

NETISKNOU!

Titulní list

NETISKNOU!

Zadání

NETISKNOU!

Licenční smlouva - oboustranně

## ABSTRAKT

Práce bude zaměřena na MKP pro rychlé simulace obrábění. Úvodem bude popsáno teoretický základ MKP. Jednotlivé metody (implicitní, explicitní) a jednotlivé programy (Ansys Ls-Dyna, Abaqus, Deform, AdvantEdge). Na závěr bude proveden vzorový výpočet pro ortogonální obrábění, který bude vytvořen v Ansys Worbench, spočten ve výpočetním programu Ls-Dyna a výsledek zobrazen v programu LS-PrePost.

### Klíčová slova

Metoda konečných prvků, Ansys, explicitní, ortogonální obrábění

## ABSTRACT

The work will be focused on FEM for fast machining simulation. Introduction described the theoretical basis of FEM. The various methods (implicit, explicit) and the individual programs (ANSYS Ls-Dyna, Abaqus, Deform, AdvantEdge). At the end of the model calculation will be made for orthogonal cutting, which will be created in Ansys Worbench, counted in a computer program LS-DYNA and the results displayed in the LS-PrePost.

### Key words

FEM, Ansys, explicit, orthogonal cutting

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠEDA, Pavel. *MKP pro rychlé simulace obrábění*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 39 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Zouhar, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma MKP pro rychlé simulace obrábění vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....  
Datum

.....  
Pavel Šeda

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto Ing. Janu Zouharovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi ochotně poskytoval a zejména za jeho trpělivost při vypracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat svým přátelům, rodině a přítelkyni, kteří mě po celou dobu studia podporovali.

**OBSAH**

ABSTRAKT .....	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ .....	6
OBSAH .....	7
ÚVOD .....	9
1 ÚVOD DO MKP .....	10
1.1 Historický vývoj.....	10
1.2 Základní rovnice pružnosti.....	10
1.2.1 Rovnice rovnováhy .....	11
1.2.2 Rovnice geometrie .....	11
1.2.3 Konstitutivní rovnice .....	12
1.2.4 Okrajové podmínky .....	12
2 POPIS JEDNOTLIVÝCH METOD.....	13
2.1 Implicitní a explicitní MKP .....	13
2.2 Implicitní MKP .....	13
2.2.1 Základní principy implicitní MKP .....	13
2.2.2 Parametry implicitní MKP .....	14
2.3 Explicitní MKP .....	14
2.3.1 Základní principy explicitní MKP .....	14
2.3.2 Parametry explicitní MKP .....	15
2.3.3 Kritická hodnota časového kroku .....	15
2.3.4 Jednobodová integrace prvků .....	16
2.3.5 Hourglassing .....	16
2.3.6 Formulace explicitní MKP .....	17
3 POPIS JEDNOTLIVÝCH PROGRAMŮ .....	19
3.1 ANSYS.....	19
3.1.1 Popis programu Ansys .....	19
3.1.2 Ls-Dyna.....	19
3.2 ABAQUS.....	19
3.2.1 ABAQUS- Explicit .....	19

FSI VUT	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	8
---------	------------------	---

3.2.2	Tvorba modelu .....	19
3.2.3	Tvorba sítě konečných prvků .....	20
3.2.4	Knihovna materiálů .....	20
3.2.5	Zadávání podmínek zatížení .....	20
3.2.6	Výsledky simulace .....	20
3.3	DEFORM .....	21
3.3.1	Volba parametrů nástroje .....	21
3.3.2	Volba parametrů obrobku .....	21
3.3.3	Simulace .....	21
3.3.4	Výsledky simulace .....	21
3.4	ADVANTEDGE .....	21
3.4.1	Tvorba modelu .....	22
3.4.2	Simulace .....	22
3.4.3	Výsledek simulace .....	22
4	VZOROVÝ VÝPOČET PRO ORTOGONÁLNÍ OBRÁBĚNÍ .....	23
4.1	Vytvoření součástí .....	23
4.2	Načtení geometrii součástí .....	24
4.2.1	Načtení materiálu .....	25
4.3	Vytvoření sítě .....	26
4.3.1	Zhuštění sítě u obrobku .....	27
4.3.2	Zhuštění sítě u nástroje .....	27
4.4	Přiřazení vazeb .....	29
4.5	Přiřazení posuvu .....	29
4.6	Nastavení parametrů výpočtu .....	30
4.7	Spuštění výpočtu .....	31
4.8	Výsledky výpočtu .....	32
4.8.1	LS-PrePost .....	32
4.8.2	Zobrazení výsledku v LS-PrePost .....	32
	ZÁVĚR .....	34
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	35
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....	37
	SEZNAM PŘÍLOH .....	39



