při teplotě $155\ °C$, tyto parametry vychází výrazně nižší než při teplotě $25\ °C$, materiál vykazuje menší deformační zpevnění, a proto nevzniká tolik tepla při plastické deformaci materiálu. Průběh teplot v nástroji je zobrazen v následujícím grafu.



Obrázek 19: Graf teploty nástroje pro ALE model

5.3. Diskuse

Simulace u zjednodušeného modelu bloku PU vykazuje dobrou predikci teplot nástroje. Pro porovnání s experimentálním měřením teplot vrtání vrtákem o průměru $2{,}9\ mm$ při $3000\ ot.min^{-1}$ bez použití chlazení byla naměřena teplota vrtáku $117{,}8\ °C$ [15]. Teploty simulované zjednodušeným modelem se pohybovali v rozmezí $30 - 130\ °C$, až na extrém jednoho z bodů pro PCF 40, který dosáhl maximální teploty $320\ °C$. Pro simulaci teploty v PU se jako lepší varianta ukazuje ALE model, který simuluje teplotu v materiálu od $37\ °C$ do $68\ °C$, mimo tyto hodnoty se vyskytují dva extrémy. Jeden bod pro PCF 10 klesl na teplotu $8\ °C$ a druhý bod PCF 40 vystoupal na teplotu $112\ °C$. Při experimentálním měření byla naměřena maximální teplota v materiálu $51{,}3\ °C$ [15], kde lze opět pozorovat určitou shodu se simulací. Největších teplot dosahovali simulace pro PCF 40, což lze vysvětlit její největší hustotou. S vyšší hustotou materiálu docházelo k uvolňování většího množství energie z plastické

přeměny. Při simulaci ALE modelu teplota nástroje stále rostla a nedocházelo k jejímu ustálení, toto mohlo být zapříčiněno nedostatečným odvodem tepla z nástroje, a tak docházelo k jeho značnému přehřívání.

6. Závěr

Cílem práce bylo vytvoření konstitutivního modelu náhrady kostní tkáně na bázi polyuretanové pěny. Výsledný model zohledňuje velké deformace, plastické přetvoření, tepelné a mechanické vlastnosti PU pěny.

V první části práce byla provedena rešerše v oblasti mechanického testování tvrdých polyuretanových pěn, její výhody, nevýhody a vhodnost pro simulaci lidských kostí. Dále byly vyhodnoceny zatěžovací křivky z měření uváděných v jiné odborné literatuře. Na základě nastudovaných znalostí byly navrženy podmínky pro mechanické zkoušky materiálu tahem a tlakem. Tahové a tlakové zkoušky byly zpracovány u tří různých hustot materiálu (10,25,40 PCF), pro dvě různé rychlosti ($v_1 = 4{,}5\ mm.s^{-1}, v_2 = 45\ mm.s^{-1}$) a tři různé teploty ($T_1 = 25°C, T_2 = 90°C,\ T_3 = 155°C$). Surová naměřená data byla přejata z Jihlavské polytechniky.

Následně byla popsána teorie k MKP a materiálovým modelům. Pomocí experimentálních dat z měření byly určeny parametry konstitutivního modelu Johnson-Cook, které byly následně použity v MKP simulaci v programu Abaqus.

Pro simulaci byly vytvořeny dva modely. Prvním zjednodušeným modelem je 3D blok PU pěny, kde je nástrojem ubírána vrchní část bloku. Druhý model byl založen na metodě ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) pro zjednodušení ve 2D. Při korektním nastavení parametrů 3D model predikuje teploty nástroje, které odpovídají reálnému experimentu. 2D model simuluje teploty v PU pěně odpovídající teplotám změřeným při experimentu.

Pro důvěryhodné použití modelů by bylo vhodné provést další experimentální měření teplot a optimalizovat parametry konstitutivního modelu J-C. Následně by bylo možné využít modelů při řešení problematiky vzniku termální nekrózy kostní tkáně.

Bibliografie

[1] ANTUNES, Marcelo, Álvaro CANO, Vera REALINHO, David ARENCÓN a José Ignacio VELASCO. Compression Properties and Cellular Structure of Polyurethane Composite Foams Combining Nanoclay and Different Reinforcements. *International Journal of Composite Materials*. 2014, (45, 27-34. DOI: 0.5923/j.cmaterials.201401.04. ISSN 2166-479X.

