

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N 2301 Strojní inženýrství  
Studijní zaměření: 2303T004 Strojírenská technologie – technologie obrábění

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Možnosti simulace řezného procesu a jeho využití v praxi

Autor: **Bc. Zdeněk Barvůř**  
Vedoucí práce: **Ing. Miroslav ZETEK, Ph.D.**

Akademický rok 2015/16

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Zdeněk BARVÍŘ

Osobní číslo: S14N0064P

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: Strojírenská technologie - technologie obrábění

Název tématu: Možnosti simulace řezného procesu a jejich využití v praxi

Zadávatel katedra: Katedra technologie obrábění

### Zásady pro vypracování:


1. Úvod
2. Rozbor současného stavu
3. Návrh vlastních experimentů a jejich realizace
4. Zhodnocení výsledků a doporučení
5. Závěr

Rozsah grafických prací: dle potřeby  
Rozsah kvalifikační práce: 50 - 70 stran  
Forma zpracování diplomové práce: tištěná  
Seznam odborné literatury:

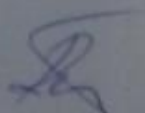
- Viktor P. Astakhov, Geometry of Single-point Turning Tools and Drills, Springer-Verlag London Limited 2010, ISSN 1860-5168, ISBN 978-1-84996-052-6, e-ISBN 978-1-84996-053-3
- BRYCHTA J.; ČEP R. NOVÁKOVÁ J.; PETŘKOVSKÁ L., Technologie II - 1. díl. Ostrava : VŠB - TU Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1641-8
- ČEP R., PETRŮ J., Experimentální metody v obrábění, Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2011, 146 s. ISBN 978-80-248-2533-5

Vedoucí diplomové práce: Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.  
Katedra technologie obrábění  
Konzultant diplomové práce: Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.  
Katedra technologie obrábění

Datum zadání diplomové práce: 18. října 2015  
Termín odevzdání diplomové práce: 20. května 2016

  
Doc. Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 20. října 2015

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne .....

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Tímto chci především poděkovat vedoucímu Ing. Miroslavu Zetkovi Ph.D. za obětavou pomoc a cenné rady při zpracovávání diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat za velmi důležité konzultace panu Ing. Michalu Zemkovi, Ph.D. a panu Ing. Filipu Tikalovi, Ph.D za obrovskou morální i výpočtářskou pomoc.

Nakonec bych moc chtěl poděkovat své báječné rodině a milující přítelkyni, kteří mě po celou dobu studiu nesmírně podporovali.

## ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Barvíř	Jméno Zdeněk	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	N 2301 „Strojírenská technologie-technologie obrábění“		
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Ing. Zetek, Ph.D.	Jméno Miroslav	
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU - FST - KTO		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<del>BAKALÁŘSKÁ</del>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Možnosti simulace řezného procesu a jejich využití v praxi		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KTO	<b>ROK ODEV.</b>	2016
----------------	---------	----------------	-----	------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	67	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	43	<b>GRAF. ČÁST</b>	24
---------------	----	---------------------	----	-------------------	----

<p><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Tato práce se zabývá problematikou simulací v průběhu obrábění. Nejdříve bylo nutno projít a nastudovat samotný software, ve kterém simulace proběhnou. Následně se provedl praktický test na dílně RTI a byla provedena vzájemná korelace výsledku simulace s reálnými výsledky za účelem ověření možností využití simulace v praxi.</p>
<p><b>KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p>Simulace řezného procesu, tvar třísky, testování, obrábění, deformace</p>

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Barvíř	Name Zdeněk	
<b>FIELD OF STUDY</b>	N 2301 „Department of Machining Technology“		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Zetek, Ph.D.	Name Miroslav	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST – KTO		
<b>TYPE OF WORK</b>	<del>BACHELOR</del>	<b>DIPLOMA</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Options simulation of the cutting process and their use in practice		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Machining Technology	<b>SUBMITTED IN</b>	2016
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	67	<b>TEXT PART</b>	43	<b>GRAPHICAL PART</b>	24
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

<p><b>BRIEF DESCRIPTION</b></p> <p><b>TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b></p>	<p>This work will address the issue of simulation during machining. First, it was necessary to go through and study the software itself, in which the simulation will take place. This is followed by practical test in laboratories RTI. Correlation was made with the simulation results with real results to verify the possibility of using simulation in practice.</p>
<b>KEY WORDS</b>	<p>Simulation of the cutting process, shape splinters, the testing, the machining, the deformation</p>

## Obsah

Seznam symbolů, značek a jednotek.....	1
1 Úvod .....	2
2 Rozbor současného stavu.....	3
2.1. Simulační program Deform .....	3
2.2. Simulační program AdvantEdge .....	5
2.3. Simulační program Abaqus.....	7
2.4. Vyhodnocení simulačních programů.....	9
2.5. Metoda konečných prvků.....	10
2.5.1. Další simulační metody.....	11
2.6. Děje v procesu obrábění.....	12
2.6.1. Teorie tvorby třísky.....	12
2.6.2. Objemový součinitel třísky W.....	14
2.6.3. Tvary a druhy třísek .....	15
2.7. Tepelná bilance .....	17
2.7.1. Teplota řezání.....	19
3 Návrh vlastních experimentů a jejich realizace.....	20
3.1. Nastavování prvků pro spuštění simulace.....	21
3.1.1. Nastavení nástroje.....	21
3.1.2. Nastavení geometrie .....	22
3.1.3. Síť objektu.....	22
3.2. Testování – zhodnocení výsledků simulace a reálné třísky .....	23
3.2.1. Obráběný materiál 12 050.1.....	25
3.2.2. Použitý nástroj – VBD APKT .....	27
3.2.3. Hydraulický upínač .....	28
3.2.4. Použitý stroj MCV 750A.....	29
3.2.5. Řezné podmínky .....	30
3.2.6. Příslušenství – pomocné přístroje .....	30
3.3. Testování – získání reálného vzorku v hal. labor. KTO .....	31
3.3.1. První testování – šířka záběru 0,5 mm .....	31
3.3.2. Druhé testování – šířka záběru 3 mm.....	32
3.3.3. Třetí testování – šířka záběru 5 mm .....	33
3.3.4. Čtvrté testování – šířka záběru 8 mm.....	36



3.4.	Vysokorychlostní kamera .....	38
3.5.	Termovizní kamera .....	39
3.6.	Optické skenovací zařízení IFM G4 .....	41
3.7.	Testování – získání vzorku ze simulace .....	43
4	Zhodnocení výsledků a doporučení.....	48
4.1.	Porovnání simulace s reálným experimentem .....	48
5	Závěr .....	54
6	Citované zdroje.....	55
6.1.	Použitá literatura .....	55
6.2.	Seznam obrázků .....	55
6.3.	Seznam tabulek .....	57
6.4.	Seznam grafů .....	57
6.5.	Webové stránky.....	57

## Seznam symbolů, značek a jednotek

Symboly a značky	Popis
Deform	Program pro počítačové modelování technologických procesů
AdvantEdge	Program pro obrábění FEM soubor programů
Abaqus	Program jako klasický řešič MKP
FEM	Finite element method – Metoda konečných prvků
MKP	Metoda konečných prvků
Preprocessing	Speciální program používaný v jazycích C a C++
Processing	Zpracovávání informací od uživatele
MBS	Multi body simulace - software pro simulace dyn. chování soustav
CFD	Computational Fluid Dynamics - simulace proudění
CAD	Computer-aided design – počítačem podporované projektování
3D	Třírozměrný
mm	Jednotka délky
S-N-O	Stroj-nástroj-obrobek
AMG	Automatický síťový generátor
MPa	Jednotka tlaku
HB	Tvrдость podle Brinella
HRC	Tvrдость podle Rockwella
Kg	Jednotka hmotnosti
μm	Mikrometr
DDE	Digital Detail Enhancement – Digitální vylepšení detailu

Symboly a značky	Jednotky	Popis
$v_c$	[m.min <sup>-1</sup> ]	Řezná rychlost
$f_{ot}$	[mm]	Posuv na otáčku
$a_p$	[mm]	Hloubka řezu
$F$	[N]	Řezná síla
$p$	[MPa]	Řezný odpor
$Q$	[J]	Celkové teplo
$F_c$	[N]	Řezná složka síly obrábění
$T$	[min]	Čas obrábění
$a_e$	[mm]	Šířka záběru

## 1 Úvod

Diplomová práce se zabývá problematikou simulací řezného procesu. Cílem bylo porovnat simulaci s reálným experimentem, tzn. namodelovat co nejpřesněji proces obrábění, a poté ho vzájemně porovnat. Porovnání se zaměřovalo na tvar utvářené třísky při frézování, velikost teploty odřezávané třísky a vzniklou deformaci.

Nejdříve bylo nutno projít a nastudovat samotné softwary, ve kterých by mohly simulace proběhnout. Následně se rozhodnout jaký software bude pro simulaci nejlepší.

Následně proběhl praktický test na dílně RTI, tzv. testování. RTI je Regionální technologický institut, který je strojírenským a technologickým výzkumným centrem Fakulty strojní, Západočeské univerzity v Plzni. Tříska se odebírala po určitých krocích. Snahou bylo dostat různé tvary, teploty třísek a deformace. Proběhly tedy po sobě jdoucí testy a v každém se měnila šířka záběru.

Poté se porovнала vzájemná shoda výsledku simulace s reálným výsledkem a tím tak došlo k finálnímu porovnání. Simulace, které byly použity, pracují s menším, či větším zjednodušením situace. Zjednodušení modelu závisí na volbě hustoty sítě, stanovení okrajových podmínek a správném vyhodnocení závěrečných výsledků. Pokud ovšem nastane případ, že simulace nejsou dostačující, je potřeba je kombinovat s experimenty (testováním, měřením, zkouškami). V takových případech je potřeba se rozhodnout a zhodnotit, jaká cesta bude méně náročná, proveditelná a finančně snesitelnější.

## 2 Rozbor současného stavu

### 2.1. Simulační program Deform

Jeden z nejvíce používaných inženýrských softwarů v oblasti technologií. Deform, který se dnes používá ve firmách, je používán převážně pro tváření. Uživatelům však umožňuje analyzovat i obrábění jako vrtání, soustružení, frézování také dále kování, tepelné zpracování a další procesy. Každé simulační prostředí, které se používá, snižuje mylné pokusy, které by se odehrávaly na dílně. Pro uživatele, kteří s tímto programem začínají, poskytuje nápovědu, která ho směřuje správným směrem. Deform je tudíž vhodný pro simulaci různých technologických operací.

[W2]

Původní oblast používání Deformu byly tvářecí operace, ale pak byl zaměřen i na procesy obrábění ve 2D a 3D. Uživateli umožňuje získání informací o namáhání nástroje a obrobku. Zobrazuje mechanické, teplotní a celkové síly při simulaci.

Používá síťování modelu nástroje a obrobku. Záleží pouze na uživateli, jak jemnou, či hrubou síť si zvolí v místech zájmu simulace. Dokonce se síť dá nastavit v místě, ve kterém uživatel sám chce. Uživatel si musí zvolit svoji určitou část, kterou chce podrobně zkoumat, a kde simulace budou nejvíce důležité.

Proces simulace je pomocný při sumarizaci nákladů obrábění. Tímto způsobem lze docílit znatelné finanční úspory před samotným reálným experimentem.

Dnešní konkurenční tlaky vyžadují, aby společnost mohla využívat každý nástroj, který má k dispozici. K tomuto slouží Deform, jelikož simulace technologických procesů má velmi dobrou shodu s reálným výsledkem. [W2]

#### Výhody:

Největší výhodou je zkrácení vývojového času ve strojírenských firmách, fakultách vysokých škol a výzkumných institucích. Největší váhu to pro firmu ovšem má u snížení výrobních nákladů. Pokud se výrobek odzkouší nejdříve v nastavených simulacích, teprve poté se můžou finální náklady razantně snížit. Počítačové simulace mají za následek zvyšování kvality, zlepšení inovací a hlavně dodržování norem.

Různé technologie mohou být rychle nastaveny. Deform umožňuje různé technologie od soustružení 2D, 3D, vrtání a frézování po tváření. Uživatel, který si simulaci nastavuje, musí zadat vstupní parametry, které definují teplotu nástroje,

uzlové okrajové podmínky, teplotu držáku a okolí, povrchové vrstvy, obrobek a geometrii nástroje. Nejdůležitější je však velikost sítě - tzn. hustota sítě.

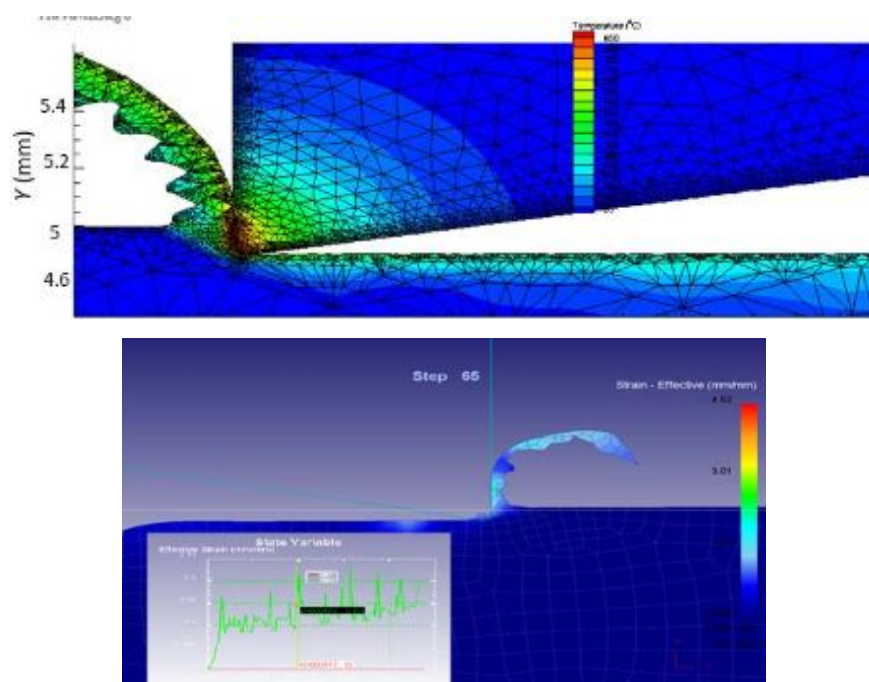
Deform ve svých naprogramovaných knihovnách nabízí uživateli mnoho materiálů, jako jsou základní oceli, superslitiny, tak i materiály podskupin P, S, H. Různé a nové materiály jsou možné nastavovat i pro obrobek. Tímto se tento software umožňuje se co nejlíže přiblížit reálné situaci, která vznikne při obrábění.

Simulaci lze zastavit, upravit v ní chyby a poté pokračovat dále v programu. Uživatel se nemusí vracet zpátky na začátek a procházet si simulaci odznovu. [W2]

### Nevýhody:

Simulace je velmi náročná na čas, pokud se použije mnoho kroků, nebo pokud je velmi jemná síť na modelu. Dále se musí brát v potaz hardwarové možnosti počítačové techniky. Jestliže je technika nedostačující, je pravděpodobnější, že je čas řešení neúnosně dlouhý, popřípadě nelze výpočet spustit.

[W2]



Obrázek 1 – Simulace soustružení v Deformu [W4]

## 2.2. Simulační program AdvantEdge

Jeden z nejmodernějších a nejvíce používaných simulačních programů je AdvantEdge (AE). Pro své simulace tento software používá modelování pomocí metody konečných prvků a obráběcí FEM soubor. Při své vlastní simulaci využívá dvojrozměrné 2D a nebo trojrozměrné 3D prostředí. Pracuje s vlastnostmi, jako je plynulá změna sítě, či adaptivní síťování.

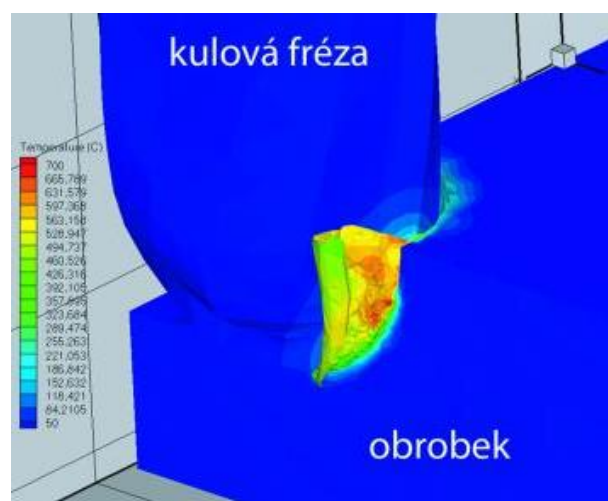
AdvantEdge nabízí pro své uživatele mnoho přívětivých ovládacích prvků a velmi jednoduché rozhraní. Dále nabízí rychlé nastavení různých obráběcích procesů. Mezi nejdůležitější prostředí patří frézování a soustružení ve 2D i ve 3D. V tomto prostředí se pracuje s procesy, jako je odpeňování a deformační zpeňování materiálu.

Využití tohoto softwaru spočívá v získávání všech kompletních informací o procesu obrábění.

Pokud budou mít vstupní data kvalitní úroveň, lze pouze pomocí osobních počítačů minimalizovat materiálové a lidské zdroje ve velmi krátkém časovém úseku. Uživateli je tak umožněno zpracovávat analýzu rozličných problémů spojených s obráběcím procesem, aniž by firma musela investovat do mnohdy rozsáhlých a nákladných experimentů.

Výpočtové modely a jejich přesnost a spolehlivost jsou silně závislé na modelech smykového napětí obrobku ve vztahu k deformaci, teplotám, deformační rychlosti, stejně jako na vlastnostech definujících tření mezi nástrojem a obrobkem.

[W1]



Obrázek 2 - Animace výsledků simulace řezného procesu ve 3D – teplotní pole [W1]

Samotnou práci v softwaru AdvantEdge můžeme rozdělit do čtyř etap, kterými jsou zadání, nastavení simulace, vlastní výpočet a vyhodnocení simulace.

Proto, aby se puštěná simulace shodovala co možná nejvíce se skutečným, reálným řezným procesem, je nutné se soustředit na přesné a kvalitní zadání simulace.

[W1]

Hlavní body, které definují řezný proces:

- 1) Nástroj – typ, materiál, geometrie, povlakování, dynamické chování
- 2) Obrobek – tvar, rozměry, materiál
- 3) Obráběcí proces – parametry procesu (řezná rychlost, posuv, hloubky řezu)
- 4) Možnosti simulačního programu – parametry výpočtu (velikost elementů modelu, atd.)

Simulace řezného procesu je realizována pomocí jednoho záběru definovaného břítu nástroje. Břit nástroje lze přitom určovat z nejrůznějších hledisek jako geometrie, tvaru, obrobku, řezných materiálů a dokonce i povlaků.

Výstupem řezného procesu po dosažení všech podmínek je animace finálního záběru nástroje a obrobku se znázorněním tvořící se třísky. Tuto animaci lze dále analyzovat z hlediska podoby, vzniku utvářené třísky, velikosti řezné a posuvové síly při obrábění, vzniku a rozložení teplot a napětí v obrobku, třísece a nástroji.

[W1]

#### Výhody:

Jedná se o přehledný, jednoduchý, jednoúčelový, robustní software pro uživatele. Je dobře vytvořený pro danou problematiku, ale nedá se v něm řešit nic jiného. Výhoda je to pro uživatele, který řeší pouze obrábění. Jelikož se nemusí učit věci okolo a není to zbytečně složité. Nevýhodné je to v případě, kdy uživatel potřebuje něco jiného než obrábění. To pak nelze simulačně realizovat.

Podobně jako u Deformu je tu možnost vkládání nového materiálu, možnost importu vlastního nástroje (složitého i jednoduchého), geometrie obrobku a podobně.

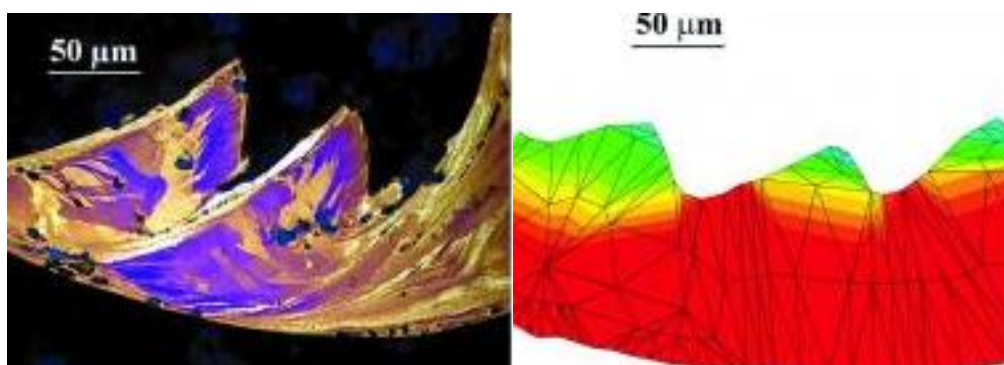
Na rozdíl od již zmiňovaného Deformu byl AdventEdge vytvořen převážně pro obráběcí procesy. Mezi tyto procesy se dá zahrnout frézování, soustružení, řezání, drážkování a protahování. Obsahuje také celkem rozsáhlou materiálovou knihovnu, kde se nacházejí všelijaké slitiny, Inconel a dokonce i letecké slitiny.

[W2]

#### Nevýhody:

AdvantEdge neposkytuje uživateli žádné operace pro proces vrtání a jiné další technologické operace.

[W2]



Obrázek 3 – Vzniklá tříška – experiment vs. simulace [W2]

### 2.3. Simulační program Abaqus

Výpočetní software založený na metodě konečných prvků (MKP) poskytuje jedinečné vizualizace a vykreslování. Dále umožňuje řešení úloh statických, nestacionárních a úloh týkajících se tepla a proudění.

Používá se ve strojírenském a automobilovém průmyslu, kde se zkoumají dynamické vibrace, multibody systém, nelineární statiku, crash testy, tepelně-mechanické zatížení soustavy a podobně.

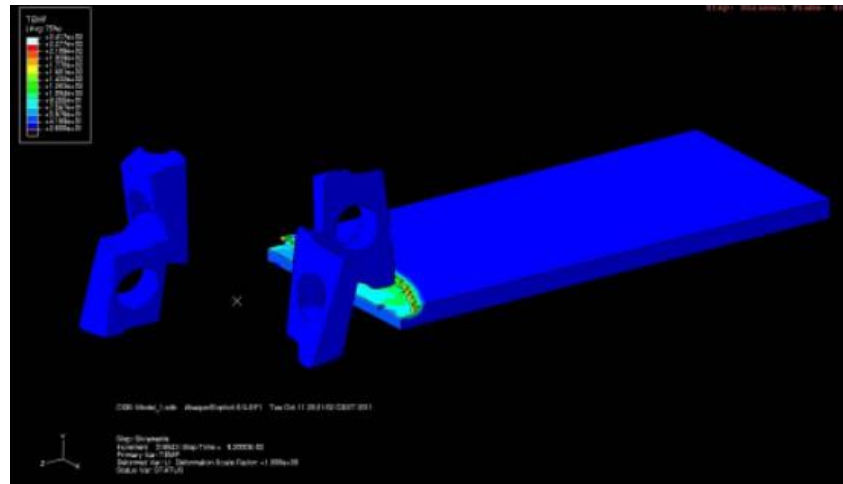
[W2]

Program Abaqus je soubor produktů, který dokáže znázornit simulace. Tímto se umožní zlepšení nového výrobku a to ještě před započítáním samotného výrobního procesu. Je tak možno šetřit náklady na vývoj a výzkum, a může se tím prověřit i funkčnost konstrukcí, či jednoduchých sestav. Tento simulační software dnes využívá mnoho firem na světě a slouží jim ke snížení nákladů a zvýšení efektivity.



Modul ABAQUS/Explicit je i modul pro výpočet dynamických a rázových dějů pomocí explicitních metod integrování.

[W2]



Obrázek 4 – Simulace frézování v programu Abaqus [W6]

#### Výhody:

V Abaqusu jsou simulace vyvolávány pomocí použití klíčových slov. Uživatel má prostor pro modelování obráběcí operace použit základních postupů. Výhodou je zde vygenerování detailního modelu v simulaci.

[W2]

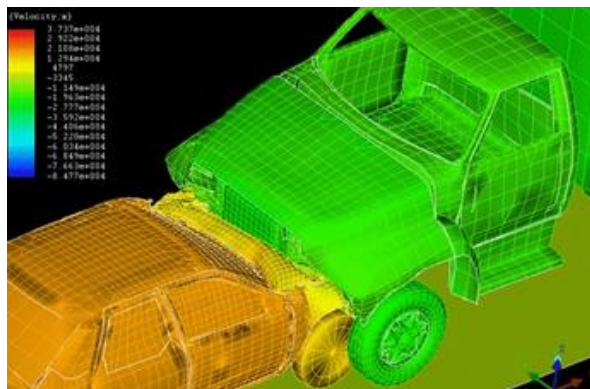
#### Nevýhody:

Tento druh softwaru je asi nejvíce složitý ze všech zmíněných simulačních programů. Uživatel musí být připraven na to, že u simulací stráví více času, jelikož je tento software psán obecně. Pokud se uživatel bude zaměřovat na proces obrábění, nenajde zde žádného pomocníka nebo prostředí, které by ho vedlo jako v předešlých softwarech.

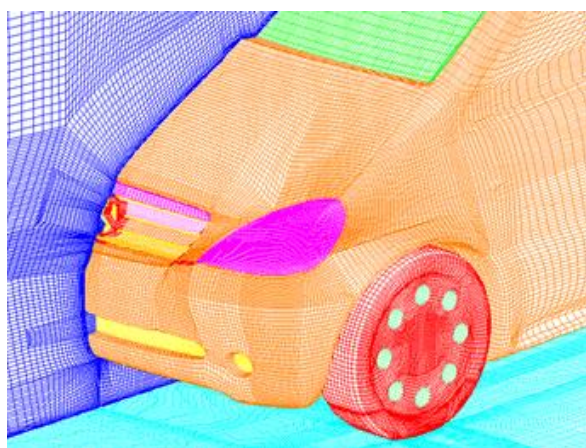
[W2]

Protože Abaqus nemá podporu pro žádné materiály, musí si uživatel sám nadefinovat své modely z různorodých materiálů. V předcházejících softwarech si uživatel může sáhnout do knihovny a použít přímo ten materiál, nebo nejvíce podobný.

[W2]



Obrázek 5 – Konečno prvková síť a crash analýza [W18]



Obrázek 6 – Model proudění u osobního automobilu [W18]

## 2.4. Vyhodnocení simulačních programů

Je nadmíru jasné, že takovýchto simulačních programů je mnohem více. Další možné simulační programy, které v této práci nejsou rozebírány, jsou například Ansys, MSC.Software a NX.

Deform, AdvantEdge a Abaqus jsou v této práci porovnávány, jelikož byly v této problematice používány. Abaqus je pro tento problém dobrým řešením a je tudíž vhodný pro tuto analýzu. Nicméně pro samotnou simulaci byl vybrán Deform.

Deform, který je postavený na výpočtu technologických operací a je to specializovaný konečně prvkový software pro řešení tohoto druhu problému. Je to jeden ze základních inženýrských softwarů, který umožňuje simulace obrábění a vizualizace obrobené třísky. Jeví se software, který pomáhá optimalizovat reálné řezné procesy v praxi. Má tu možnost simulovat obrobek a prověřit jeho chování v různých nastavených podmínkách bez použití fyzického modelu. Tím se firmám, které

takovéto simulační programy používají, značně snižují náklady na výzkum a vývoj v praxi. Za zmínku stojí i to, že simulace řezného procesu je relativně složitý dynamický děj. Proto se klade velký nárok na výpočty a softwarové nastavení.

Jako další softwary byly vybrány AdvantEdge a Abaqus, protože jsou taktéž vhodné pro řešení utváření třísky. Bohužel, v současné chvíli v laboratořích ZČU není k dispozici AdvantEdge ani Abaqus. Proto byl Deform zvolen jako vítězný software pro simulaci utváření třísky. Stal se vhodným nástrojem a zároveň byl k dispozici pro vyřešení tohoto problému.

## 2.5. Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků ve zkratce MKP se používá k řešení simulací průběhů deformací. Dále tuto metodu lze využít u výpočtu napětí, vlastních frekvencí, proudění plynů, záření, elektromagnetismu, akustiky, tepla, tekutin a u problémů pružnosti a dynamiky. Princip metody konečných prvků je založen na Lagrangeově principu: těleso je v rovnováze, jestliže celková potenciální energie deformace soustavy je minimální. [W3,W5]

Jedná se o numerickou metodu, kdy k jejímu masovému využívání došlo až po nástupu moderní výpočetní techniky. Pro technickou praxi přináší výsledky, které jsou velmi přesné reálnému výsledku.

V anglickém jazyce FEM znamená Finite element method, v překladu to znamená metoda konečných prvků (MKP). MKP je dnes samostatným souborem zabývajícím se matematicko-inženýrskou problematikou.

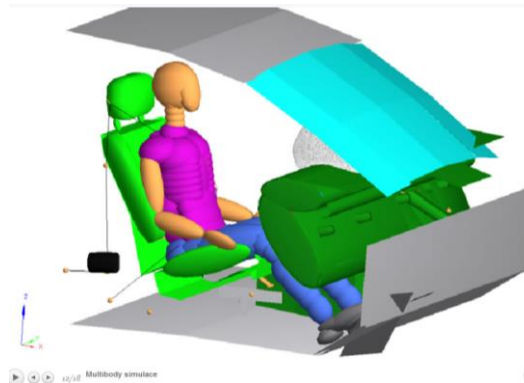
Zjišťované parametry se určují v jednotlivých uzlových bodech. Problematika vyžaduje rozdělení řešené oblasti na konečné oblasti - prvků.

Metoda konečných prvků se používá především ke kontrole celkových sestav (složitých i jednodušších zařízení) a též k určení kritického zatížení (napětí) v určitém místě výrobku. Největší využití metody konečných prvků je v oblasti strojního inženýrství, leteckého, automobilového průmyslu a dokonce i v biomechanice.

[W3,W5]

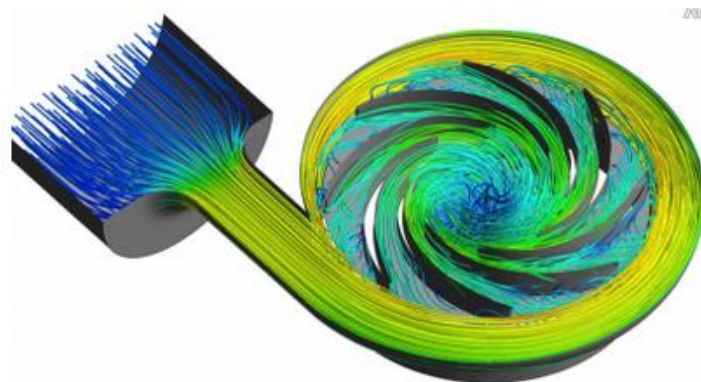
### 2.5.1. Další simulační metody

MKP není dnes jedinou simulační metodou, která se využívá. Například Multibody simulace (MBS) je software pro simulace dynamického chování finálních soustav těles. Výpočtové modely založené na soustavách těles umožňují zavedení obecných silových účinků.



Obrázek 7 – Multibody simulace [W19]

Pro zkoumání a simulace proudění se dnes využívá Computational Fluid Dynamics (CFD).



Obrázek 8 – Model proudění tekutiny a další fyzikální jevy [W20]

Jiným stupněm simulací je dneska i samotná konstrukce, která využívá prostorových 3D modelů vytvářené v Catii, Inventoru, PRO/Engineeru, SolidWorksu, Solid Edgu, NXku a podobně. Tyto programy umožňují velmi přesné a věrohodné napodobení skutečného modelu, geometrie a rozměrů.

Skutečnost je, že tyto simulační programy již nepotřebují tolika výkonnostní osobní počítače, usnadňují a urychlují uživatelům finální práci. A všechny výsledky simulací jsou většinou určitým způsobem vizualizovány.

[W7]

Práce se simulačním systémem je rozdělena do tří skupin:

*Preprocessing* – probíhá modelování pomocí simulačního softwaru a připravuje se zde geometrický model, nebo se zde importují modely z CAD systémů, dále se udávají materiálové konstanty, parametry stroje a parametry pracovního procesu apod.

*Processing* – dochází k vlastnímu výpočtu výše uvedenými metodami, s vlastnostmi implementovanými do systému

*Postprocessing* – probíhá vlastní analýza a zobrazují se výsledky simulace

[W8]

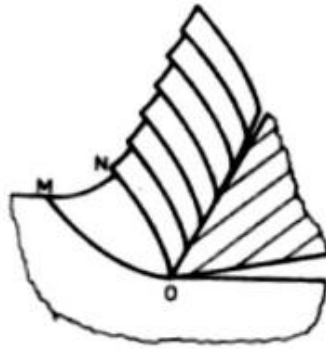
## 2.6. Děje v procesu obrábění

### 2.6.1. Teorie tvorby třísky

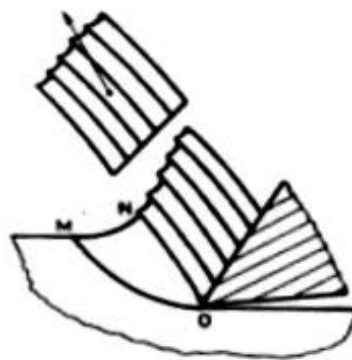
Na třísku se mění oddělovaná vrstva z obrobku při třískovém řezání. Při tomto řezání dochází k tvorbě plastické deformace, která je ovlivněná vlastnostmi obráběného materiálu, deformační rychlostí, teplotou a podmínkami, za kterých obrábění probíhá. Poté se tříška odděluje pomocí lomu od obrobku. Dochází k tomu v oblasti primární plastické deformace, kde je již plasticita materiálu vyčerpaná a dochází ke kluzu. Charakter namáhání a velikost deformace záleží na vlastnostech obráběného materiálu. Jakmile začnou vznikat lamely (jednotlivé elementy), které se vzájemně neoddělují, tímto vzniká tzv. tříška tvářená, nebo se vzájemně oddělují a tím vzniká tzv. tříška netvářená. U tvářené třísky se setkáváme s plynulou nebo dělenou třískou. U netvářené třísky se setkáváme s lamelami, které z místa řezu odlétají samy. Netvářené třísky většinou vznikají u materiálů, které jsou tvrdé a křehké (to jsou vlastnosti, které má sklo, kalená ocel a podobně). U tvářené třísky je to naopak, ta se tvoří při obrábění u většiny běžně používaných materiálů. [W10]

Tříška má velký vliv na proces řezání a to především na kvalitu obráběné plochy a hospodárnosti výroby. Kvalita (drsnot obráběné plochy) je závislá nejen na mechanických a fyzikálních vlastnostech, řezném prostředí, tuhosti celé soustavy (S-N-O), ale také na technologických vlastnostech. Vše je zahrnuto v kapitole 2.6.3 Tvary a druhy třísek.

[W10]



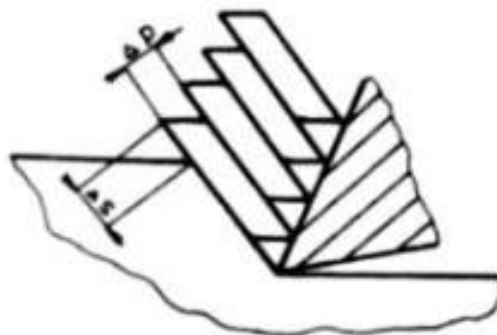
Obrázek 9 – Plynulá tvářená tříska [W10]



Obrázek 10 – Dělená tvářená tříska [W10]

V oblastech MNO je označená oblast primární plastické deformace, která může být při vysoké řezné rychlosti velmi úzká. Tvorbu elementů je si možné představit podle obrázku, který je níže.

[W10]



Obrázek 11 – Zjednodušená tvorba elementů [W10]

V praxi je na kratší a dělenou třísku kladen velký důraz, jedná se totiž o to, že v tomto stavu je s třískou dobrá manipulace a lépe se skladuje. Tříška logicky zabírá i méně místa na dílně a podobně. Navíc se firmám, zabývajících odvozem, lépe pracuje a zpracovává.

### 2.6.2. Objemový součinitel třísky W

Řezný břit nástroje vniká do obráběného materiálu a tím ho značně deformuje a namáhá, nejdříve pružně a pak plasticky. Tímto vzniká řezný odpor proti vnikání klínu, kterým se obrábí. Tvary třísek jsou hodnoceny podle tabulek, v nichž bývá uveden tzv. objemový součinitel třísky W, který charakterizuje vztah:

[W10]

$$W = \frac{V_t}{V_m}$$

Kde:  $V_t$  je objem volně vložených třísek

$V_m$  je objem odebraného materiálu před obráběním

V praxi je velká snaha vytvářet podmínky, aby objemový součinitel byl co možná nejmenší. Ovlivňuje to zejména výrobu, kde se používají automatické stroje.

Pokud je potřeba snížit hodnotu objemového součinitele třísek, existuje několik způsobů:

1. Použití utvařečů
2. Změna řezných podmínek a geometrie břitu
3. Zvolení vhodnějšího materiálu na obrábění s lepší odchozí třískou

[W10]

### Řezný odpor

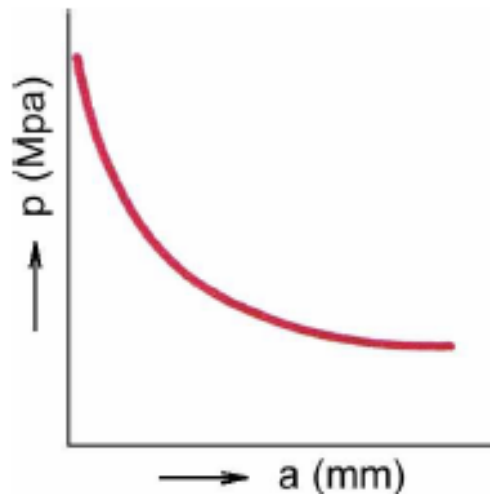
Řezný odpor je značený  $p$ , je vyjádřením řezné síly  $F_z$ , lomeným průřezem třísky  $S$ . Je závislý na více faktorech, nejdůležitějším faktorem jsou vlastnosti obráběného materiálu, řezné podmínky a geometrie břitu řezného nástroje. To znamená, že odpor je funkcí pevnosti, tvrdosti, tloušťky odebírané třísky apod.

[W12]

$$p = \frac{F_z}{S} \text{ [MPa]}$$

Kde:  $F_z$  je složka řezných sil  
 $S$  je průřez odebírané třísky

Z technologických podmínek je řezný odpor nejvíce závislý na  $a$  (hloubce řezu) a na tloušťce třísky. Graf, který se nachází níže, je matematicky podobný hyperbolické funkci.



Graf 1 – Závislost řezného odporu na tloušťce třísky [W12]

Pokud se docílí třísky s menší tloušťkou, dostává se u řezného odporu hodnota větší. Což lze osvětlit tak, že se získává větší zpevnění v oblasti OMN a s relativně většími pasivními odpory. [W10]

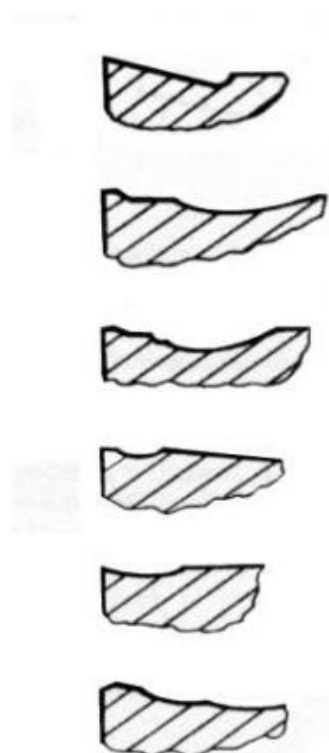
### 2.6.3. Tvary a druhy třísek

Třísky zastupují vedlejší produkt třískového obrábění. Jejich tvar se odvíjí od nastavení řezných podmínek a technologických charakteristik. Mezi technologické charakteristiky by se dala zařadit hloubka řezu (tloušťka třísky)  $a_p$  a velikost posuvu  $f$ . Dále závisí na použitém nástroji a jeho úhlech a použitém materiálu. Samozřejmě, že kvalitu obráběné plochy ovlivňuje i druh použitého chladiva. Z tohoto důvodu se při obrábění setkává s různými druhy třísek při obrábění. [W11]

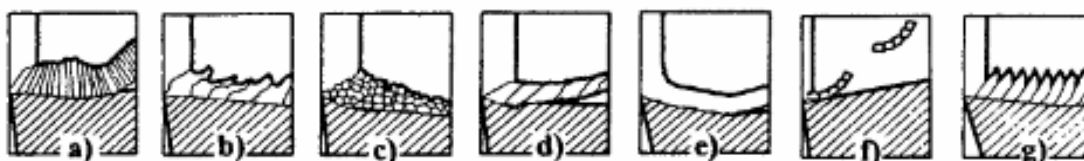


Tabulka 1 – Tvary třísek – Utvařeče (lamače) - hodnocení

TVARY TŘÍSEK		W
	STUŽKOVÉ DLOUHÉ	400 až více
	STUŽKOVÉ SMOTANÉ	300 až 400
	VINUTÉ DLOUHÉ	80 až 150
	VINUTÉ KRÁTKÉ	40 až 60
	SPIRÁLOVÉ PLOCHÉ	10 až 20
	OBLOUKOVÉ SPOJENÉ	8 až 10
	ELEMENTÁRNÍ	4 až 6



Pro zlepšení dělení třísek při samotném obrábění se používají, tzn. utvařeče třísky (lamače). Tyto lamače se nacházejí na čelech nástrojů. Slouží pro lepší dělení odřezávané třísky a její lepší odchod z řezu.



a - plynulá článkovitá soudržná tříška; b - plynulá soudržná lamelová tříška; c - tvářená elementární tříška; d - nepravidelně článkovitá plynulá tříška; e - tvářená plynulá soudržná tříška; f - dělená segmentová tříška; g - plynulá segmentová tříška.

Obrázek 12 – Základní druhy tvářených třísek [W11]

## 2.7. Tepelná bilance

Tepelná bilance se určuje v místě řezání, kde pracuje nástroj s definovatelnou geometrií. Teplo v místě řezu vzniká přeměnou mechanické práce (energie). Při procesu obrábění se 98% mechanické práce přemění na teplo. Celkové množství tepla  $Q$  je nevratná veličina, která se obnovuje ve zdrojích, které jsou určeny místem řezání.

Teplo  $Q_{sh}$  – generované deformací ve střižné rovině v oblasti primární deformace

Teplo  $Q_{tr}$  – generované třením čela nástroje a třísky

Teplo  $Q_f$  – generované třením hřbetu nástroje a obrobené

[W17]

Teplo má u některých členů technologické soustavy kumulativní charakter. Například při frézování se kumuluje v obrobku, to je tento případ. Teplo se šíří vedením a konvekcí do obrobku –  $Q_o$ , do nástroje –  $Q_n$ , do třísky –  $Q_t$  a do prostředí  $Q_e$  v závislosti na teplotním gradientu. Obecně známé je, že teplotní pole je nehomogenní.

Vznik třísky při obrábění a její odvod z místa řezu je doprovázen vznikem určitého množství tepla. Vznik tepla je díky vykonané práci, která je nutná pro proces řezání a dělení třísky. Jedinou výjimkou jsou pružné deformace a utajené práce (práce spotřebovaná na deformaci mřížky a vytvoření nových povrchů).