[2] *Sawbones biomechanical test materials, catalog 2017*. 2017. Dostupné také z: http://www.sawbones.com/wp/wp-content/uploads/2017/04/FINAL_Biomechanical_Catalog.pdf

[3] SHIM, V., J. BOHEME, C. JOSTEN a I. ANDERSON. Use of Polyurethane Foam in Orthopaedic Biomechanical Experimentation and Simulation. *Polyurethane*. InTech., 2012, s. 171-200. ISBN 9789535107262.

[4] MANE, J. V., S. CHANDRA, S. SHARMA, H. ALI, V. M. CHAVAN, B. S. MANJUNATH a R. J. PATEL. Mechanical Property Evaluation of Polyurethane Foam under Quasi-static and Dynamic Strain Rates - An Experimental Study. *Procedia Engineering*. 2017, (173), 726-731.

[5] STIRNA, U., I. BEVERTE, V. YAKUSHIN a U. CABULIS. Mechanical properties of rigid polyurethane foams at room and cryogenic temperatures. *Journal of Cellular Plastics*. 2011, (47), 337-355. DOI: 10.1177/0021955X11398381.

[6] GOGA, Vladimír. MEASUREMENT OF THE ENERGY ANSORPTION CAPABILITY OF POLYURETHANE FOAM. In: *Posterus* [online]. Kopčianska 14 Bratislava 851 01, 2010, [cit. 2018-06-02]. ISSN 1338-0087. Dostupné z: http://www.posterus.sk/?p=4244&output=pdf

[7] KIRITSIS, D., C. EMMANOUILIDIS, A. KORONIOS a J. MATHEW. *Engineering Asset Management: Proceedings of the Fourth World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM) 2009*. 1st edition. London, UK: Springer-Verlag, 2010. ISBN 978-1-84996-002-1. Dostupné také z: https://www.springer.com/gp/book/9780857293206

[8] ZVĚŘINA, MARTIN. *Výpočtová simulace procesu třískového obrábění*. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.

[9] LAKSHMANA RAO, C., V. NARAYANAMURTHY a K. R. Y. SIMHA. *Applied Impact Mechanics*. West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2016. ISBN 978-11-1924-180-5.

[10] KILIÇASLAN, CENK. *MODELLING AND SIMULATION OF METAL CUTTING BY FINITE ELEMENT METHOD*. İzmir, Turkey, 2009. Thesis. Engineering and Sciences of İzmir.

[11] MADAJ, MARTIN. *VÝVOJ VÝKONNÝCH VRTACÍCH NÁSTROJŮ S VYUŽITÍM CAD/CAM A ANALÝZY MECHANISMU TVORBY TŘÍSKY*. Brno, 2013. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně.

[12] ZETTERBERG, MIKAELA. *A critical overview of machining simulations in ABAQUS*. Stockholm, Sweden, 2014. Degree project. KTH ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY.

[13] FARAHAMI, H. K., M. KETABCHI a Sh. ZANGENEH. Determination of Johnson–Cook Plasticity Model Parameters for Inconel718. *Journal of Materials Engineering and Performance* [online]. 2017, **2017**(). DOI: 10.1007/s11665-017-2990-2. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/320312696_Determination_of_Johnson-Cook_Plasticity_Model_Parameters_for_Inconel718

[14] *LAST-A-FOAM® FR-4500 RIGID POLYURETHANE FOAM*. Spojené státy americké, 2019. Dostupné také z: https://www.generalplastics.com/wp-content/uploads/2019/09/FR-4500-Extended-TDS_METRIC.pdf

[15] SVÁROVSKÝ, Jiří. *Experimentální analýza teploty při vrtání*. Praha, 2018. Bakalářská práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Miloslav Vilímek.