[W17]

Celkové množství tepla  $Q_c$  lze vypočítat bez velkých chyb z výrazu:

$$Q = F_c \cdot v_c \cdot t \text{ (J)}$$

$Q$  – Celkové teplo (J)

$F_c$  – Řezná složka síly obrábění (N)

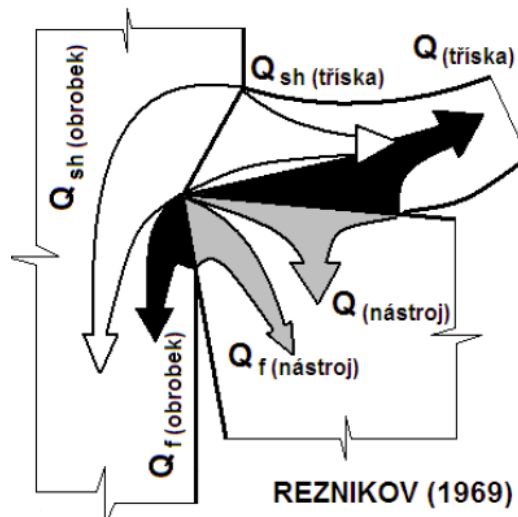
$V_c$  – Řezná rychlost ( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ )

$T$  – Čas obrábění (min)

Vzniklé teplo ovlivňuje výrazně řezný proces, protože:

- Působí velmi negativně na řezné vlastnosti nástroje
- Ovlivňuje mechanické vlastnosti obráběného materiálu
- Ovlivňuje petchování a zpevňování obráběného materiálu
- Ovlivňuje podmínky tření na čele i hřbetě nástroje

[W17]



Obrázek 13 – Vznik a šíření tepla v místě řezání [W17]

Tepelná bilance představuje jednu z forem bilance energie. Vypovídá o tom, že v daném místě a daném časovém úseku je množství tepla odvedené rovno teplu do místa přivedené. Pro podmínky v místě řezu to tedy znamená:

$$Q = F_c \cdot v_c = Q_{sh} + Q_{tr} + Q_f = Q_o + Q_n + Q_p + Q_t \text{ (J)}$$

$$Q_{tr} = F_t \cdot v_{ch} \text{ (J)}$$

Celkové množství tepla, které vznikne v místě řezu, lze určit na základě znalosti řezné rychlosti  $v_c$  a změřené řezné síly  $F_c$ . Množství tepla, které vznikne v místě řezu plastické primární deformace  $Q_{sh}$ , lze určit z následující rovnice:

$$Q_{sh} = F_{sh} \cdot v_{sh}$$

$F_{sh}$  je možné určit na základě rozkladu, respektive na základě měření složek síly řezání  $F_c$  a  $F_p$ . Velikost  $v_{sh}$  závisí od úhlu primární plastické deformace. Množství tepla, které vzniká třením čela nástroje o třísku, se určí jako  $Q_{tr} = F_t \cdot v_c$ .  $F_t$  je možné určit na základě měření složek síly řezání  $F_c$  a  $F_p$ .

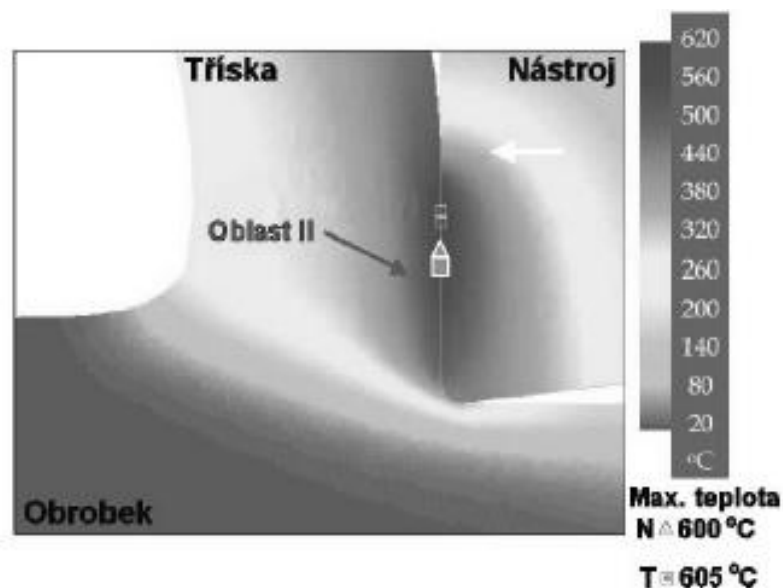
Množství tepla, které vzniká třením hřbetu nástroje a obrobené plochy lze vyjádřit vztahem  $Q_f = Q - (Q_{sh} + Q_{tr} + Q_p)$  (J)

[W17]

### 2.7.1. Teplota řezání

Teplotní pole nástroje je nejzajímavější, protože teplota povrchových vrstev čela a hřbetu má největší vliv na stav vrstev a na jejich vzájemné působení s materiálem obrobku. S tím souvisí i samotná intenzita otupování nástroje. Teplota na čele a hřbetě závisí na vzdálenosti bodu od ostří nástroje ve směru odchodu třísky.

Stanovení teplotního pole čela a hřbetu je experimentálně velmi náročné. Proto se stanovuje střední teplota na styčných plochách. Popřípadě stanovením střední teploty celé styčné plochy nástroje s třískou a obrobkem. To je aktivní části čela a hřbetu současně. [W17]



Obrázek 14 – Příklad teplotního pole [W17]

Při měření tepla obsaženého v třískách, lze určit i střední teplotu třísky. Vychází se z předpokladu, že tříška dopadne do kapaliny, kde dojde k vyrovnání jejich teplot v důsledku odevzdání tepla třísky kapalině.

Při měření tepla v nástroji a obrobku je obdobný postup jako stavení tepla v třískách. Zde jsou ovšem nástroj a obrobek mimo kapalinu a musí se zamezit padání třísek do kapaliny, aby se neovlivnil výsledek měření. Po ukončení řezání se celý nástroj nebo obrobek co nejrychleji ponoří do kapaliny.

[W17]

### 3 Návrh vlastních experimentů a jejich realizace

První věc, která byla nutná zjistit, byla zda Deform dokáže tuto úlohu simulovat. Po bližším prozkoumání se zjistilo, že Deform má možnost simulovat obrábění. Nastavení simulace může proběhnout, pokud budou zadané vstupní řezné podmínky. Řezné podmínky jsou dané standartními univerzálními podmínkami, které byly na vnitřní straně krabičky od VBD.

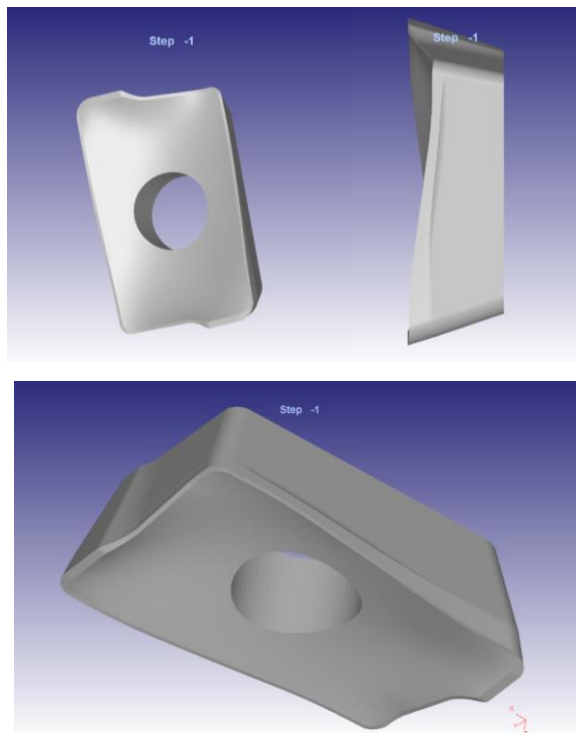
Zde stojí za zmínění to, co simulace mohou dávat za výsledek. U Deformu a AdvantEdge jsou výsledky trochu odlišné, ale pořád vycházejí ze stejného základu, který je založený na metodě konečných prvků. Ovšem, tyto prvky mohou být různého typu, například to můžou být objemy a podobně. Co se týče cíle simulace, každý software umí popsat realitu s určitou odchylkou. Samozřejmě je potřeba mít co možná nejmenší odchylku od cíle. Každý z těchto softwarů by měl umět 3 kroky simulace, které se provádí. Příprava modelu - včetně materiálových vlastností, simulace a vyhodnocení.

V této diplomové práci jde hlavně o vyhodnocení simulace. Při vyhodnocení jde o tvar a oddělení třísky v závislosti na čase. To je navázané na výpočetní čas a v každém kroku simulace, který představuje časový krok, je nějak natočená fréza s VBD. VBD určitým způsobem odebírá materiál a výsledky se mohou zobrazovat v každém kroku simulace. Zároveň je možnost vidět jaký čas je v simulaci, a jaký čas je v reálném procesu. Pokud by se obrábělo (například 1 minutu), výpočet by mohl trvat třeba jeden týden. Simulovat se musí krátký krok a v každém kroku ukládat výsledky, protože je to úloha silně lineární. Je to z důvodu nelineárních materiálových vlastností, kritériem porušení a z geometrických důvodů. To znamená, že obrobek mění svou geometrii, protože v něm probíhají velké deformace a nakonec dochází k oddělení materiálu. To ve výpočtářském světě znamená, že tam probíhají velké deformace geometrické nelinearity a to způsobuje výpočtářskou nestabilitu. To je důvod toho, že se musí počítat po malých krocích.

### 3.1. Nastavování prvků pro spuštění simulace

#### 3.1.1. Nastavení nástroje

Samotný nástroj může být namodelován v rigidní formě, která se pak již nijak nedeformuje. Rigidní model může celkem podstatně zkrátit simulační časy. Pokud je model rigidní, znamená to, že je tuhý, neohebný a nedeformovatelný. Potom by se u nástroje neměly nastavovat parametry jako používaný materiál a jemnost sítě.



Obrázek 15 – Rigidní geometrie VBD

Pokud se má nástroj deformovat a podléhat určitému opotřebení. Musí se u nástroje definovat plastický, elastický, porózní a nebo elastoplastický stav. Rozdíl mezi těmito vlastnostmi je jasný již z názvu. Teprve potom lze přiřadit vstupní teplotu a požadovaný materiál.

Pokud by se jednalo o kovádla (u tváření), lze tu říci, který nástroj je zde primární, a který sekundární. Toto je velmi důležité v případě, kdy je v simulaci více výrobních nástrojů. Nástroj, který bude vykonávat pohyb, bude tedy primární. Je to z toho důvodu, že při výpočtu, je tato skutečnost zohledněná. Důvod proč to takto je, je ten, že mu to pomůže při výpočtu a řídí se potom tak, že se ten primární nástroj dá do pohybu a má určitou rychlost, nebo definované podmínky.

### 3.1.2. Nastavení geometrie

U geometrie je možnost si nástroj nadefinovat, nebo si geometrii importovat. Import geometrie modelu je možný v různých formátech. Jsou zde k dispozici formáty jako STL a IGS, které jsou dnes nejvíce používány. Takže je možnost dostat model z různých softwarů a nastavit si vše co je potřeba pro simulaci.

### 3.1.3. Sítě objektu

Sítě objektu, je konečně prvková síť, která je nezbytná pro jakékoliv řešení problému metodou konečných prvků. Jako první věc, kterou musí uživatel udělat je popsat pomocí makro prvků geometrický tvar objektu. Makro hrany se musí rozdělit a následně je automaticky pokryt sítě konečných prvků. Tak aby byl s optimální hustotou aproximovaný tvar daného objektu. Hustota musí být optimální v místech potřebných pro simulaci. Místa zájmu si může uživatel libovolně nastavit tam, kde zrovna potřebuje. [W8]

Proto, aby došlo k odběru třísky, musí být nastaveno porušení konkrétního materiálu. Konečné prvky totiž sami nedokáží rozpoznat to, že se mají sami dělit. To se musí nastavit tím, že se zadá porušovací kritérium. Stanovit porušovací kritérium není nic jednoduchého, ani pro zkušeného výpočtáře.

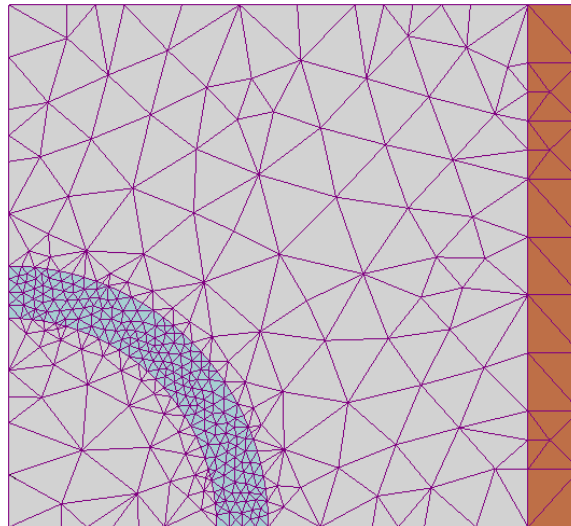
Sítě objektů má možnost pomoci entit, které slouží pro vytvoření sítě konečných prvků – Makrouzel, makrohrana, makroprvek. Dále má entity konečných prvků jako prvek sítě a uzlu sítě. [W8]

**Makrouzel:**

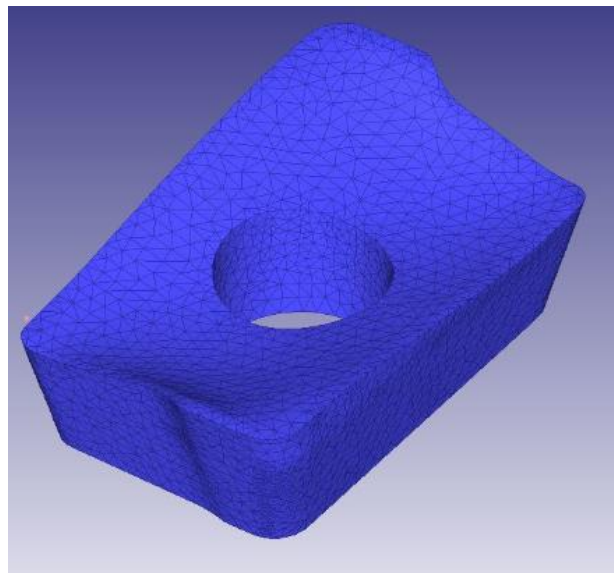
Je to entita sítě objektu, která udává makrohrany daného prvku a to jeho počátek a konec. Z hlediska globálního popisku tvaru, je makrouzel důležitý geometrický bod.

**Makrohrana:**

Je to entita sítě objektu, která definuje hranu makroprvku. Je to spojnice dvou makrouzlů, daného makroprvku. A tvoří tak celek z jedné nebo více nebodových entit geometrie objektu. [W8]



Obrázek 16 – Ukázka 2D síťování modelu - jemnější síťování je v místě zájmu [W3]



Obrázek 17 – Nasíťovaná VBD pro simulaci v Deformu

### 3.2. Testování – zhodnocení výsledků simulace a reálné třísky

Průběh experimentu byl zvolen tak, že je potřeba získat třísku z obráběného obrobku za určitých doporučených řezných podmínek. Tyto podmínky byly zvoleny na základě zkušeností a interního doporučení – jsou to standartní univerzální podmínky. Zde byl kladen na funkčnost, nemělo cenu zabíhat do extrémů nebo naopak do minim. Zvolená technologie pro odběr třísky, bylo obvodové frézování.

Zde bylo dobré zmínit to, že pokud by zde nastala otázka, proč se popisuje něco, co bylo již od experimentované, tak odpověď je zcela jednoduchá. Ano popisuje, ale ve chvíli, kdy model bude odpovídat experimentu, tak je validovaný experimentem



(model je naladěný) a připravený na optimalizaci. V modelu se může jednoduše změnit obráběný materiál a vyzkoušet si dopředu co to bude dělat, pokud se změní rychlost, či jiný materiál a podobně.

Odebíraná tříška vznikala díky VBD, která byla obdélníková. Tato VBD byla zadána a byla geometricky jednoduchá pro simulaci. Obrábění probíhalo na stroji, který je umístěn v halových laboratořích KTO. Obráběcí stroj, který nese název MCV 750A.

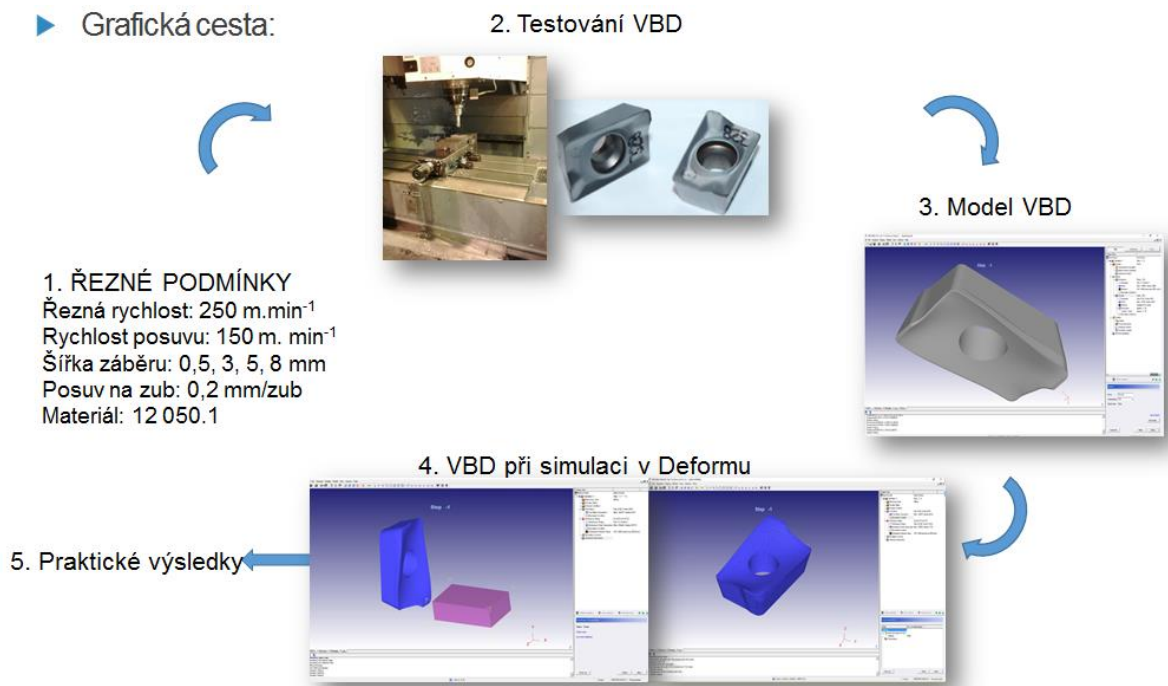
U schématu grafické cesty, které se nachází pod tímto textem, je na obrázku 2. Testování VBD vidět, na snímku z reálu, praktické testování na MCV 750A. Pro ilustraci je vidět detail VBD, která byla upnutá do frézy. Fréza byla upnutá do hydraulického upínače a ten do stroje MCV.

Celý pracovní proces byl realizován, díky tomu se získaly třísky, které budou zmíněny dále v této práci. Díky tomuto experimentu byly získány 4 druhy třísek. U každé třísky byla změřena maximální teplota, která byla zanesena do grafu. Na mikroskopu, který se nacházel v halových laboratořích KTO, byla změřena šířka třísky a průměr spirály třísky. Měření maximálních teplot bylo realizováno zapůjčenou vysokorychlostní a termovizní kamerou.

Poté bylo přistoupeno k samotné simulaci v Deformu. Model (VBD) byla nastavená jako rigidní, to se dá charakterizovat jako nedeformovatelný, stálý a taktéž jako tuhý.

Zde by mohla přijít otázka, proč se nejdříve realizovala zkouška a pak až výpočetní model. Proto je na místě zmínit to, že bylo potřeba otestovat určité vstupní řezné podmínky, které byly zadané interním zaměstnancem. Na základě toho byla simulace naladěná, aby vycházela stejně jako v reálu. Pak na základě naladění simulace se můžou v tom modelu měnit řezné podmínky za jiné. Poté co tomuto modelu můžeme věřit, protože je verifikovaný (ověřený, zkontrolovaný), protože výsledky vychází stejně jako z praktického testování. Teprve pak se mohou měřit parametry v počítači a predikovat (přisuzovat) co je vhodné, či lepší anebo naopak horší.

Další krok, který byl nutno provést, bylo nasít'ovat VBD. Tento krok byl nutný proto, aby bylo možno sledovat různé veličiny na povrchu, ale i v destičce. A nakonec spuštěna samotná simulace odebírané třísky. Samozřejmě se nedalo vyhnout odlad'ování a vychytávání chyb, které se po čas simulace třísky, objevovaly.



Obrázek 18 – Realizace vlastního experimentu (řešení) – ukázka grafické cesty

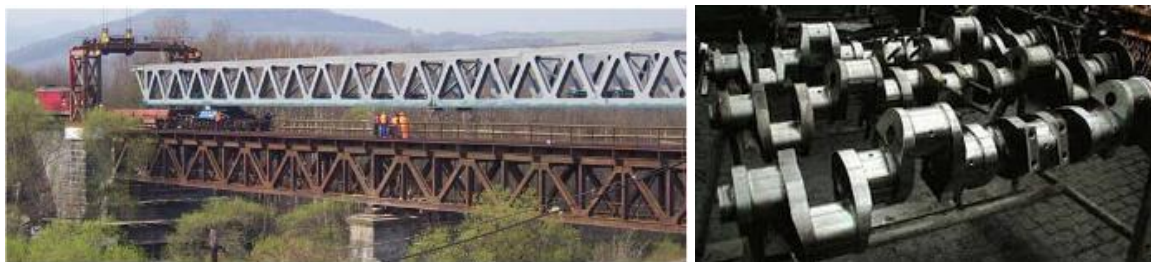
### 3.2.1. Obráběný materiál 12 050.1

Pro obrobení se vybral materiál, který je značený jako 12 050.1. Materiál je tedy nejpoužívanější uhlíková ocel, která je normalizačně žíhaná. Dá se samozřejmě i povrchově kalit a zušlechťovat. Pevnost 590 - 710 MPa, tvrdost v žíhaném stavu na měkko maximálně 225 HB, dosažitelná tvrdost po kalení 62 HRC a ostatní parametry jsou v tabulce 2. Mechanické vlastnosti.

Vhodná pro výrobu hřídelů těžkých strojů, těžkých obráběcích strojů jako např. karuselů. Použití i pro turbokompresory, větší ozubená kola, rotory, lamely spojek, plunžry, dopravní válečky, malé kladky, zarážky, páky, západky, písty kompresorů, ojnice, vřetena, šneky, ozubené věnce, vrtací tyče a frézovací trny a podobně. Materiál 12 050 se používá tedy ve stavební, mostní, jeřábové, lodní, zámecké i strojní konstrukci, kde vyhovují svými mechanickými vlastnostmi.

Má velmi dobrou obrobiteľnosť, s dobrou tvarovou stabilitou po tepelném zpracování. Jediná nevýhoda je, že se musí počítat s menší prokalitelností.

[W13]



Obrázek 19 – Použití materiálu 12 050 v praxi [W14]

Mechanické vlastnosti jsou vypsány v tabulce: Mechanické vlastnosti dle ČSN 41 20 50 – DIN 1045.

**Výchozí stav:** 12 050.1 – normalizačně žíhaný

Tabulka 2 - Mechanické vlastnosti dle ČSN 41 20 50 [W9]

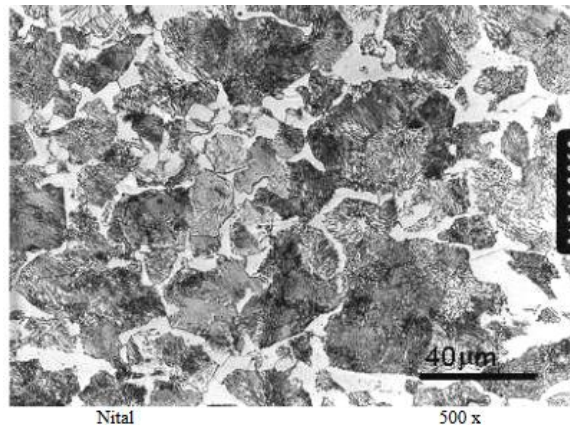
			12 050.1
Mez kluzu	<b>Rp0,2</b>	MPa	min. 325
Mez pevnosti	<b>Rm</b>	MPa	min. 540
Tažnost	<b>A5</b>	%	min 17
Tvrдость		HB	max 225
Kontrakce	<b>Z</b>	%	
Modul pružnosti v tahu	<b>E</b>	GPa	211
Modul pružnosti ve smyku	<b>G</b>	GPa	79

Tabulka 3 – Zahraniční ekvivalenty, značení [W9]

ISO	C60E4	ISO 683-1-87
EURO	C45	EN 10083-2-91
Německo	C45	DIN 17200-84 ( 1.1191)
Velká Británie	C45	BS EN 100083-2-91
USA	Gr.1043	ASTM A510

Tabulka 4 – Chemické složení v % [W9]

	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
dle ČSN	0,42	0,50	0,17	max	max.	max	max	max.
	0,50	0,80	0,37	0,25	0,30	0,30	0,040	0,040
aktuální stav	0,51	0,69	0,25	0,15	0,00	0,12	0,023	0,017



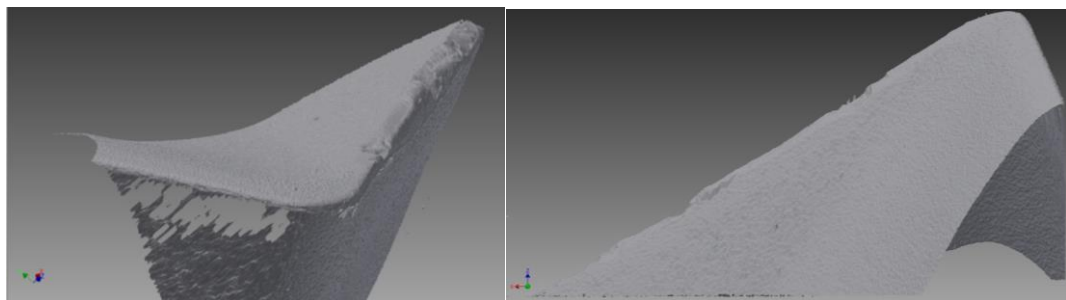
Obrázek 20 – Výchozí struktura oceli 12 050.1 [W9]

### 3.2.2. Použitý nástroj – VBD APKT

Pro obrobení materiálu se použila VBD, která nesla název APKT 1000PDTR-RM IC328. Výběr této destičky byl na základě zkušeností a interního doporučení. Vyměnitelná břitová destička pro technologii frézování.

Byl zajištěn i model ve 3D, který přesně odpovídal tvaru VBD v reálném stavu. Model ve 3D musí být co nejvíc přesný oproti reálnému případu, proto aby byla možnost docílit co nejvíce věrohodnému srovnání. Dále bylo nutné převedení do formátu, který je vhodný pro Deform, to znamenalo převést do STL formátu. Nakonec pro spuštění softwaru bylo nutno nastavit síť, takzvané nasítování. Další kroky, které se musely provést, byly nastavení doporučených řezných podmínek, nastavení pozice soustavy, nastavení porušujícího kritéria a zkontrolování dat databáze.

Při frézování a postupném nastavování jiné šířky záběru bylo vidět, že se destička postupně opotřebovává (ukázka je na obrázku níže). Tento jev byl způsobem tím, že při posledním odebrání třísky při 8 mm šířky záběru, to již byla hranice frézy a dokonce i samotných VBD. Odebíraly se postupně 4 třísky o různých šířkách záběru. Při testování byly použity 2 destičky, které obráběly.



Obrázek 21 – Opotřebování břitu VBD (oskenovaný model v optickém skenovacím zařízení IFM G4)



Obrázek 22 – Reálné VBD pro testování

### 3.2.3. Hydraulický upínač

Pro upnutí byl použit hydraulický upínač. Tento upínač je vyznačen vysokým výkonem při přenosu momentů, vynikajícími tlumícími vlastnostmi, nízkou obvodovou házivostí, vyšší přesností a umožňuje rychlé obrábění. Tyto vlastnosti jsou velmi důležité pro to, aby zvyšující požadavky na obrábění, byly dostatečně plněny. Uživateli je umožněno univerzální použití pro frézování, vrtání, vystružování, zahlubování, srážení hran a řezání závitů. Používá se v oblasti objemového obrábění.

Další obrovskou a praktickou výhodou je ten fakt, že výměna nástrojů nepotřebuje externích zařízení, protože je zde upínáno pomocí dorazového šroubku v upínači, který stlačí kapalinu a tím docílí potřebný tlak. Jako důležitou výhodou je ten fakt, že prodlouží životnost nástrojů až o polovinu z původního stavu.

Obvodová házivost upínače se pohybuje pod hranici 0,003 mm, což bylo v tomto případě dostačující. Měří ve vzdálenosti  $3d$  od vetknutí vůči upínací stopce. Pro menší průměry stopek nástrojů je zde možnost použít redukční pouzdra.



Obrázek 23 – Upnutí frézy do hydraulického upínače



Obrázek 24 – Upnutí hydraulického upínače do MCV stroje

#### 3.2.4. Použitý stroj MCV 750A

Stroj, na kterém se testovalo, byl MCV 750A, což je vertikální obráběcí centrum. Stroje řady MCV jsou postaveny na nosném rámu ve tvaru C. Uspořádání a tvar odlitků nosného rámu strojů je optimalizováno s ohledem na požadavek na vysokou tuhost a stabilitu. Maximální zatížení stolu je 650 kg. Osy pojezdu X, Y, Z jsou v rozsahu 750x500x500mm. Řídicí systém, který tento stroj používá, byl klasický Heidenhain – TNC 426. Maximální počet otáček stroje 6000 ot/min. Dynamika a celkem velká přesnost je garantovaná aplikací lineárních vedení stroje. Další výhodou je automatická výměna nástrojů ze zásobníku, středový přívod chladicí kapaliny, nástrojová sonda, otočný a sklopný stůl, pásový filtr chladicí kapaliny, obrobková sonda a možnost manuálního oplachu pracovního prostoru.



Obrázek 25 – Vertikální obráběcí centrum MCV 750A

### 3.2.5. Řezné podmínky

Proto, aby byl řez optimální, bylo nutno nastavit odpovídající řezné podmínky. Z důvodu aktuální vybavenosti špičkové laboratoře, byl zvolen nástroj, který se jmenuje VBD - APKT 1000PDTR-RM IC328. Je to geometricky jednoduchá součást pro simulaci. Po konzultaci s vedoucím práce byly zvoleny tyto doporučené řezné podmínky, které jsou standartní:

#### ŘEZNÉ PODMÍNKY:

Otáčky:  $n = 3980 \text{ ot/min}$

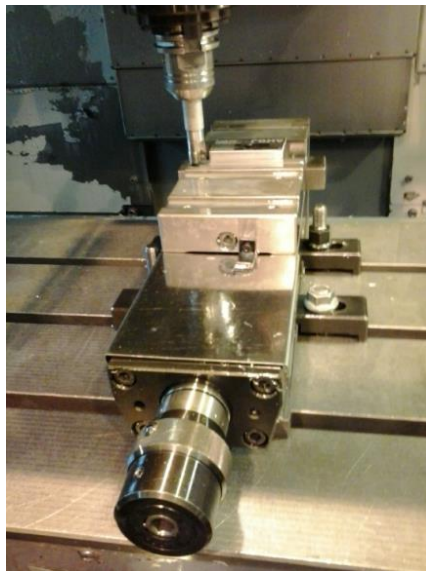
Řezná rychlost:  $v_c = 250 \text{ m.min}^{-1}$

Rychlost posuvu:  $v_f = 150 \text{ m. min}^{-1}$

Šířka záběru:  $a_e = 0,5, 3, 5, 8 \text{ mm}$

Posuv na zub:  $f = 0,2 \text{ mm/zub}$

Jediná podmínka zde byla a to, že obrábění musí probíhat bez použití chladicí kapaliny, takže obrábění na sucho. Důvod byl jediný a to, aby tříska byla vidět při snímání vysokorychlostní a termovizní kamery.



Obrázek 26 – Nastavení doporučených řezných podmínek pro obrábění

### 3.2.6. Příslušenství – pomocné přístroje

V příslušenství byla vysokorychlostní a termovizní kamera, která nahrávala řez po celou dobu. Vysokorychlostní kamera byla druhu FASTCAM SA-X2 RV. Termovizní kamera, která byla použita, byla pro akademické účely a nesla název FLIR

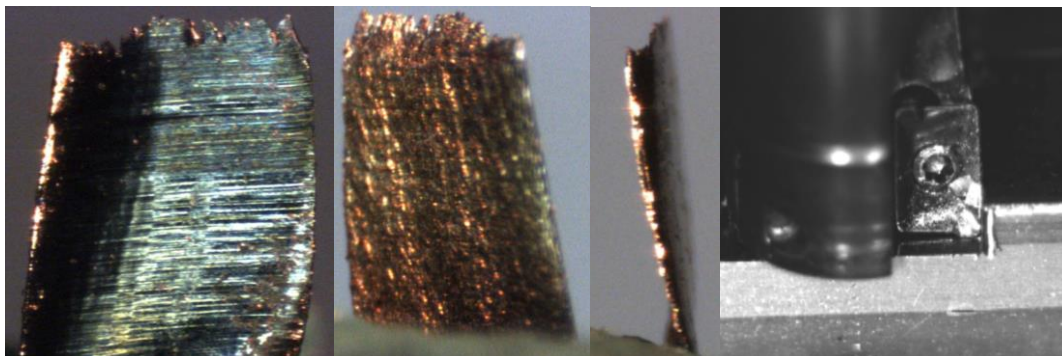
SC 7000. Dále bylo nezbytné použít optický skenovací zařízení IFM G4, který nám pomohl oskenovat tvar použité VBD.

### 3.3. Testování – získání reálného vzorku v hal. labor. KTO

Testování proběhlo v halových laboratořích KTO. Na stroji MCV, kde se postupně odřezávaly třísky po určité smluvené šířce řezu, a sledoval se průběh utváření. Průměr nástroje, který obráběl, bylo 20 mm s VBD. Použitá termovizní kamera snímala odcházející třísku z místa řezu a měřila její teplotu. Vysokorychlostní kamera měla za úkol nahrávat zpomalené video, ze kterého bude vidět tvar odcházející třísky. Třísky se odebíraly po určité šířce záběru a to 0,5; 3; 5 a 8 mm.

#### 3.3.1. První testování – šířka záběru 0,5 mm

První tříška, která byla odebírána, měla šířku záběru třísky 0,5 mm. Tato tříška byla utvářená jako článkovitá, dělená. Tříška byla velmi malá a tenká, tzn., že šířka třísky byla velmi úzká. Teplota, která se objevila v měřícím softwaru na notebooku, šplhala na hranici 330 °C. Po testování (získání třísky) se mohlo přejít na změření mikroskopem, který se nacházel v laboratořích. Tříška byla namáčknutá do plastelíny, ustavená na mikroskopu a následně proběhlo měření, jak je vidět na obrázcích níže. Po ustavení třísky a jejím změření bylo jasné, že má šířku 0,11 mm.



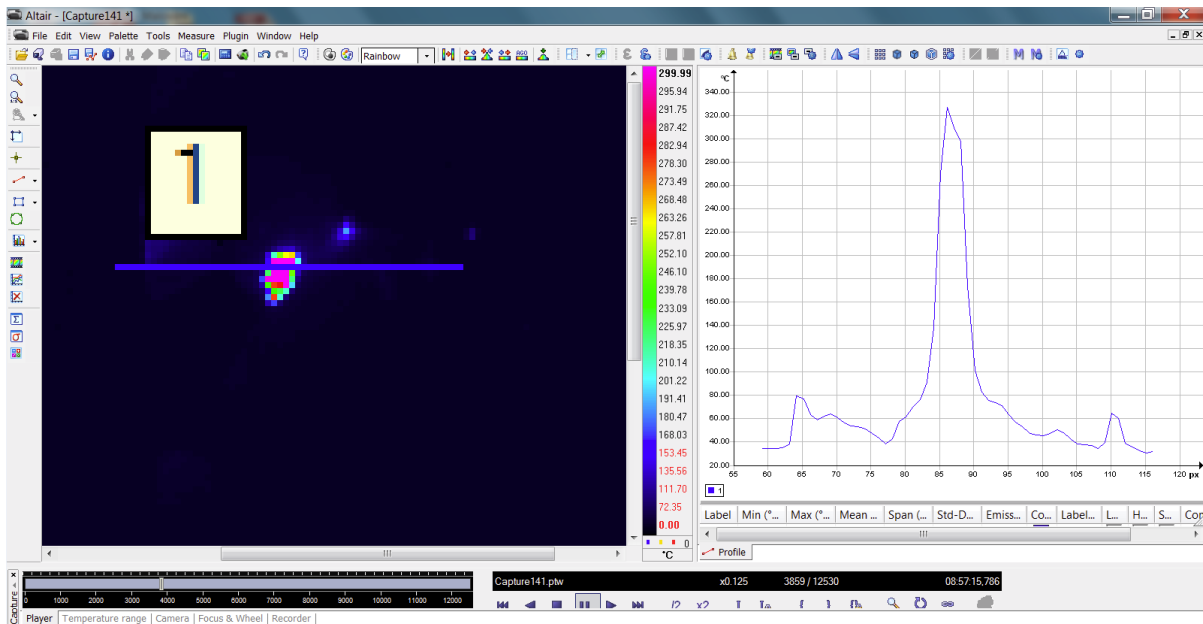
Obrázek 27 – Tříška, která vznikla po nastavení šířky záběru 0,5 mm

Dále byl získán snímek (z termovizní kamery), který je umístěn pod tímto textem. Zde je důležité zmínit, že obrázek má dvě části. Na obrázku vlevo je vidět, záznam termovizní kamery, který ukazuje pohled na vlastní reálný proces. Zde bylo velmi důležité zajistit pohled, tak aby tříška natočená plošně. Proto je na obrázku níže



vidět barevné spektrum barev, ze kterého je možný odpočet teploty. Graf, který vznikl vpravo, bude popsán v dalším odstavci.

Z grafu je vidět, jak na začátku obrábění měla tříska minimální teplotu. Po začátku řezu však teplota razantně stoupla. Během 20 pixelů stoupla teplota třísky až na hranici 330 °C, jak je vidět na pravé části obrázku.

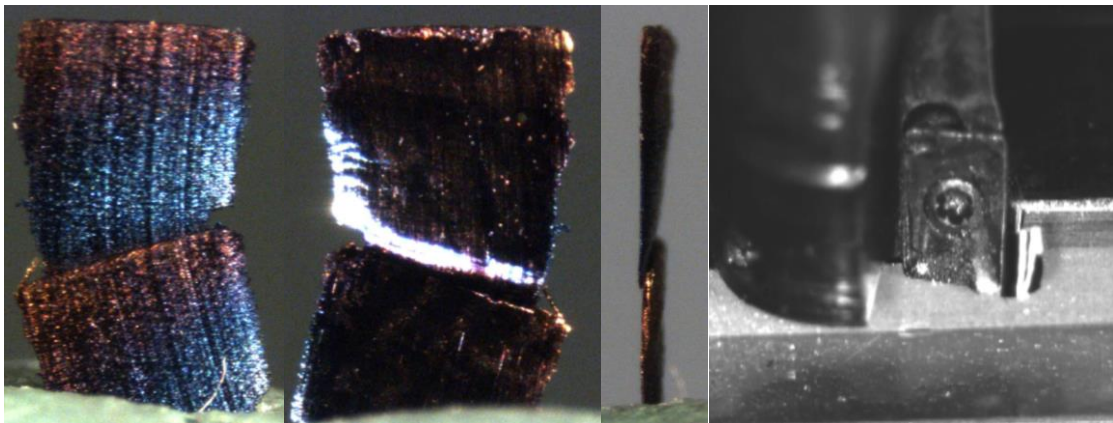


Obrázek 28 – Tříska snímaná termovizní kamerou při šířce záběru 0,5 mm

### 3.3.2. Druhé testování – šířka záběru 3 mm

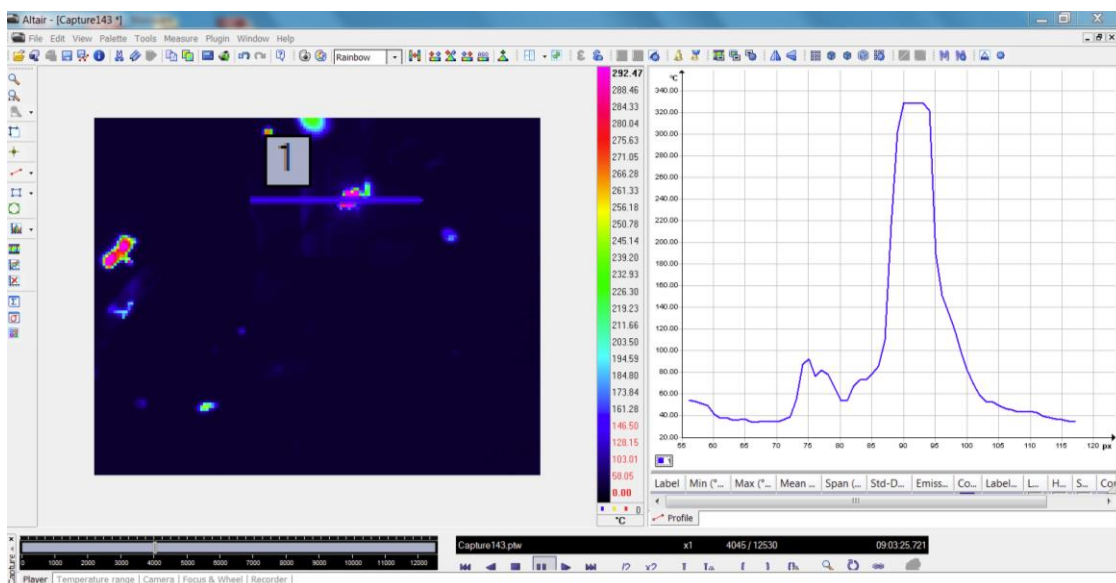
Druhá tříska, která vznikala při obrábění, měla šířku záběru 3 mm. Zde nastala první změna řezných podmínek. Tříska byla odebírána ve větší šířce záběru než v prvním případě. Ze záznamu bylo vidět, jak se tříska postupně začala navařovat na břitovou destičku, navařování nebylo tak markantní, ale odehrávalo se. Tříska, která vznikala při řezu, byla dělená a článkovitá. Nejvyšší možná teplota, která byla dosažena, se pohybovala okolo hranice 330°C.

Po ustálení na mikroskopu a jejím proměření byla patrná větší šířka třísky. V tomto konkrétním případě byla šířka 0,18 mm. Tříska se nijak nezkroutila a nezdeformovala, a tudíž nemohlo proběhnout měření rádiusu jako v následujících případech, o kterých bude zmínka dále v této práci.



Obrázek 29 – Vzniklá tříška o šířce záběru 3 mm

Obrázek z termovize níže popisuje graf a barevné spektrum teplot. Na první pohled je vidět, že teplota dosahuje na větší hodnoty, nežli bylo v předešlém případě. Je to zcela logické, protože pokud se odebírá větší šířka záběru, musí tam probíhat větší přenos energie. To má za následek větší ohřátí třísky, jak je vidět na obrázku pro šířku záběru 3 mm.