Seznam obrázků

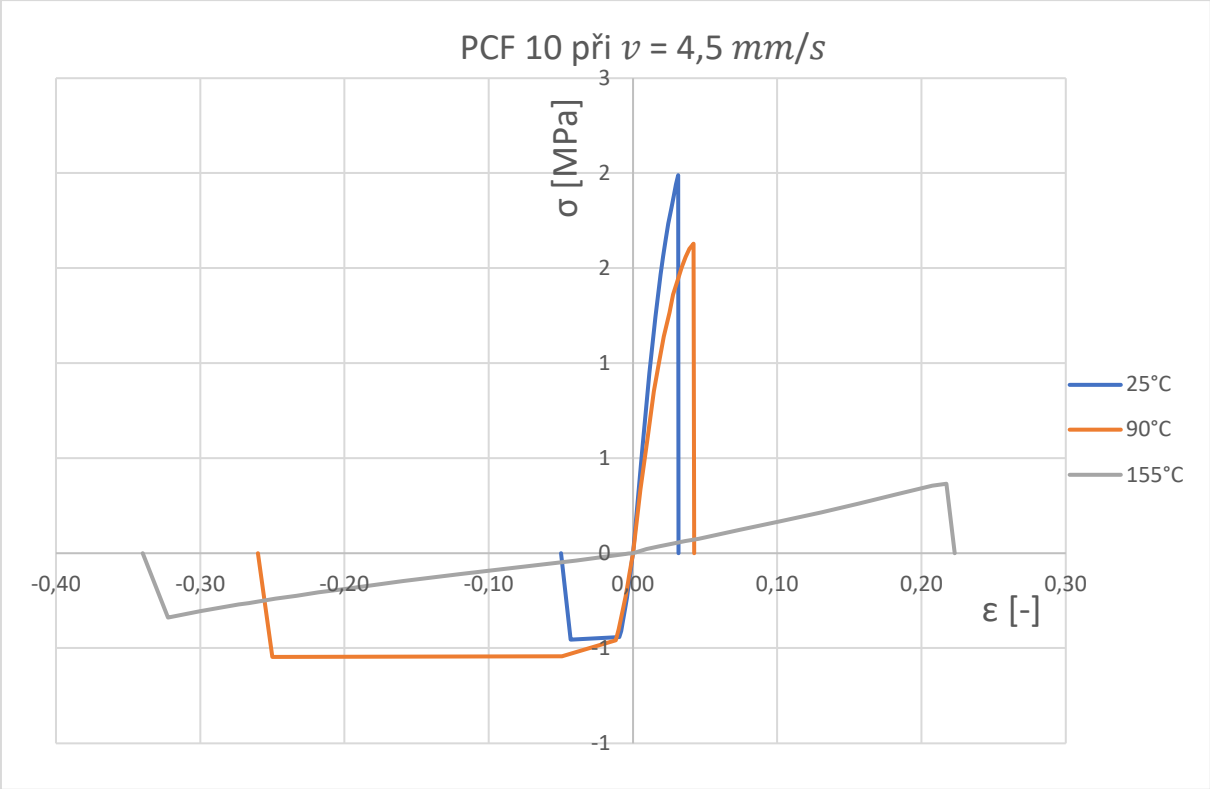
Obrázek 1: Odebírání materiálu PU [3] 5
Obrázek 2: Graf typické křivky tlakového zatěžování PU [4] 6
Obrázek 3: Graf postupného a dynamického zatížení v tlaku [4] 7
Obrázek 4: Graf zatěžovací charakteristiky PU desek při tlaku [6] 7
Obrázek 5: Deformace sítě, Lagrangeova metoda [9] 10
Obrázek 6: Deformace materiálu, Eulerova metoda [9] 10
Obrázek 7: ALE metoda [10] 11
Obrázek 8: Graf chování materiálu při různých teplotách 14
Obrázek 9: Graf aproximace plastické odezvy v tahu 16
Obrázek 10: Graf aproximace naměřených dat - plastická odezva v tlakové oblasti materiálu PCF 25 18
Obrázek 11:Graf vyhodnocení parametru m 20
Obrázek 12: Zjednodušený model 22
Obrázek 13: Výběr bodů 23
Obrázek 14: Graf teploty v nástroji pro zjednodušený model 23
Obrázek 15: ALE model 25
Obrázek 16: Excesivní deformace 26
Obrázek 17: Označené body uváděné v grafech 27
Obrázek 18: Graf teploty v PU pěně pro ALE model 28
Obrázek 19: Graf teploty nástroje pro ALE model 29