Obrázek 30 - Tříška snímaná termovizní kamerou při šířce záběru 0,3 mm

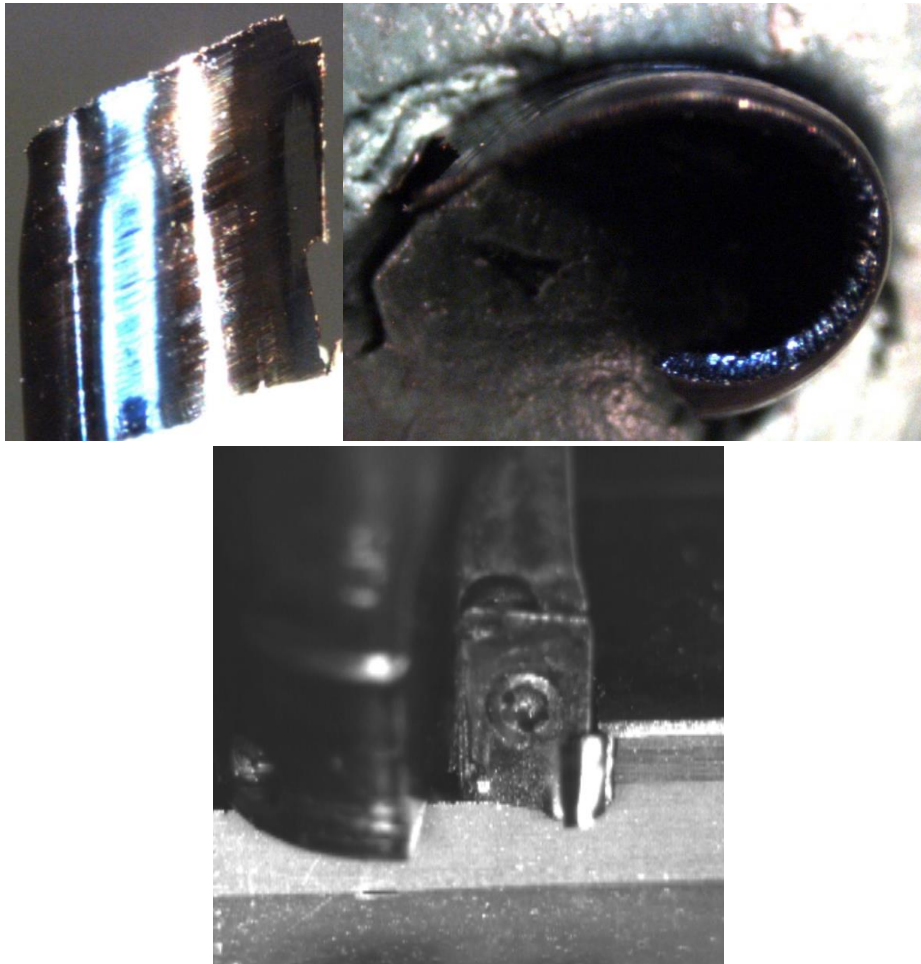
### 3.3.3. Třetí testování – šířka záběru 5 mm

Třetí tříška, která vznikala při obrábění, měla šířku záběru 5 mm. Při sledování třísky v měřícím softwaru na notebooku bylo patrné, že tříška, která odchází z místa řezu má opět vyšší teplotu, než v předešlých dvou případech. V tomto případě se stalo to, že první VBD jela v řezu dobře a třísku odebírala tak jak měla.

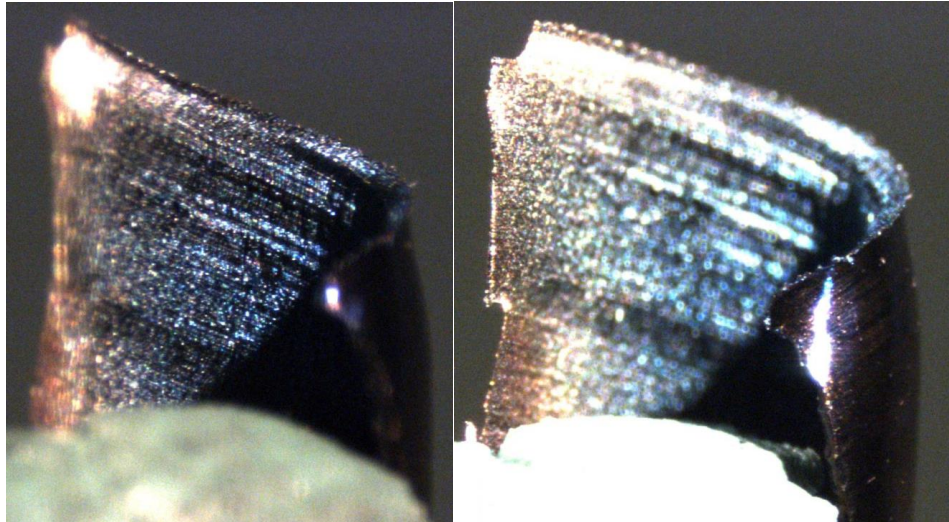
Naproti tomu druhá destička, jednou půlkou VBD, třísku neodebírala vůbec, to byla známka toho, že u této destičky proběhlo určité otupení.

Teplota dosahovala až na hranici 335 °C. To se dá vysvětlit tím, že pokud se postupně odebírá větší objem materiálu, tak se třísky nepodaří tak rychle vychladnout. Předává se tam totiž větší množství energie.

Podle obrázku níže je vidět, že třísky začala vytvářet spirálky. Šířka byla podle předpokladů také větší a měla 0,25 mm. Rádus, který zde vzniknul ve spirálce, byl 1,01 mm velký. Na obrázcích níže je dobře vidět vnitřní strana třísky. Nechybí ani pohled ze shora na spirálku a vnitřní strana třísky.



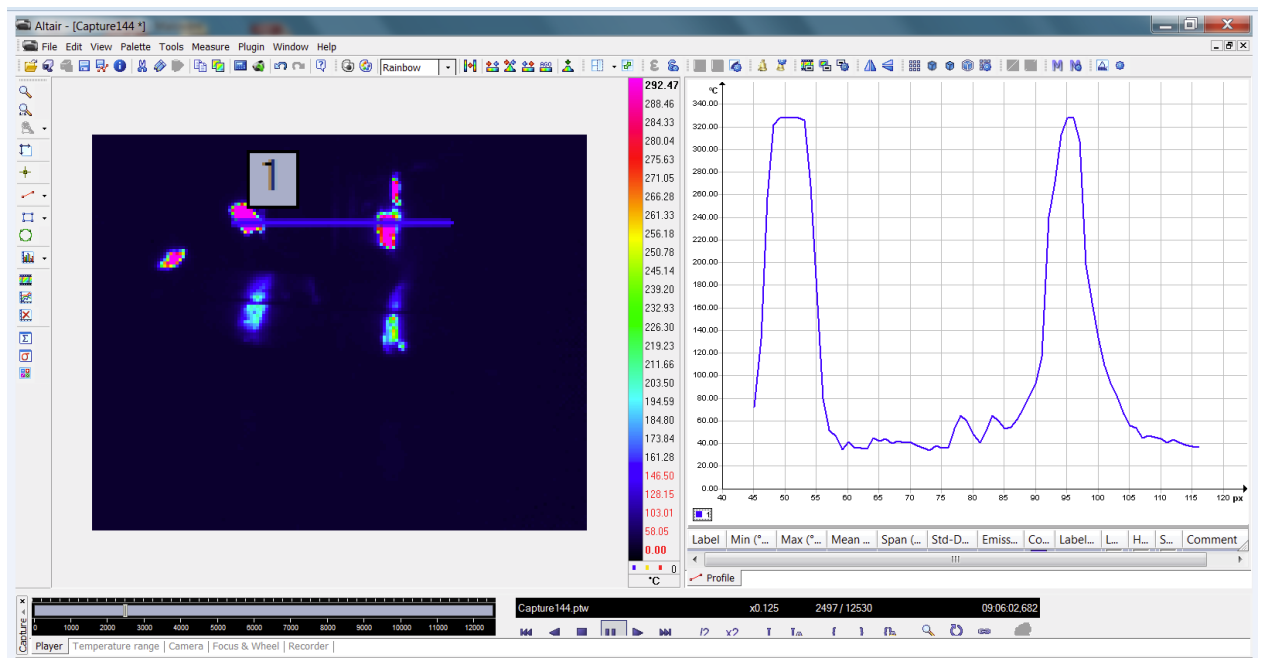
Obrázek 31 – Třísky o šířce záběru 5 mm



Obrázek 32 – Ukázka vnitřní strany třísky o šířce záběru 5 mm

I tato třetí odebraná tříška, měla vyhodnocení z termovizní kamery v podobě obrazové části a grafu. Zde bylo znát, že teplota je opět větší. Teplota byla po odečtu o 5 °C vyšší, nežli byl předešlý experiment, je to přičítané zvyšující šířce záběru.

Na grafu je možnost vidět dvě maxima, je to způsobené tím, že v levé části jsou měřené 2 třísky současně. Naměřené maxima teplot u třísek jsou však stejné.

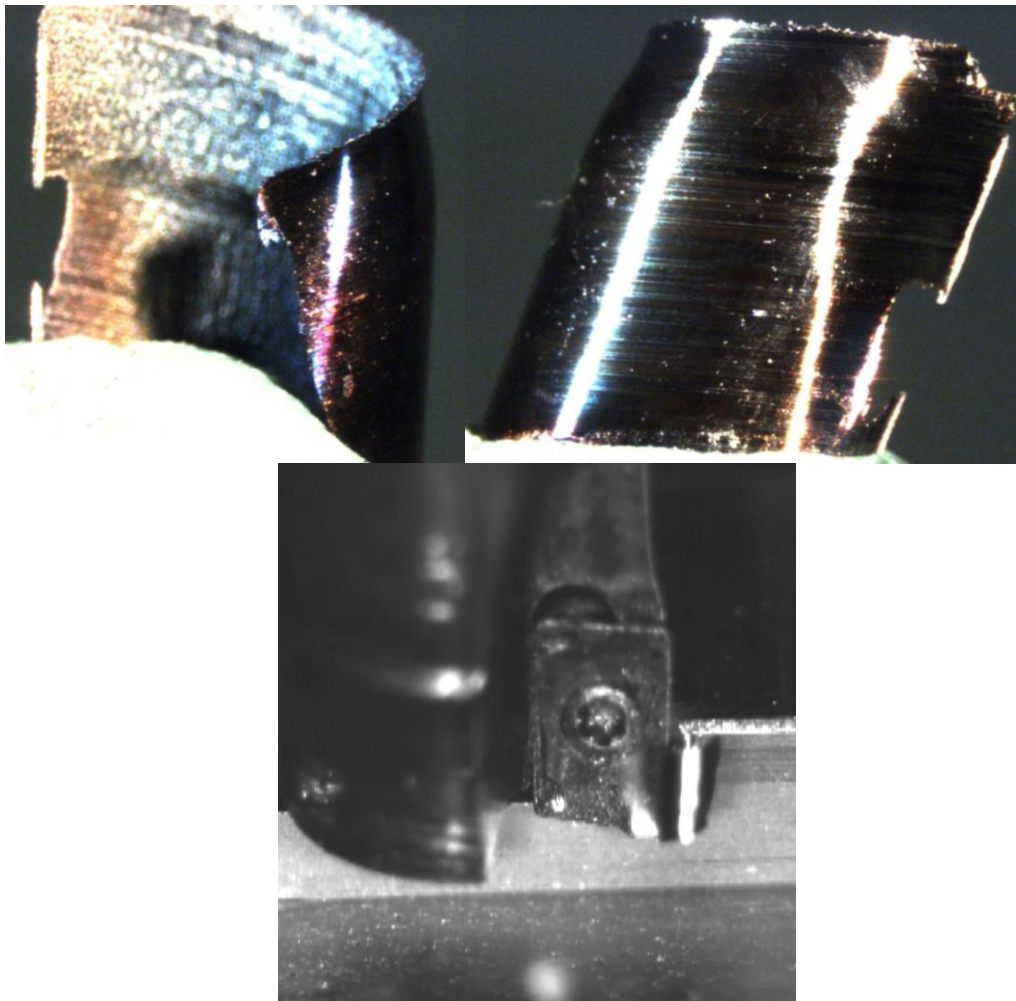


Obrázek 33 - Tříška snímaná termovizí při šířce záběru 5 mm

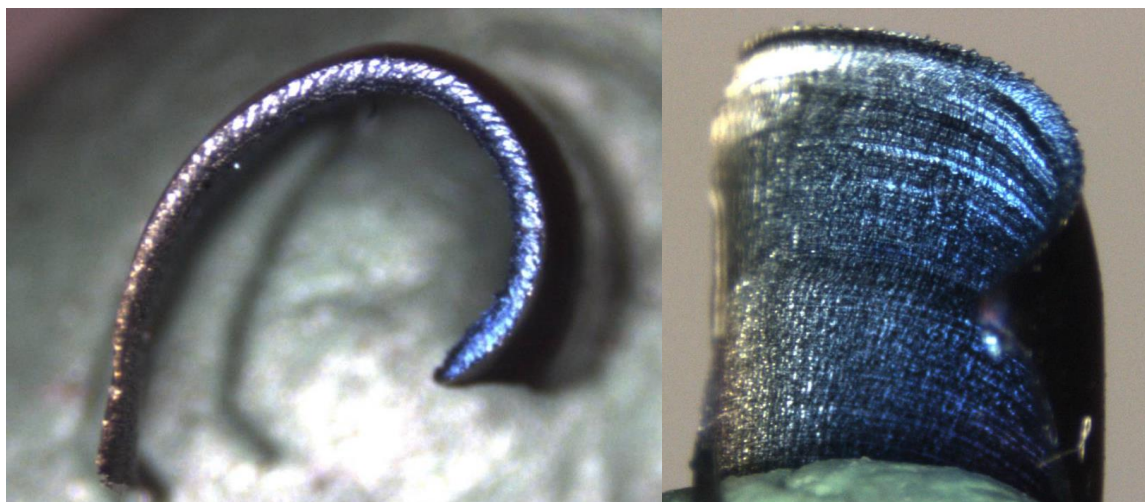
#### 3.3.4. Čtvrté testování – šířka záběru 8 mm

Čtvrtá tříška, která byla odebírána, měla šířku záběru 8 mm. Zde byl předpoklad, že tato šířka záběru je hranicí frézy a VBD. Fréza ovšem řez vydržela a tak mohlo dojít k uříznutí třísky a následnému odečtu hodnoty pro maximální teplotu. Teplota po odečtení se pohybovala v mantinelu okolo 360 – 385 °C v nejvyšších místech.

Při procesu řezání byly také slyšitelné vibrace, které vznikaly při frézování. Po tomto posledním obrábění bylo znatelné otupení břitové destičky, které vznikly odebráním velké třísky. Otupení břitu následně bylo oskenováno na optickém skenovacím zařízení IFM G4. Šířka zde byla podle předpokladů největší ze všech druhů třísek. Šířka třísky, která se naměřila, byla 0,28 mm a rádius spirálky byl 1,15 mm. Opět nechybí fotografie z měřicího mikroskopu, který se nachází v laboratořích KTO.

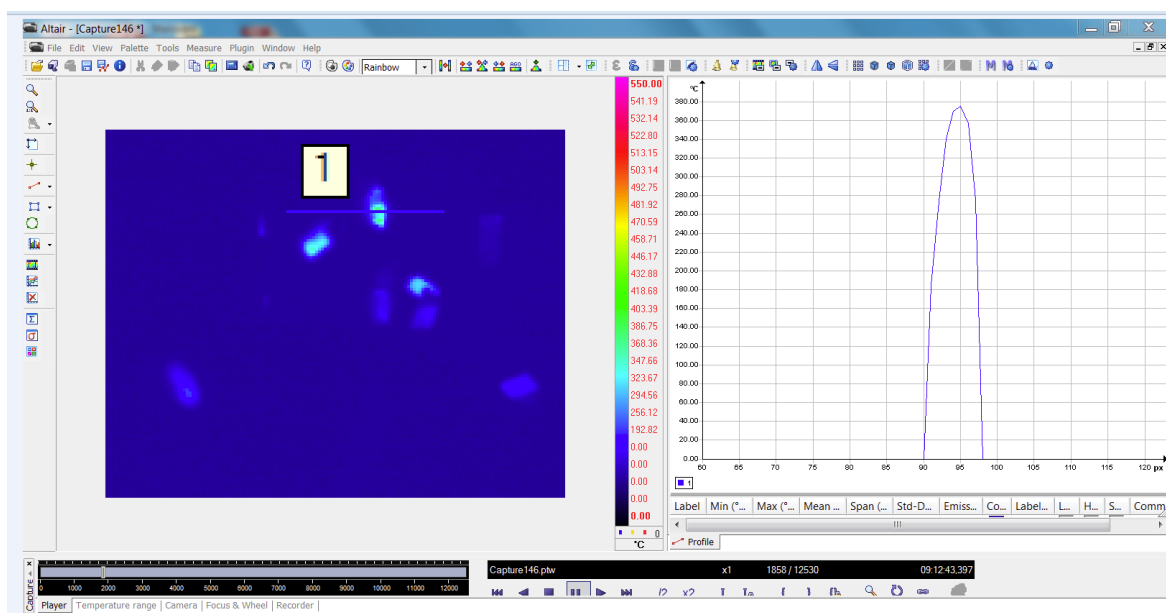


Obrázek 34 – Tříška o šířce záběru 8 mm – vlevo začátek, vpravo konec třísky



Obrázek 35 – Vlevo: Vytvoření spirálky, Vpravo: Vnitřní strana třísky

V tomto posledním případě nesměl chybět obrázek z termovizní kamery. Zde bylo jedno překvapení a to hodnota výsledné teploty. Tyto teploty byly skoro až u stropu 390 °C. Což bylo překvapivé. Očekávání bylo, že teplota bude stoupat konstantně, jako v předešlých případech, ale skok zde byl skoro o 40 °C oproti poslednímu měření. Tělo frézy bylo taktéž zahřáto, což se v předešlých experimentech neuskutečnilo. Po skončení testování bylo tělo frézy zahřáté až na 35 °C, což se nepředpokládalo. Měření však tímto nebylo v žádném případě ovlivněno. Je to pouze zajímavý fakt, který se odehrál při experimentu.



Obrázek 36 - Tříška snímaná termovizní kamerou při šířce záběru 8 mm

### 3.4. Vysokorychlostní kamera

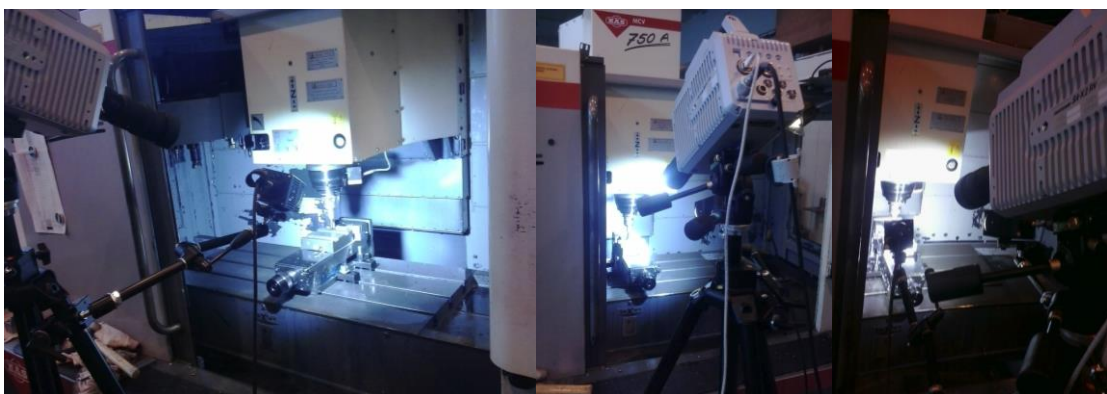
Dokáže během několika sekund zaznamenat proces řezání, díky vysoké snímací frekvenci. Použita byla proto, aby bylo možné vidět utváření třísky. Dále disponuje rozsáhlými možnostmi nastavení snímacích režimů.

Následně dokáže záznam přehrát v určité kvalitě i tisíckrát pomaleji a tím detailně sledovat zajímavou tvorbu třísky, která je zájmem této práce. Za zmínku stojí i odolná robustní konstrukce, která řadí tyto kamery do horních příček v oblasti vysokorychlostního snímání při obrábění.

[W16]



Obrázek 37 – Příprava vysokorychlostní kamery pro záznam řezu



Obrázek 38 – Důležité osvětlení úseku, ve kterém bude odcházet tříška



Obrázek 39 – Záznam vysokorychlostní kamery, která nahrávala odchod třísky

Parametry kamery:

Snímač 1024x1024 obrázkových bodů

Bitová hloubka 12bit

Snímací frekvence při plném rozlišení 12 500 sn/sec

Maximální snímací frekvence 1 000 000 sn/sec

Paměť 8/16/32/64GB

### 3.5. Termovizní kamera

Slouží k tomu, aby při řezu zaznamenávala teplotu vznikající třísky. Kamera byla nasměrovaná na místo, ve kterém probíhalo odebírání třísek z řezu. Použitá byla kamera FLIR SC 7000, je to speciálně navržená kamera, která slouží pro tyto účely. Tato kamera je zaměřena především pro vývojářské, akademické, průmyslové, výzkumné a vědecké účely v oblasti obrábění, tváření a svařování. Tyto kamery mohou být jak s chlazením, tak nechlazené, záleží na výkonu jednotlivých druhu kamer. Kamery tohoto druhu mají charakter vysoké citlivosti, přesnosti, velikého prostorového rozlišení a dostatečnou rychlostí za přijatelnou prodejní cenu. [W15]

Dále obsahuje software, který se nazývá FLIR ResearchIR MAX. Tento software dokáže získat z jakékoliv kamery maximum. Mezi jeho největší výhody patří plně radiometrické digitální zvýšení detailu (DDE) a velmi pokročilá analýza tepelných stop. Dovoluje dokonce i v reálném čase zkoumat tepelné procesy a i ty nejmenší teplotní rozdíly, které detekuje a vizualizuje. To všechno jen podtrhuje to pro co je tato kamera určená a to jsou výzkumné účely, jako to bylo v tomto případě.

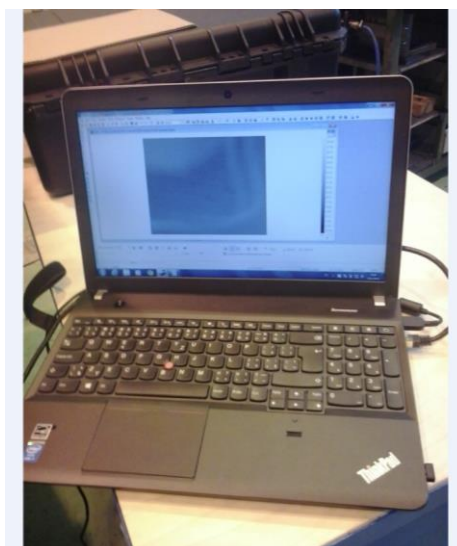


Mezi další funkce, které uživateli poskytuje, jsou např. filtrování obrazu, generování grafických výstupů, ve formě grafů či histogramů, vytváření měřících funkcí (čárové, plošné, bodové), dodatečná změna parametrů (emisivita, odražená teplota a podobně). Nabízí dále export dat do video formátů, Matlabu a nebo do Excelu. [W15]

FLIR SC 7000 používá LWIR spektrální pásmo 320x256 a 640x512 MCT a INSB detektory Close-up zobrazovací až 7  $\mu\text{m}$ . V neposlední řadě obsahuje i motorizované filtry, které jsou 4-polohové a 8-polohové. [W15]



Obrázek 40 – Termovizní kamera nasměrovaná na místo řezu



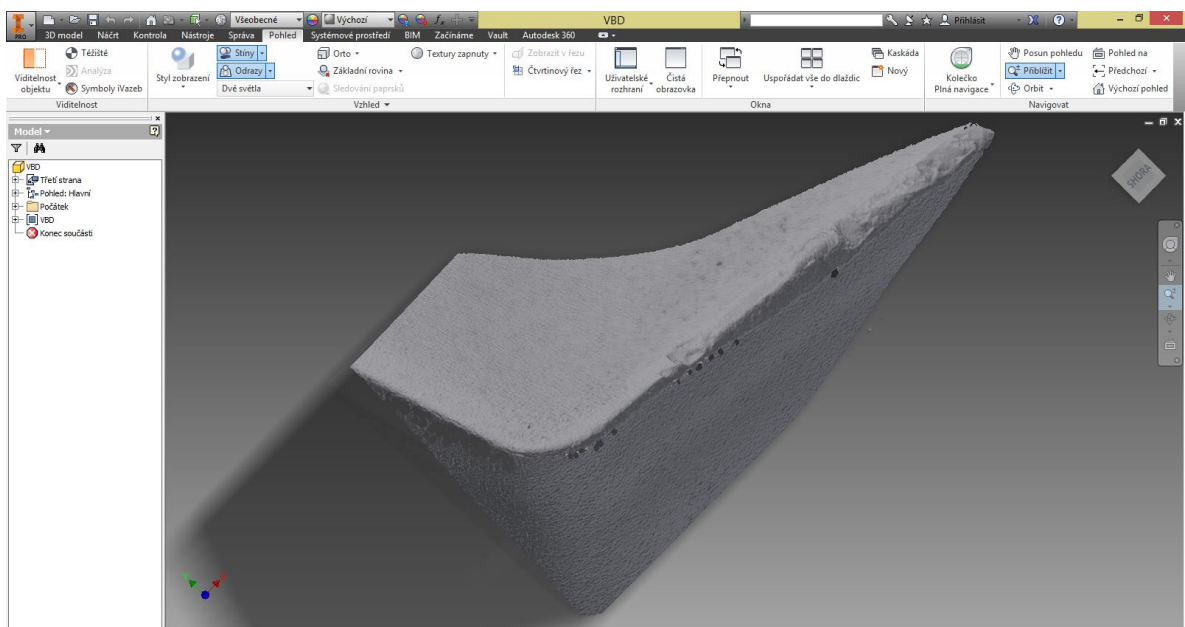
Obrázek 41 – Zobrazení aktuálních teplot třísek v přenosném notebooku

### 3.6. Optické skenovací zařízení IFM G4

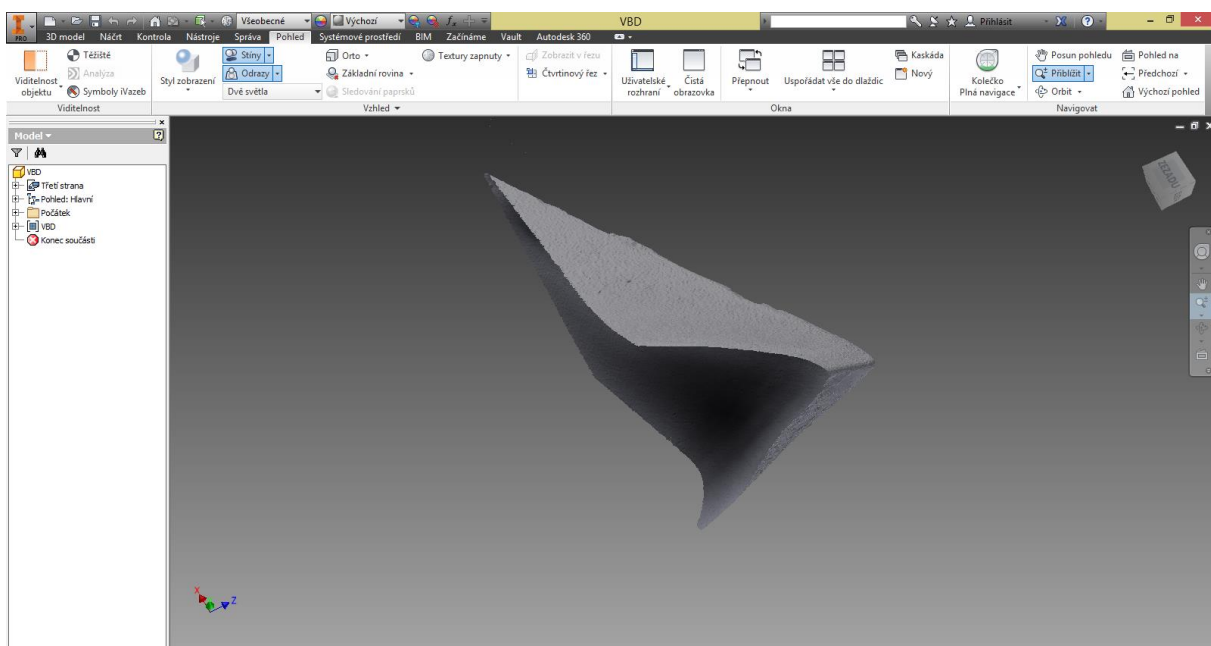
Tento scanner byl použit pro oskenování VBD, kterou byla tříska odebírána. Uživateli navíc umožní klíčovou schopnost měření tvaru, drsnosti a kvality povrchu. Dokonce i složitých a miniaturizovaných geometrií výrobků a součástí. Tento scanner poskytuje ve vysokém rozlišení měření a to hlavně v oblasti výzkumu, strojírenské výroby, provozů a inovací. [W21]

Focus-Variation je nová klíčová technologie, která kombinuje funkčnost mikro souřadnicového měřicího systému a povrchovým měřením. Je to nová, stabilní a robustní technologie, která přináší opakovatelné a výsledovatelné měření i ve výrobě. Pro uživatele to znamená, že používá plošný základ k měření tvaru a drsnosti. Prodává se v 11 základních konfiguracích s cílem pokrýt pestrou škálu aplikací a řešení pro strojírenský průmysl a zlepšují tak produktivitu provozů po celém světě. Optické skenovací zařízení Alicona je používána s obrovským úspěchem po celém světě pro měření řezných nástrojů jako např. vrtáky, závitníky, VBD, frézy a podobně. Tento skenovací stroj používají výrobci nástrojů, výrobci obráběcích strojů, pro ražení mincí, výrobci tiskových zařízení, tiskových válců, výzkumná zařízení, výrobci leteckých výrobků a zdravotnických výzkumných zařízení pro vládu. [W21]

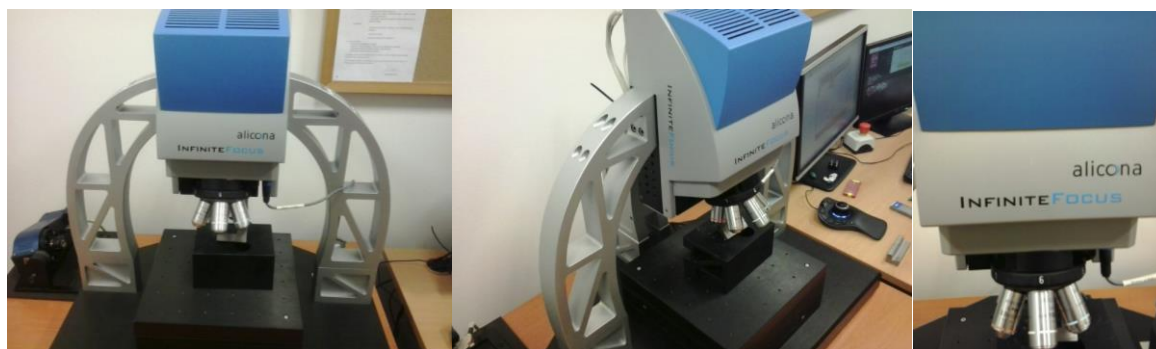
V našem případě se skenovala vyměnitelná břitová destička na obrázku níže. Zde byl získán kompletní 3D obraz VBD po obrábění, kde byly patrné stopy po opotřebení nástroje. [W21]



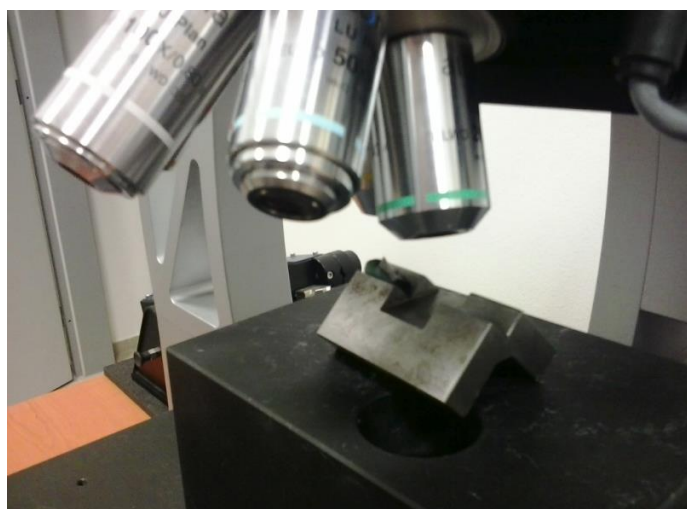
Obrázek 42 – Oskenovaný roh VBD – přední pohled (laboratoře RTI)



Obrázek 43 – Oskenovaný roh VBD – zadní pohled (laboratoře RTI)



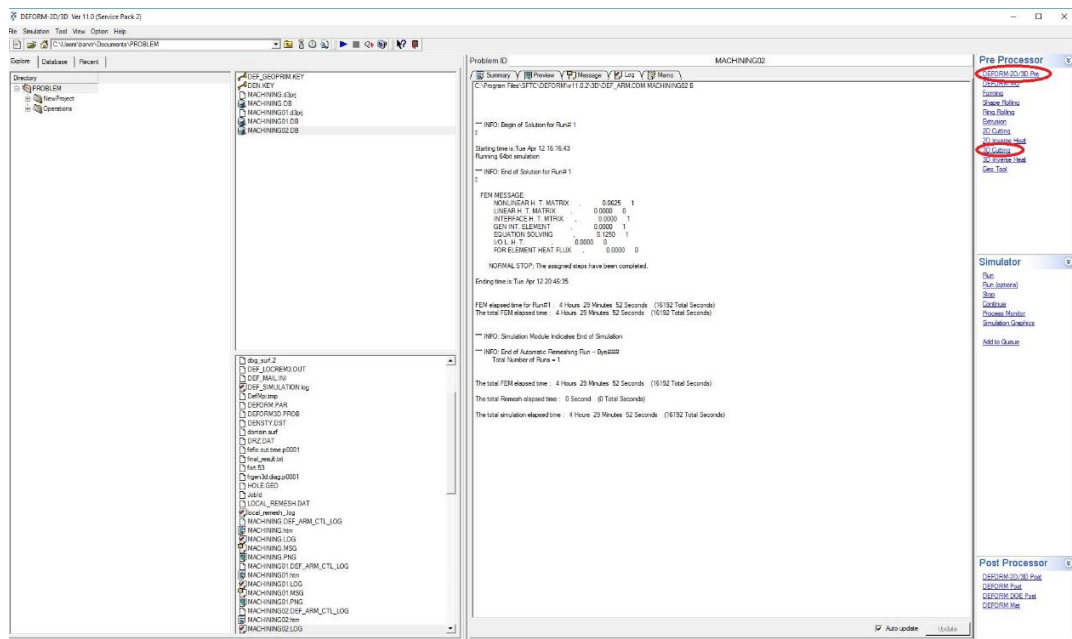
Obrázek 44 – Optické skenovací zařízení IFM G4 (laboratoře RTI)



Obrázek 45 – Skenování VBD (laboratoře RTI)

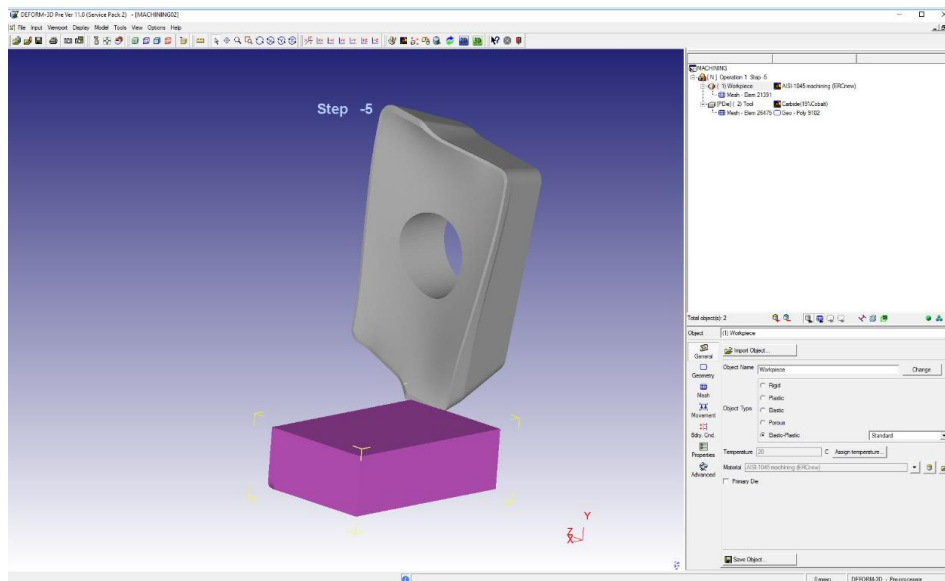
### 3.7. Testování – získání vzorku ze simulace

Zde byl cíl získat podobný nebo stejný vzorek ze simulace, a poté ho srovnat s reálným vzorkem z frézování. Proto, aby simulace mohla vůbec vzniknout, bylo nutné si nastavit parametry simulace v Pre Processoru. Zde je možnost si vybrat v jakém prostředí chce uživatel pracovat. Na výběr je zde z 2D a 3D Cuttingu, tváření a podobně. V tomto případě se pracovalo ve dvou prostředí a to DEFORM-2D/3D Pre a ve 3D cuttingu. V této práci je nutné dbát na to, aby řezné podmínky reálného experimentu souhlasily s podmínkami v simulaci.



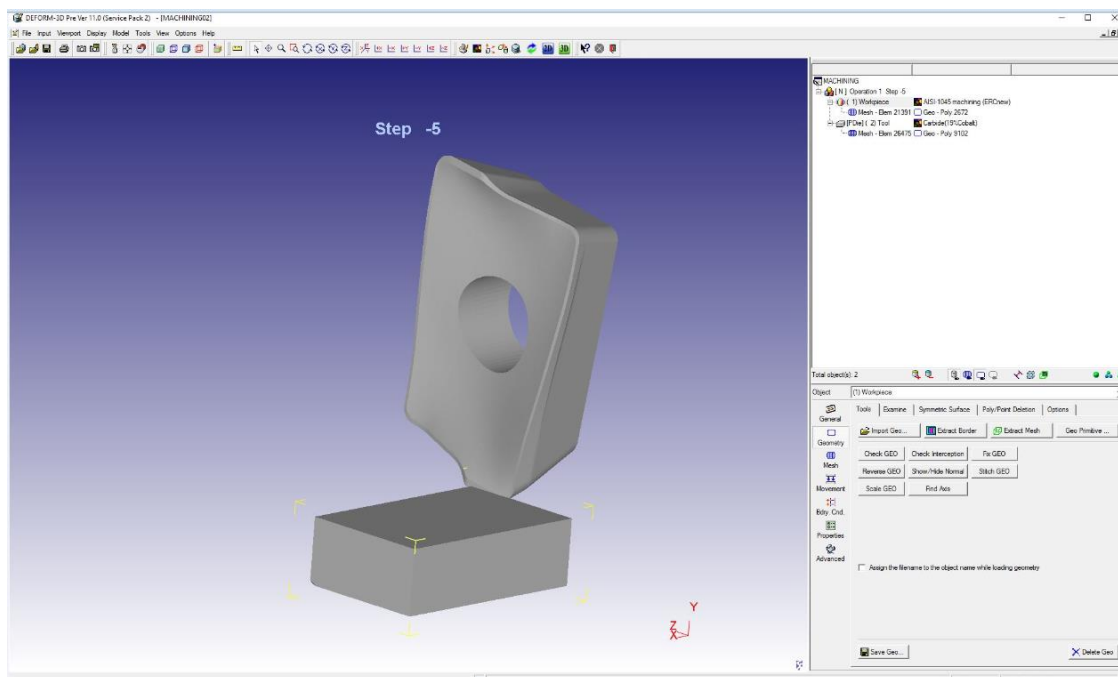
Obrázek 46 – Rozhraní pro začátek simulace DEFORM – 2D/3D Ver 11.0

Další krok, který bylo nutno nastavit, byl výběr materiálu a to jak pro obrobek, tak i pro nástroj. Zde je uživatel nabízena možnost změny materiálu a to přehledně a jednoduše. Na výběr je z rigidního, plastického, elastického, porózního a elasto-plastického materiálu. Samozřejmě je možnost vložení vlastního objektu (možnost vložení vlastního materiálu), který by si uživatel musel nastavit sám. Zde stojí za zmínku, že model VBD byl v STL formátu. A 100% odpovídá skutečnému stavu, ve kterém se obrábělo, což je pro simulaci to nejdůležitější.



Obrázek 47 – Nastavování materiálu pro obrobek a nástroj

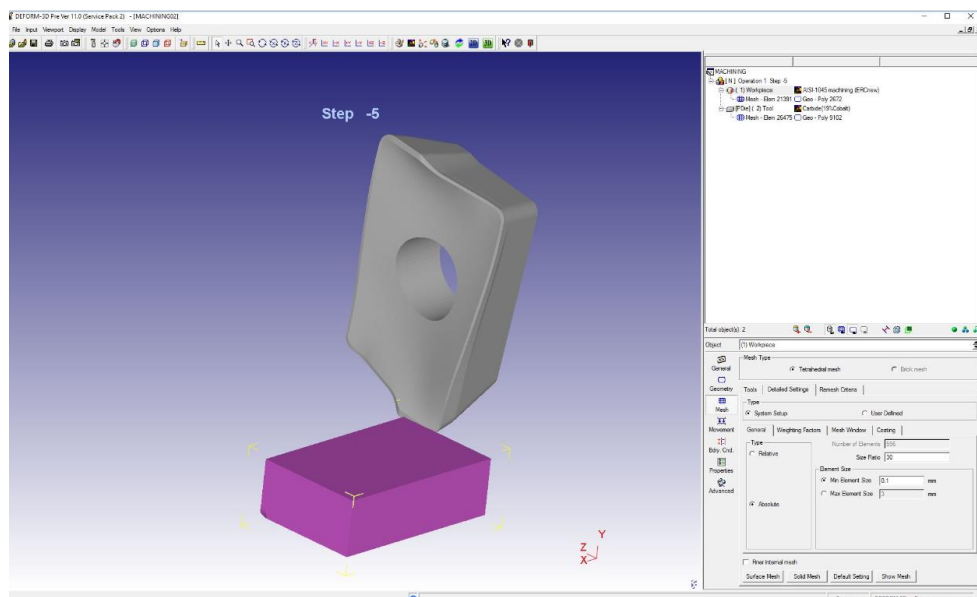
V další záložce se nachází možnosti pro import vlastní geometrie a její zkontrolování, nebo vytvoření geometrie v tomto rozhraní. Je tu i možnost extrahovat hranice a síťování.



Obrázek 48 – Možnost nastavení geometrie obrobku a nástroje

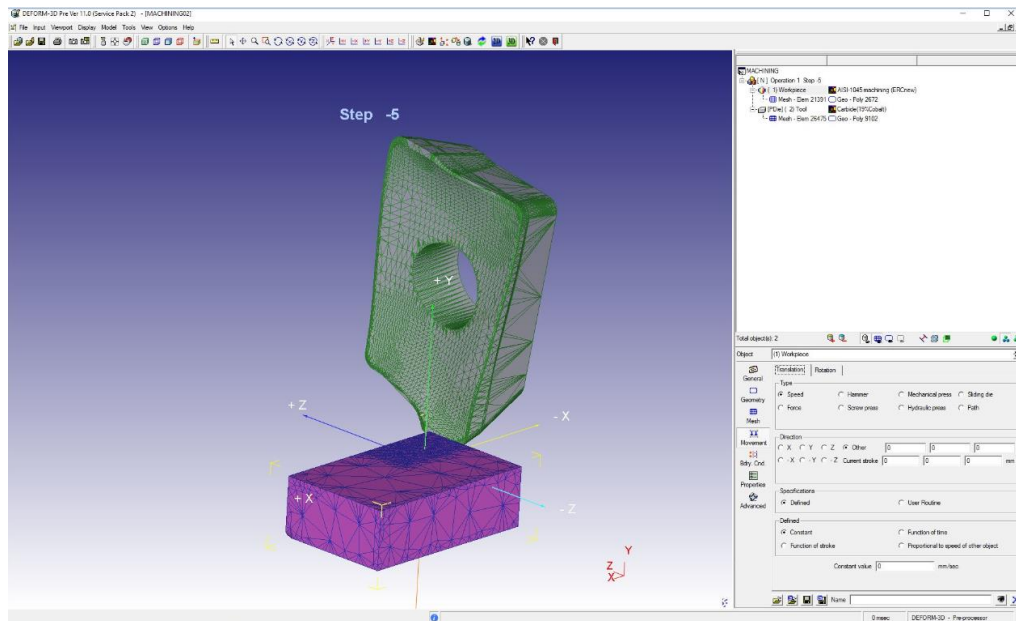
Následující krok uživatele zavede do oblasti síťování. Zde se nachází mnoho možností, jak upravovat a nasítovat model. Záleží v jakém místě, v jaké hloubce a v jakém rozsahu potřebuje uživatel odchod materiálu simulovat. Síťovat lze buď povrchově, to je rychlejší řešení pro ukázkou simulace, nebo objemově. Druhý případ

bývá časově delší řešení. Síť je prakticky to nejdůležitější na této simulaci, průběh simulace je závislá na tom, jak bude síť nadefinovaná. Síť v tomto případě musí být tak jemná, aby tříska, která se bude simulovat a odebírat, byla dostatečně popsána. Vysítovaná byla prostorovými prvky, protože simulace probíhala ve 3D. Tyto prvky byly zjemněné v oblasti místa řezu a to samé proběhlo i u obrobku. To z toho důvodu, že tam dochází ke kontaktu mezi tělesy, a proto byla potřeba udělat jemnou síť u obou těles. Kdyby byla hrubá, tak by došlo ke zkreslení výsledku, nebo ke špatnému kontaktu mezi tělesy. Je to nelineární úloha, co se týče jednak geometrie a materiálových vlastností, protože zde dochází k dělení materiálu. Samozřejmě je také důležité aby se síť dynamicky měnila při simulaci podle napětí. Je zde možnost si zvolit relativní, nebo absolutní typ sítě, dále se dá upravovat minimální a maximální velikost elementu a podobně. Tříska je v tomto případě něco, co je ve velkém měřítku zdeformováno. Probíhají zde velmi vysoké napětí v místě, kde se tříska odděluje od základního materiálu. Proto je napětí, které se tu nachází, pro tuto práci velmi důležité.