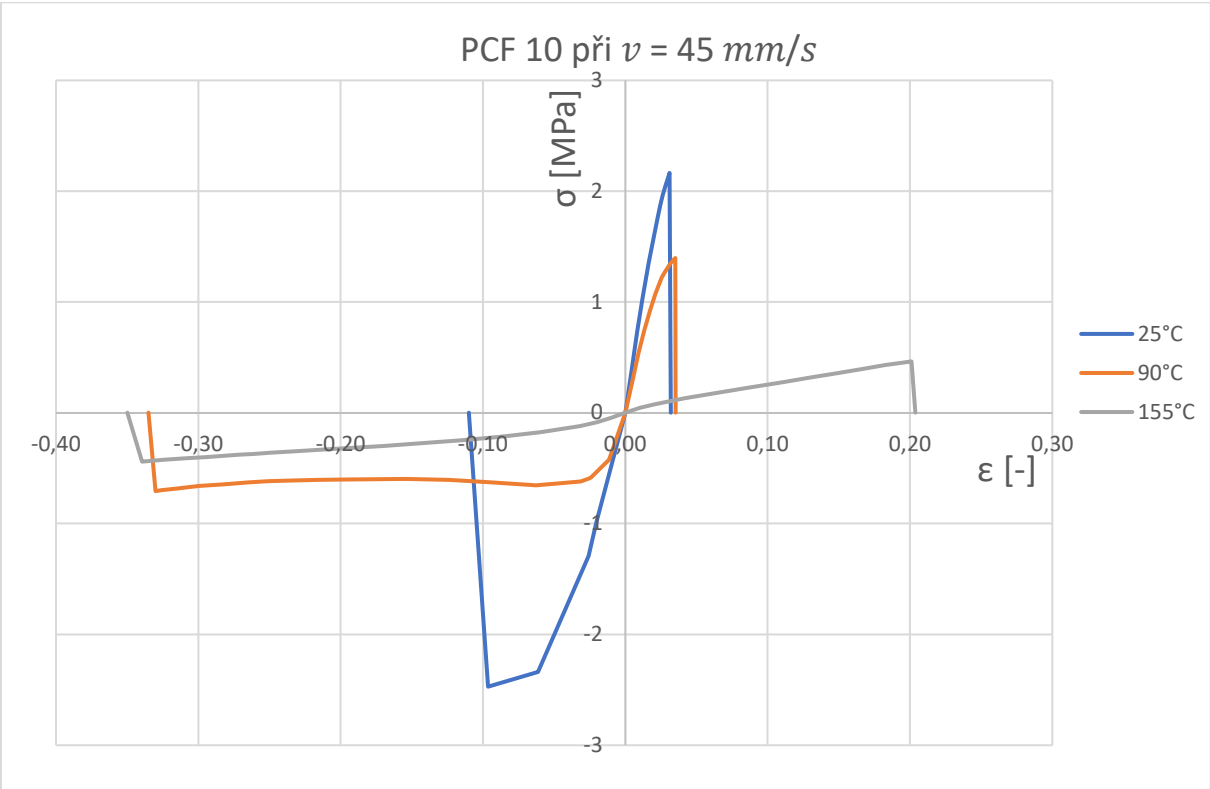
Seznam tabulek

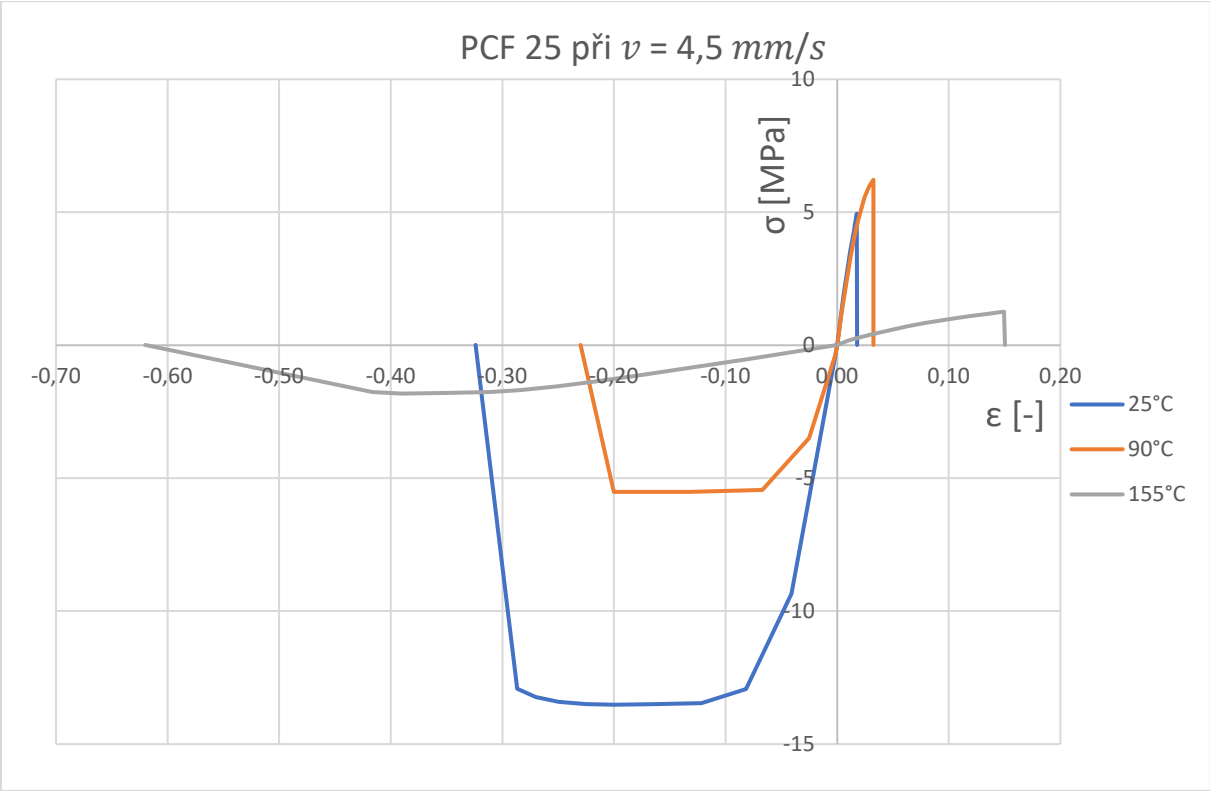
Tabulka 1: Výsledné parametry A,B a n pro tah 17
Tabulka 2: Výsledné parametry A,B a n pro plasticitu v tlakové oblasti 18
Tabulka 3: Parametry m charakterizující teplotní odpevňování 20
Tabulka 4: Použité parametry 21