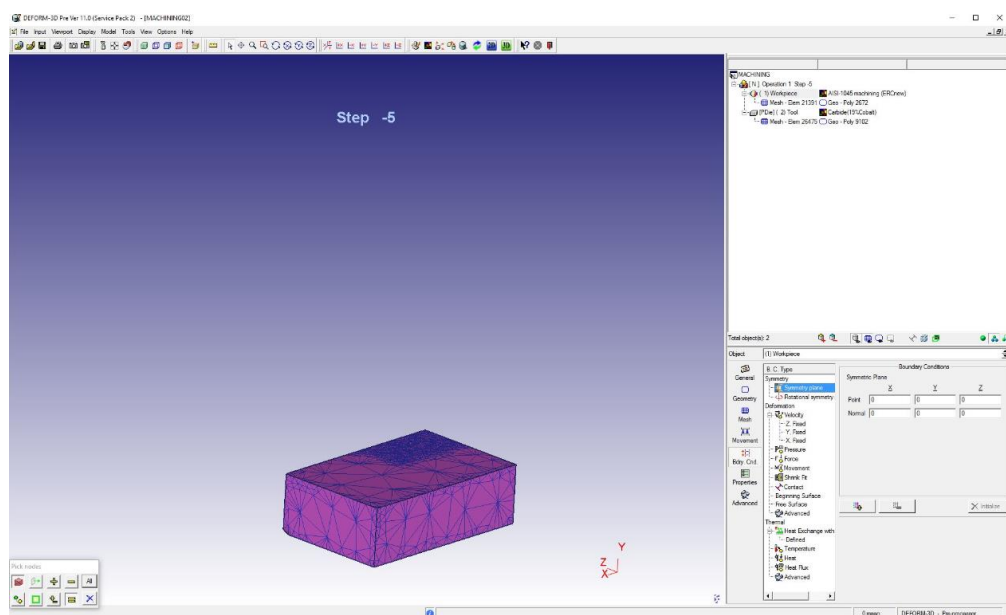
Obrázek 49 – Nastavení sítě u simulace

Další krok, který je pro správnou simulaci důležitý, je pohyb. Pohyb lze definovat pro obrobek i nástroj. V tomto případě bylo nutné zavazbit obrobek, tak aby se nepohyboval, zakázat mu jakýkoliv pohyb ve všech osách. Nástroji, tedy VBD byl nadefinován rotační pohyb okolo vlastní osy a přímočarý pohyb dopředu. Tak aby se docílilo co nejpresnějšímu pohybu, který se odehrával v reálném experimentu.



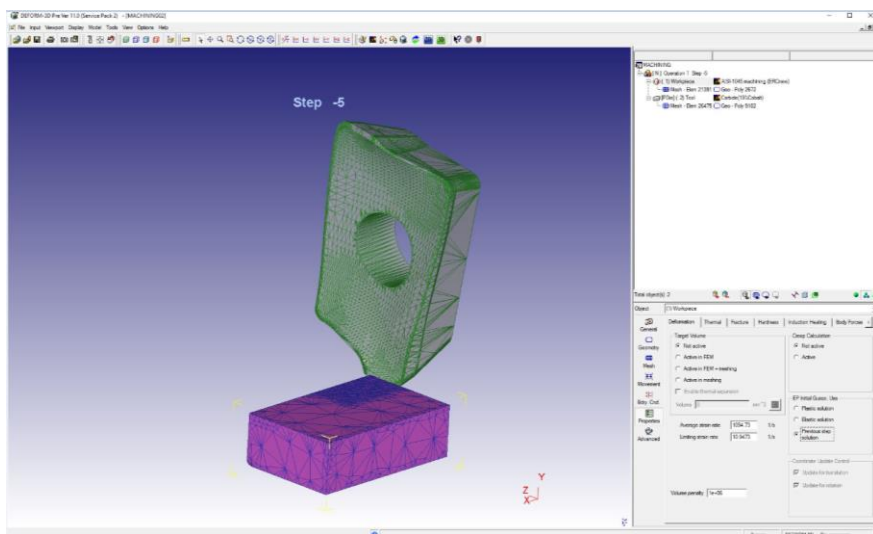
Obrázek 50 – Nastavení pohybu obrobku a nástroje

Další záložka, která byla nutná vyplnit, se jmenuje nastavování okrajových podmínek obrobku a nástroje. V této záložce se ukrývají různé okrajové podmínky pro symetrické roviny, deformace a teploty. U symetrické roviny se pracuje s hodnotami všech tří os, které lze libovolně nastavovat. Dále je tu možnost upravovat i rotační symetrii. V záložce deformace jsou spousty možností na nastavování jako např. rychlost, tlak, síly, momenty, smrštitelnost, kontakt, začínající a volný povrch. A poslední záložka v deformacích je teplota, zde se nastavují okrajové podmínky spojené s tepelnou výměnou, tepelným tokem a podobně.



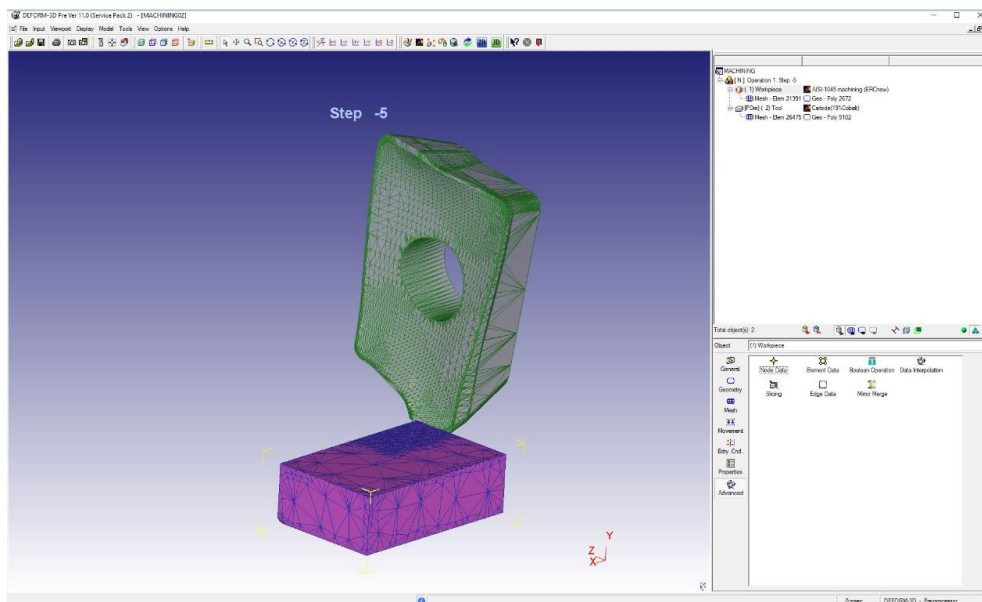
Obrázek 51 – Nastavení okrajových podmínek obrobku

V předposlední záložce se nacházejí vlastnosti deformace, teploty, tvrdosti, indukčního ohřevu, síly a podobně.



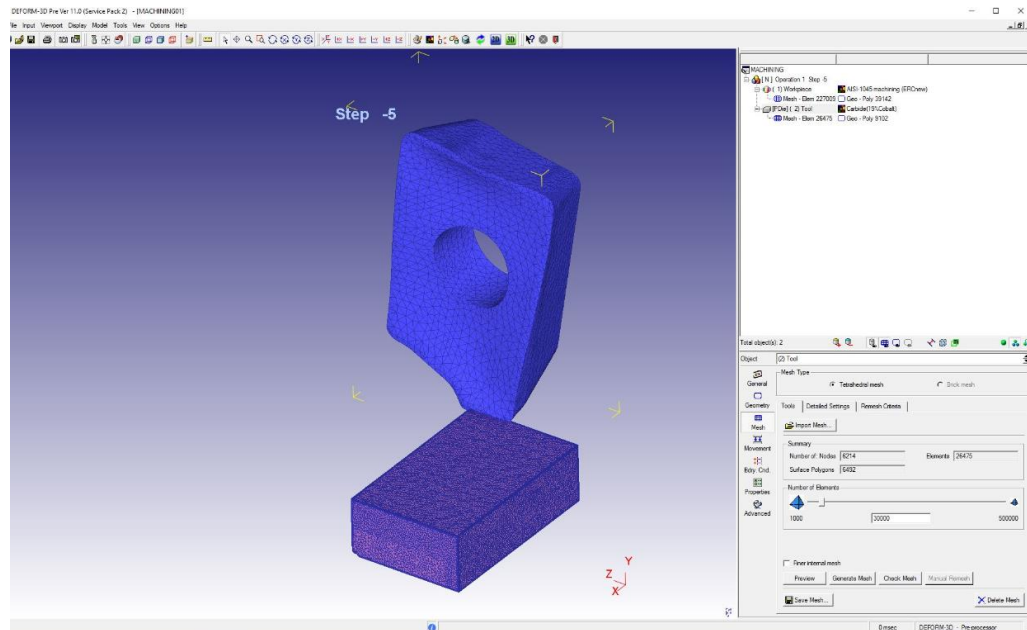
Obrázek 52 – Nastavení vlastností obrobku a nástroje

A poslední záložka je pro pokročilé uživatele, zde se nachází například údaje o uzlech, datových prvcích, řezání, údaje o hranách a interpolace dat. Jelikož toto byla pilotní simulace, do takovýchto detailů se nezacházelo. Důvod byl jednak ten, že chyběly zkušenosti a vědomosti, ale také jsou tyto operace velmi časově náročné.



Obrázek 53 – Nastavení pro pokročilé uživatele





Obrázek 54 – Nasítování sestavy a spuštění simulace

## 4 Zhodnocení výsledků a doporučení

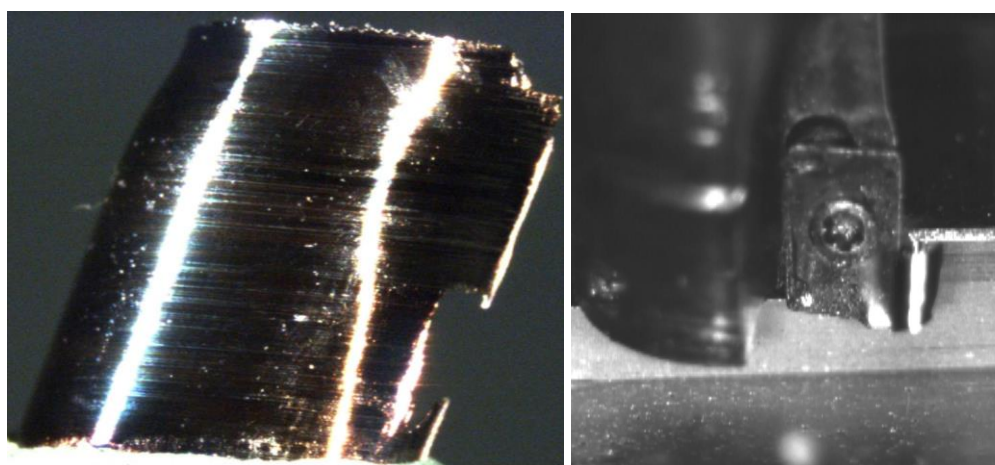
### 4.1. Porovnání simulace s reálným experimentem

Simulace řezného procesu je relativně složitý dynamický děj, proto to klade velké nároky na výpočty a celkové softwarové nastavení. Při reálném obrobení třísky se potřebuje vysledovat tvar utvářené třísky při frézování, to je pro tuto práci nejdůležitější. Jako další parametr je nutno zjistit maximální možnou teplotu třísky, která vzniká při obrobení. Nakonec je potřeba zjistit poměrovou deformaci, pnutí v povrchové vrstvě. Ty samé parametry je nutno zjistit následně i ze simulace v Deformu.

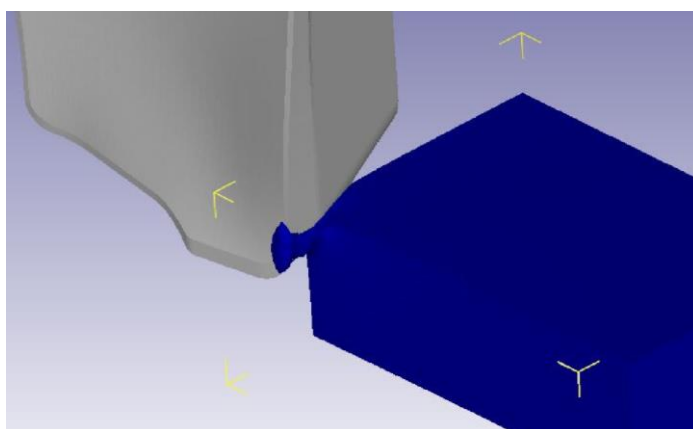
Reálný experiment proběhl bez problémů a tak mohly být zjištěné všechny parametry, které vznikaly a byly potřeba pro vzájemné porovnání. Tříska se odebírala pomocí strojního třískového obrábění a to frézováním. Byl použit vícebřitý nástroj, který konal hlavní řezný pohyb a vedlejší pohyb konal obrobek. Odebírání probíhalo pomocí dvou VBD při doporučených řezných podmínkách.

Ze simulace byla získána maximální teplota, tvar třísky a deformace. Simulace odchodu třísky proběhla pouze pro jednu šířku záběru. Z časových důvodů se nestihly dokončit všechny simulace šířky záběru. Pilotní simulace byla nastavená pro šířku 8 mm a pak probíhala její odlaďovací část.

Tvar třísky, pro šířku záběru 8 mm byl při reálném obrábění článkovitý, dělený. Při bližším zkoumání bylo zjištěno, že tříska byla velká, ale úzká. Simulace byla naladěná podle proběhlého experimentu. Pomocí simulace byla získána tříska, která přibližně odpovídala reálnému experimentu. Tříska, která se v simulaci oddělovala, byla článkovitá, úzká. Na obrázku je vidět, že je tříska tažená z materiálu. To je tím, že nástroj měl kratší dráhu. Pokud by se nástroj otočil o dalších 90°, tříska by se oddělila. Tvar nebyl úplně přesný, protože se zanedbaly materiálové detaily. Důvody zanedbání byly nezkušenost s těmito materiálovými vlastnostmi a hlavně časové důvody při simulaci. Při simulaci záběru třísky 8 mm se pohybujeme v řadě 8-10 hodin na odebrání jedné třísky.



Obrázek 55 – Tvar třísky 8 mm z reálného experimentu



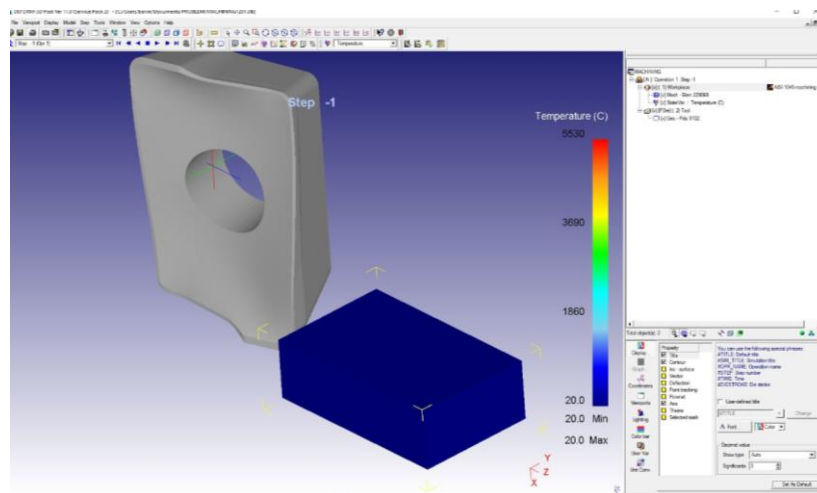
Obrázek 56 – Tvar třísky 8 mm ze simulace v Deformu

Tabulka 5 – Vyhodnocení tvaru třísky 8 mm

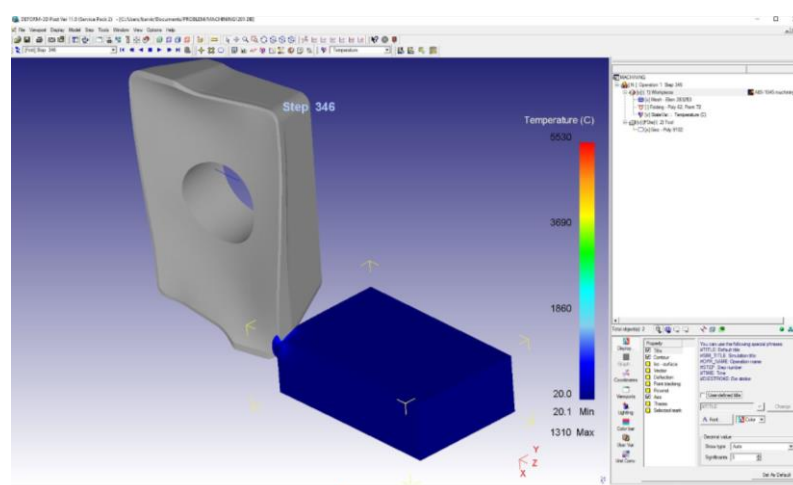
	<b>Tvar</b>	<b>Vyhodnocení</b>
<b>Reálný experiment</b>	Článkovitá, dělená	Totožné
<b>Simulace</b>	Článkovitá, nedělená	Totožné

Jako další parametr, který se musel zjistit, byla maximální teplota obrobené třísky. Po skončení simulace bylo možno odečíst teplotu na začátku, uprostřed a na konci řezu. Na začátku se teplota pohybovala okolo 20°C. Což byla pokojová teplota a teplota, od které byla nastavená simulace. Následujícím postupem bříty do materiálu se teplota zvyšovala. Přibližně uprostřed řezu, měla tříska teplotu okolo 1310°C. Konečná teplota odcházející třísky z místa řezu byla 1330°C. Tato informace byla překvapující, protože v reálném experimentu byla dosažena diametrálně jiná. Maximální naměřená teplota odcházející třísky byla okolo 380°C.

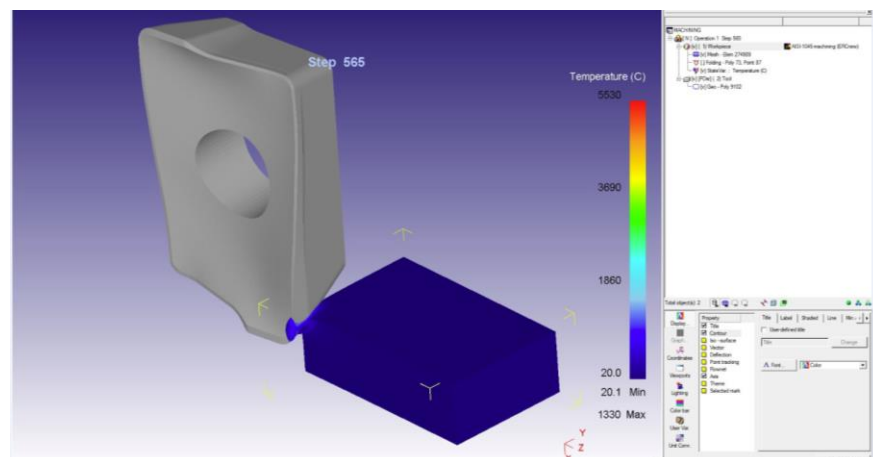
Zde je nutné dodat, že by se simulace musela vylepšit o analýzu opotřebení nástroje (kritériem opotřebení). Tato teplota je samozřejmě vysoká a je nutné zpřesnit simulaci tepelných toků. Všechny teploty, které byly naměřeny, jsou popsány níže u Grafu 2 – Závislost teploty na šířce záběru.