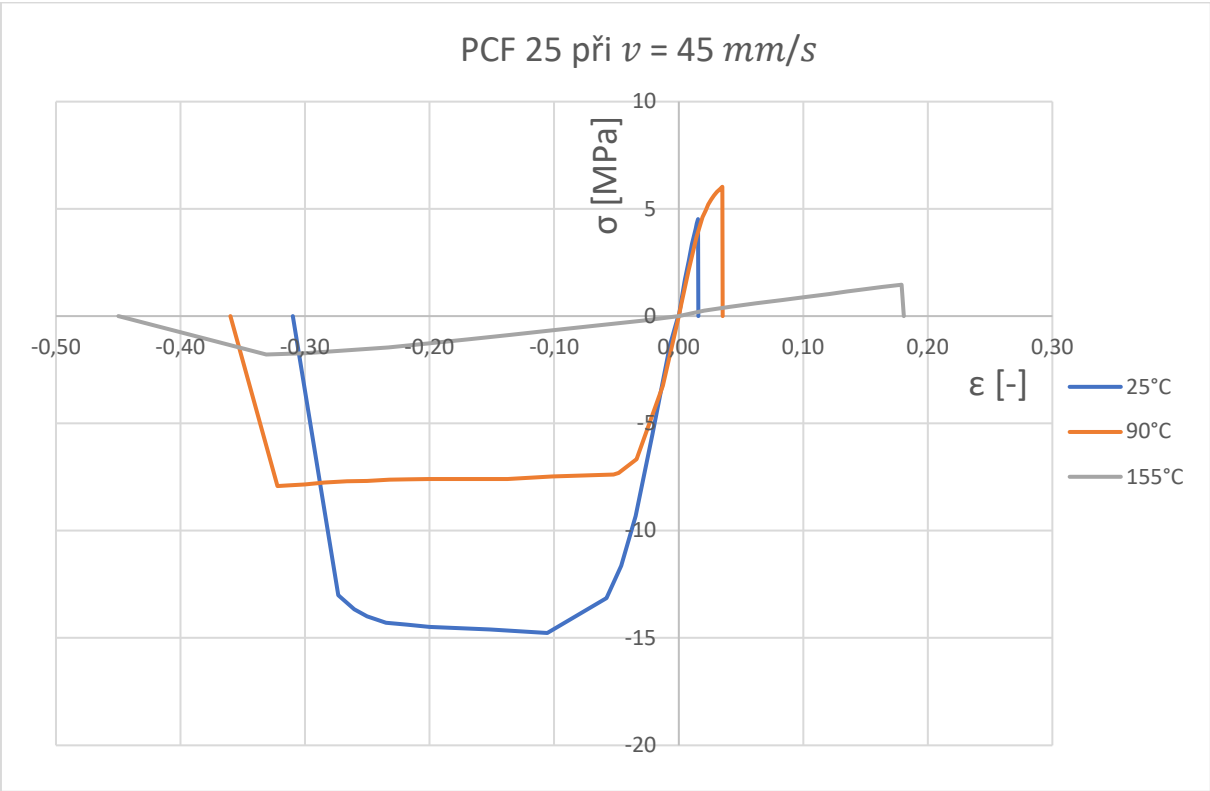
Přílohy

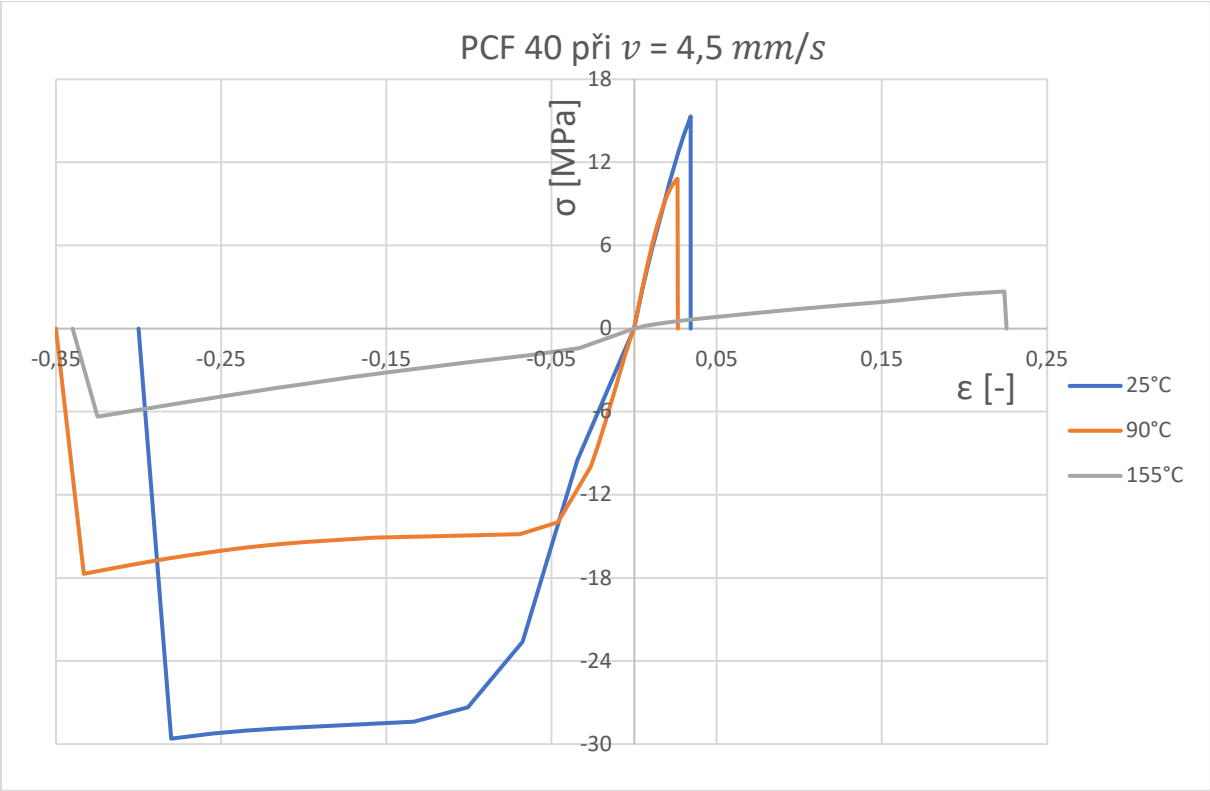
Příloha 1: Experimentální data

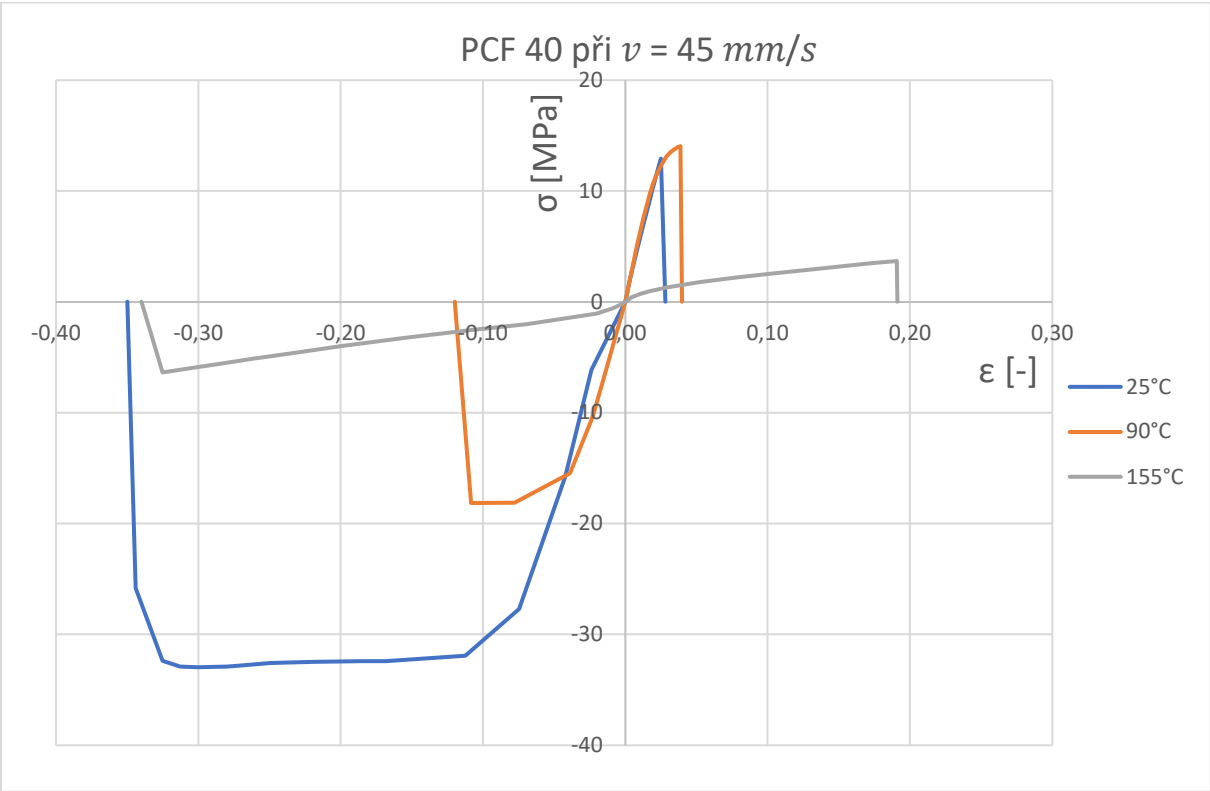





PCF 25 při v = 4,5 mm/s
σ [MPa]
ε [-]
10
5
0
-5
-10
-15
-0,70
-0,60
-0,50
-0,40
-0,30
-0,20
-0,10
0,00
0,10
0,20
25°C
90°C
155°C


PCF 25 při v = 45 mm/s
σ [MPa]
ε [-]
10
5
0
-5
-10
-15
-20
-0,50
-0,40
-0,30
-0,20
-0,10
0,00
0,10
0,20
0,30
25°C
90°C
155°C


PCF 40 při v = 4,5 mm/s
σ [MPa]
18
12
6
0
-6
-12
-18
-24
-30
-0,35
-0,25
-0,15
-0,05
0,05
0,15
0,25
ε [-]
25°C
90°C
155°C


PCF 40 při v = 45 mm/s
σ [MPa]
20
10
0
-10
-20
-30
-40
-0,40
-0,30
-0,20
-0,10
0,00
0,10
0,20
0,30
ε [-]
25°C
90°C
155°C