Obrázek 57 - Teplota na začátku simulace činila 20 °C



Obrázek 58 - Teplota uprostřed simulace činila 1310 °C

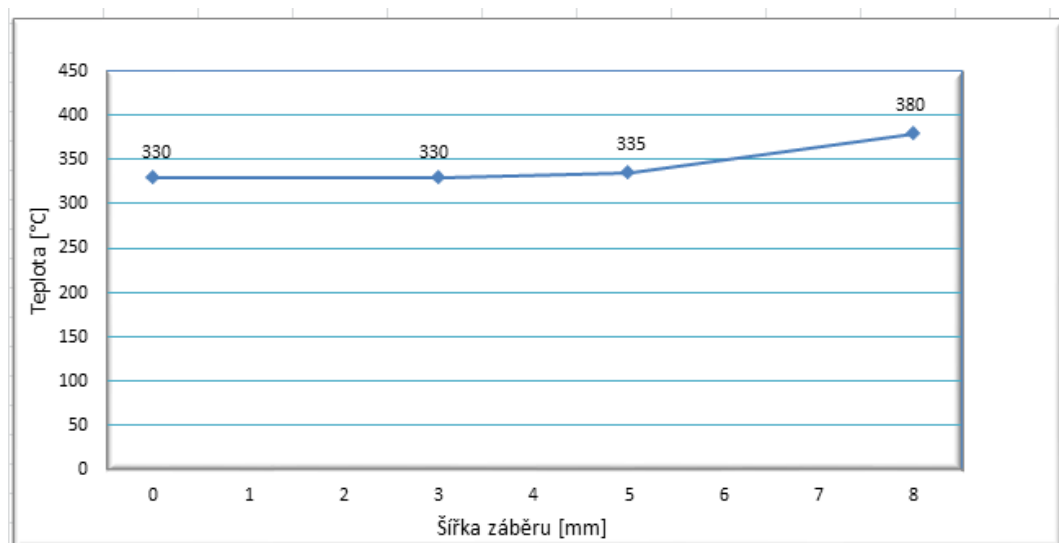


Obrázek 59 – Teplota na konci simulace činila 1330 °C

Tabulka 6 – Vyhodnocení teplot na konci řezu

	Teplota třísky na konci řezu [°C]	Vyhodnocení
<b>Reálný experiment</b>	380	Neshodující se
<b>Simulace</b>	1330	Neshodující se

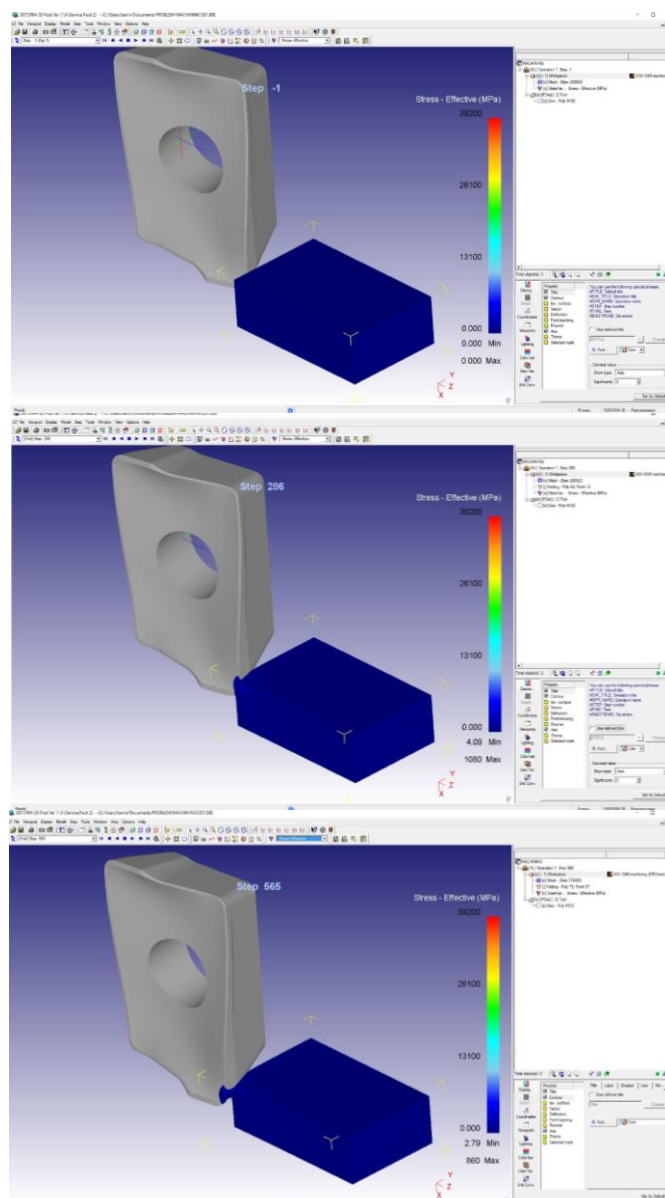
Na grafu níže je závislost teploty na šířce záběru. Z grafu je zřejmé, že se teplota pohybovala směrem nahoru při zvyšování šířky záběru třísky. První měřená teplota se pohybovala u hranice 330°C, zde tříška měla šířku záběru 0,5 mm. Druhý případ byl obdobný, protože teplota dosahovala přibližně stejné teploty. K nepatrným změnám došlo ve třetím případě, zde byla šířka záběru celých 5 mm. Teplota se zvedla o 5 °C, tzn., že teplota se zastavila na hodnotě 335°C. Až v posledním případě teplota se oddálila od předešlých případů. Konkrétně se teplota zastavila na hranici 380 °C.



Graf 2 – Závislost teploty na šířce záběru

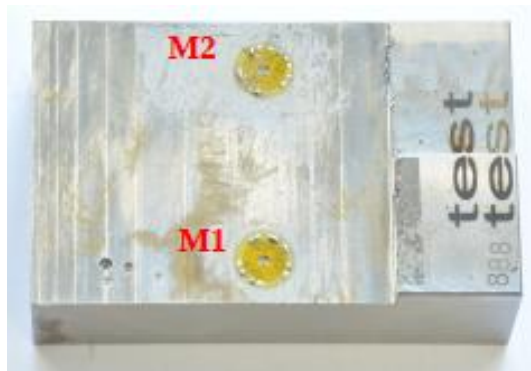
Jako poslední parametr bylo napětí vznikající při testu. Na obrázcích níže je vidět hodnotu napětí, které vzniká v třísece. Na počátku simulace bylo napětí na hodnotě 0. Po njetí VBD do obrobku se napětí zvětšovalo až na hranici 1080 MPa. Protože tu byl předpoklad, že napětí bude kolísavé, výsledek z konce simulace nebyl překvapující. Na konci simulace bylo napětí nižší a činilo 860 MPa. Toto se dá odůvodnit jako následným vyjetím VBD z obrobku a snížení napětí v materiálu.

Ani v tomto případě nebylo dosaženo stejných hodnot deformací. Reálný experiment neodpovídal simulaci, podobně jako neodpovídal u měření teplot.

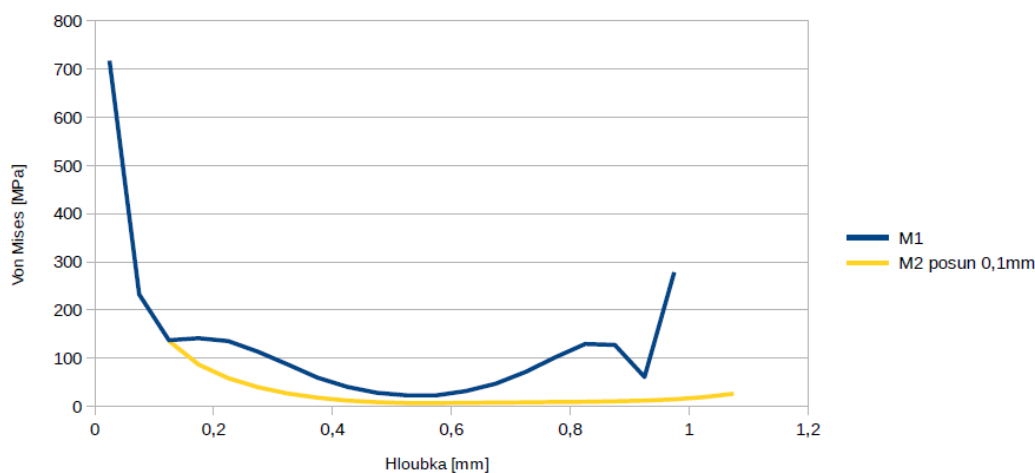


Obrázek 60 – Hodnota napětí na počátku simulace (horní), uprostřed simulace (prostřední) a napětí na konci simulace (dolní)

Reálný experiment - zkoušený vzorek, pro zjištění hodnoty deformace. Odvrtávací metodou byla zjišťována deformace. Vlivem technické chyby při najíždění byla odebrána menší vrstva (0,1 mm).



Obrázek 61 – Testovaný materiál 12 050.1



Obrázek 62 – Hodnota deformace

Tabulka 7 – Vyhodnocení napětí - srovnání

	Napětí [MPa]	Vyhodnocení
<b>Reálný experiment</b>	710	Neshodující se
<b>Simulace</b>	1080	Neshodující se

Celkové napětí při obráběcím procesu je obrovské a to je z toho důvodu, že dochází k porušení materiálu. Pokud porovnáme simulaci s reálným experimentem, tak je na první pohled vidět, že bude nutné simulaci upravit. Protože reálný proces vypadá úplně jinak než simulace. Jelikož je přesnost simulačního softwaru Deform, závislá hlavně na přesně zadaných řezných podmínkách, materiálových datech a kritériu porušování materiálů.

## 5 Závěr

Cílem bylo porovnat simulaci s reálným experimentem, to znamenalo namodelovat co nepřesněji proces obrábění, a poté ho vzájemně porovnat v Deformu, či jiném programu. Udělat rešerzi simulačních programů a z těch vybrat jeden vítězný.

Jako další softwary byly pro rešerzní část vybrány AdvantEdge a Abaqus. Deform byl vybrán, protože je postavený na výpočtu technologických operací. Je to specializovaný, konečně prvkový software pro řešení tohoto druhu problému. Hlavně byl k dispozici a dostupný, při řešení tohoto problému.

Materiál je v simulaci tažený a tzn. simulaci více probrat do detailu a doladit. Pokud porovnáme simulaci s reálným experimentem, tak je na první pohled vidět, že budou úpravy nutné. Protože reálný proces vypadá úplně jinak než simulace. Jelikož přesnost simulačního softwaru Deform, je závislá hlavně na přesně zadaných řezných podmínkách, materiálových datech a kritériu porušování materiálů.

Důvodem bylo zanedbání materiálových detailů, proto aby simulace vůbec mohla pracovat. To je důvod, proč není srovnání identické. Zde je nejdůležitější damage kritérium v Deformu. Je to kritérium porušování materiálů a vzniku trhliny. Tyto materiálová data se musí někde získat, v tomto případě byly vzaty z knihovny Deformu (nejbližší). Pro zpřesnění by bylo potřeba provést experiment. Což je samozřejmě drahé, časově velmi náročné a vyžaduje to přístup do laboratoří.

Přínos této práce je, že se naladil model, a pak je možno dělat optimalizace. Momentálně by mohl přijít na řadu výpočtář a jeho vlastní práce, která by ve výsledku šetřila čas, peníze, zmetky a podobně. Tím, že se změní materiál v simulaci a zkouší se. Je nadmíru jasné, že tato pilotní simulace potřebuje naladit s experimentem. Proto, aby se mohly zadat i jiné parametry dříve, než by se to provádělo v reálu, a předešlo se tak třeba k zničení nástroje.

Tato diplomová práce byla vytvořená, protože v rámci RTI chyběly zkušenosti se simulacemi obrábění. Je to vstupní práce proto, aby se pořídila správná technologie. Na RTI se věnují konstrukci nástrojů, a je jednodušší si některé věci odsimulovat, a pak si upravit geometrii. Z tohoto důvodu se hledal použitelný software, ve kterém se dá odsimulovat tříska.

Simulace by se dala vylepšit tím, že by se vylepšila analýza opotřebenosti nástrojů, tzn., že v Deformu by bylo potřeba použít kritérium opotřebenosti. To by mohlo být pokračování této diplomové práce. Každopádně, úkol, který byl zadán, je splněn.

## 6 Citované zdroje

### 6.1. Použitá literatura

- [1] Viktor P. Astakhov, Geometry of Single-point Turning Tools and Drills, Springer-Verlag London Limited 2010, ISSN 1860-5168, ISBN 978-1-84996-052-6, e-ISBN 978-1-84996-053-3
- [2] BRYCHTA J.; ČEP R. NOVÁKOVÁ J.; PETŘKOVSKÁ L., Technologie II - 1. díl. Ostrava : VŠB - TU Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1641-8
- [3] ČEP R., PETRŮ J., Experimentální metody v obrábění, Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2011, 146 s. ISBN 978-80-248-2533-5

### 6.2. Seznam obrázků

Obrázek 1 – Simulace soustružení v Deformu [W4] .....	4
Obrázek 2 - Animace výsledků simulace řezného procesu ve 3D – teplotní pole [W1].....	5
Obrázek 3 – Vzniklá tříska – experiment vs. simulace [W2].....	7
Obrázek 4 – Simulace frézování v programu Abaqus [W6] .....	8
Obrázek 5 – Konečno prvková síť a crash analýza [W18].....	9
Obrázek 6 – Model proudění u osobního automobilu [W18] .....	9
Obrázek 7 – Multibody simulace [W19].....	11
Obrázek 8 – Model proudění tekutiny a další fyzikální jevy [W20].....	11
Obrázek 9 – Plynulá tvářená tříska [W10] .....	13
Obrázek 10 – Dělená tvářená tříska [W10].....	13
Obrázek 11 – Zjednodušená tvorba elementů [W10].....	13
Obrázek 12 – Základní druhy tvářených třísek [W11].....	16
Obrázek 13 – Vznik a šíření tepla v místě řezání [W17] .....	18
Obrázek 14 – Příklad teplotního pole [W17] .....	19
Obrázek 15 – Rigidní geometrie VBD .....	21
Obrázek 16 – Ukázka 2D síťování modelu - jemnější síťování je v místě zájmu [W3] .....	23
Obrázek 17 – Nasíťovaná VBD pro simulaci v Deformu .....	23
Obrázek 18 – Realizace vlastního experimentu (řešení) – ukázka grafické cesty .....	25
Obrázek 19 – Použití materiálu 12 050 v praxi [W14] .....	26
Obrázek 20 – Výchozí struktura oceli 12 050.1 [W9] .....	27
Obrázek 21 – Opatření břitů VBD (oskenovaný model v optickém skenovacím zařízení IFM G4).....	27
Obrázek 22 – Reálné VBD pro testování .....	28
Obrázek 23 – Upnutí frézy do hydraulického upínače.....	28
Obrázek 24 – Upnutí hydraulického upínače do MCV stroje.....	29
Obrázek 25 – Vertikální obráběcí centrum MCV 750A .....	29
Obrázek 26 – Nastavení doporučených řezných podmínek pro obrábění.....	30



Obrázek 27 – Tříška, která vznikla po nastavení šířky záběru 0,5 mm .....	31
Obrázek 28 – Tříška snímaná termovizní kamerou při šířce záběru 0,5 mm.....	32
Obrázek 29 – Vzniklá tříška o šířce záběru 3 mm .....	33
Obrázek 30 - Tříška snímaná termovizní kamerou při šířce záběru 0,3 mm .....	33
Obrázek 31 – Tříška o šířce záběru 5 mm.....	34
Obrázek 32 – Ukázka vnitřní strany třísky o šířce záběru 5 mm .....	35
Obrázek 33 - Tříška snímaná termovizí při šířce záběru 5 mm .....	35
Obrázek 34 – Tříška o šířce záběru 8 mm – vlevo začátek, vpravo konec třísky .....	36
Obrázek 35 – Vlevo: Vytvoření spirálky, Vpravo: Vnitřní strana třísky .....	37
Obrázek 36 - Tříška snímaná termovizní kamerou při šířce záběru 8 mm .....	37
Obrázek 37 – Příprava vysokorychlostní kamery pro záznam řezu.....	38
Obrázek 38 – Důležité osvětlení úseku, ve kterém bude odcházet tříška .....	38
Obrázek 39 – Záznam vysokorychlostní kamery, která nahrávala odchod třísky .....	39
Obrázek 40 – Termovizní kamera nasměrovaná na místo řezu .....	40
Obrázek 41 – Zobrazení aktuálních teplot třísek v přenosném notebooku .....	40
Obrázek 42 – Oskenovaný roh VBD – přední pohled (laboratoře RTI) .....	41
Obrázek 43 – Oskenovaný roh VBD – zadní pohled (laboratoře RTI).....	42
Obrázek 44 – Optické skenovací zařízení IFM G4 (laboratoře RTI).....	42
Obrázek 45 – Skenování VBD (laboratoře RTI).....	42
Obrázek 46 – Rozhraní pro začátek simulace DEFORM – 2D/3D Ver 11.0.....	43
Obrázek 47 – Nastavování materiálu pro obrobek a nástroj .....	44
Obrázek 48 – Možnost nastavení geometrie obrobku a nástroje .....	44
Obrázek 49 – Nastavení sítě u simulace.....	45
Obrázek 50 – Nastavení pohybu obrobku a nástroje.....	46
Obrázek 51 – Nastavení okrajových podmínek obrobku .....	46
Obrázek 52 – Nastavení vlastností obrobku a nástroje .....	47
Obrázek 53 – Nastavení pro pokročilé uživatele .....	47
Obrázek 54 – Nasít'ování sestavy a spuštění simulace.....	48
Obrázek 55 – Tvar tříška 8 mm z reálného experimentu .....	49
Obrázek 56 – Tvar tříška 8 mm ze simulace v Deformu .....	49
Obrázek 57 - Teplota na začátku simulace činila 20 °C .....	50
Obrázek 58 - Teplota uprostřed simulace činila 1310 °C .....	50
Obrázek 59 – Teplota na konci simulace činila 1330 °C .....	51
Obrázek 60 – Hodnota napětí na počátku simulace (horní), uprostřed simulace (prostřední) a napětí na konci simulace (dolní) .....	52
Obrázek 61 – Testovaný materiál 12 050.1.....	53
Obrázek 62 – Hodnota deformace.....	53

### 6.3. Seznam tabulek

Tabulka 1 – Tvary třísek – Utvařeče (lamače) - hodnocení.....	16
Tabulka 2 - Mechanické vlastnosti dle ČSN 41 20 50 [W9] .....	26
Tabulka 3 – Zahraniční ekvivalenty, značení [W9] .....	26
Tabulka 4 – Chemické složení v % [W9] .....	26
Tabulka 5 – Vyhodnocení tvaru třísky 8 mm.....	49
Tabulka 6 – Vyhodnocení teplot na konci řezu.....	51
Tabulka 7 – Vyhodnocení napětí - srovnání .....	53

### 6.4. Seznam grafů

Graf 1 – Závislost řezného odporu na tloušťce třísky [W12].....	15
Graf 2 – Závislost teploty na šířce záběru .....	51

### 6.5. Webové stránky

[W1] Možnosti simulace řezného procesu [online]. [cit. 2015-10-28].

Dostupné: <http://m.mmspektrum.com/clanek/moznosti-simulace-rezneho-procesu>

[W2] Diplomová práce-Zverina 2010 [online]. [cit. 2016-01-22].

Dostupné: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=25461](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=25461)

[W3] Metoda konečných prvků [cit. 2016-02-11].

Dostupné: [www.cs.wikipedia.org/wiki/Metoda\\_kone%C4%8Dn%C3%BDch\\_prvk%C5%AF](http://www.cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_kone%C4%8Dn%C3%BDch_prvk%C5%AF)

[W4] FEM tools for cutting [cit. 2016-02-13].

Dostupné: [http://www.scientificbulletin.upb.ro/rev\\_docs\\_arhiva/full1f4\\_156806.pdf](http://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/full1f4_156806.pdf)

[W5] Metoda konečných prvků [cit. 2016-02-14].

Dostupné: [http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/MKP/prednaska1\\_mkp.pdf](http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/MKP/prednaska1_mkp.pdf)

[W6] Využití FEM pro analýzu procesu frézování [cit. 2016-02-13].

Dostupné: <http://www.cad.cz/component/content/article/5289.html>

[W7] Simulace v technice [cit. 2016-03-01].

Dostupné: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Simulace\\_v\\_technice](https://cs.wikipedia.org/wiki/Simulace_v_technice)

[W8] Počítačová podpora technologie [cit. 2016-03-01].

Dostupné: [http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory\\_soubory/download/pocitacova\\_podpora\\_tehnologie\\_\\_kopriva.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/download/pocitacova_podpora_tehnologie__kopriva.pdf)

[W9] Ocel 12 050 [cit. 2016-03-07].

Dostupné: [http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/databaze\\_modelu\\_soubory/ocel\\_12050.3.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/databaze_modelu_soubory/ocel_12050.3.pdf)

[W10] Teorie třískového obrábění [cit. 2016-03-8].

Dostupné: <http://techstroj.g6.cz/T/T11.pdf>

[W11] Třískové a netřískové obrábění [cit. 2016-03-11].

Dostupné: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=39389](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39389)

[W12] Teorie třískového obrábění kovů [cit. 2016-03-12].

Dostupné: [https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwjvr4TUs7vLAhUoYZoKHxPDM4QFggbMAA&url=http%3A%2F%2Fcoptel.coptkm.cz%2Freposit.php%3Faction%3D0%26id%3D33586%26instance%3D2&usg=AFQjCNGpbJTQ9upGvRrr1HnIe\\_SNZHhdBQ&sig2=znf2UwnC69E\\_Tw4cVuuJ-g&bvm=bv.116636494,d.bGs&cad=rja](https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwjvr4TUs7vLAhUoYZoKHxPDM4QFggbMAA&url=http%3A%2F%2Fcoptel.coptkm.cz%2Freposit.php%3Faction%3D0%26id%3D33586%26instance%3D2&usg=AFQjCNGpbJTQ9upGvRrr1HnIe_SNZHhdBQ&sig2=znf2UwnC69E_Tw4cVuuJ-g&bvm=bv.116636494,d.bGs&cad=rja)

[W13] 12 050, C45 [cit. 2016-03-14].

Dostupné: <http://www.preciz.cz/sluzby-hlavni/material-normal/1.1191>

[W14] Rozdělení a označení ocelí [cit. 2016-03-19].

Dostupné: [http://www.ateam.zcu.cz/znaceni\\_oceli.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/znaceni_oceli.pdf)

[W15] FLIR ResearchIR MAX [cit. 2016-03-13].

Dostupné: <http://www.tmvss.cz/vyrobc/flir/flir-researchir-max.html>

[W16] Proxis [cit. 2016-03-13].

Dostupné: <http://www.proxis.cz/?i=1617/rada-sa>

[W17] Zdroje tepla a tepelná bilance [cit. 2016-03-13].

Dostupné: [http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO\\_kapitola\\_03.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_03.pdf)

[W18] Vývoj vozu – počítačové simulace [cit. 2016-05-09].

Dostupné: <http://fea.blog.auto.cz/2006-11/vyvoj-vozu-pocitacove-simulace-1/>

[W19] Statické analýzy [cit. 2016-05-11].

Dostupné: [http://www.advanced-eng.cz/engineering#!prettyPhoto\[gallery\]/11/](http://www.advanced-eng.cz/engineering#!prettyPhoto[gallery]/11/)

[W20] Computational Fluid Dynamics [cit. 2016-03-13].

Dostupné: <https://caei.com/ansys-software-support/ansys-software/computational-fluid-dynamics-ansys-cfx-and-fluent-cfd-software>

[W21] Metoptix – Alicona Form and Roughness Measurement [cit. 2016-05-1].

Dostupné: <http://www.metoptix.com.au/products/other-products/form-and-roughness-measurement>