## ÚVOD

MKP je rozšířenou numerickou metodou s historickým vývojem a matematickým základem, proto v první kapitole uvádíme co je to MKP a její historický vývoj, od 40. let 20.stol, kdy se poprvé publikovalo o této metodě a postupný vývoj metody až do dnešní doby. Dále popisujeme základní princip MKP. V druhé kapitole uvádíme popis jednotlivých metod implicitní a explicitní. První zmíněnou metodou je stručně popsán základní princip metody a její parametry. Druhou metodou popsanou v této práci je explicitní metoda, která je rozebrána více dopodrobna. O základní princip je ještě rozvedena o časové kroky, jednobodovou integrací či hourglassing. Poslední části druhé kapitoly je různá formulace explicitní metody. V třetí kapitole se více seznámíme s programy, které řeší problematiku MKP. Programy jsou buď volně šiřitelné, volně ke stažení bez placení žádné licence (CalculiX, Elmer, Module F atd.), nebo komerční kde se platí velmi drahé licence (Ansys, Abaqus atd.). Ve čtvrtém bodě bude vzorový výpočet pro ortogonální obrábění, u kterého součásti vytvoříme v programu Autodesk Inventor 2010, ty vyexportujeme do Ansys Workbench. V Programu Workbench určíme materiál součástí, vytvoříme síť konečných prvků, zadáme zatížení potřebné pro výpočet a nastavíme parametry pro dokončení výpočtu. Na závěr zhodnotíme různé metody, programy a výsledek z výpočtu pro ortogonální obrábění.

## 1 ÚVOD DO MKP

Všechny nástroje nebo stroje jsou konstruovány za účelem plnění předem stanovených funkcí a to např. spolehlivost, bezpečnost, tuhost, odolnost proti vnějšímu vlivu či prostředí, ve které je součást užívána. A proto musí být nástroje nebo stroje konstruovány tak aby nenastaly žádné mezní stavy<sup>2</sup>.

### 1.1 Historický vývoj

Metoda konečných prvků se datuje od 40. let 20. století, kdy se poprvé o ní zmínil ruský inženýr Alexander Hrenikoff a poté řada dalších. Postupy těchto zakladatelů byli odlišné, ale měly jednu společnou myšlenku a to, že rozdělí těleso na diskrétní části. Hrenikoff rozdělil těleso pomocí mřížky a třeba Courant, německý matematik, do konečného počtu trojúhelníkových částí<sup>3</sup>. Jedna z hlavních výhod MKP je dominantní postavení mezi numerickými metodami v oblasti inženýrských výpočtů a to je příčinou univerzálnosti metody. Teprve spojení číslicového počítače s těmito myšlenkami umožňuje v 50. letech ohromující rozvoj metody pomocí efektivnějšího spočtení řešení větších soustav algebraických rovnic. Ze samotného názvu, který se datuje z roku 1960 a hlavně z jeho anglického názvu The Finite Element Method (FEM) zdůrazňuje, že hlavní částí metody je prvek konečných rozměrů<sup>5</sup>. Rozkvět MKP lze dobře sledovat publikační aktivitou. Nejen časopisecké publikace, které dnes už těžko spočítáme, ale i knižní vydání kde prvním autorem a průkopníkem v roce 1967 byl profesor Zienkiewicz. Od prvního vydání knihy od Zienkiewicze, až do dnešní doby bylo vydáno k 470 různých výtisků, které řeší MKP. Z českých publikací jmenujme hlavně autory Zlámala a Ženíška, kteří 1972 přispěli k mezinárodnímu věhlasu brněnské školy a to korektní matematické formulaci základu MKP. Rozvoj MKP vedl přirozeně ke vzniku velkému počtu programů. Nejprve vznikaly v univerzitním prostředí pro řešení výzkumných úkolů. Už v průběhu 60. let se stále častěji využívalo vyvinutého softwaru pro inženýrské problémy, a to přímo z požadavků průmyslné praxe. Takový zájem o výpočtové prostředky přirozeně vedl k rozmachu programů na komerční bázi<sup>2</sup>. Prakticky všechny programy, týkající se MKP, mají základy do 80 let. V současné době je obtížné se prosadit s novým produktem, který nemá bohatou historii pozvolného budování od jednoduchých procedur, až po velmi rozsáhlé uživatelské prostředí<sup>3</sup>.

### 1.2 Základní rovnice pružnosti

Základní podstatou MKP je rozdělení tělesa na mnoho malých prvků. Složité tvary rozděleného tělesa se přetvoří na jednoduché a to trojúhelníky, čtyřúhelníky, obdélníky atd. Převedení na jednoduché tvary má za výhodu, že se dají snadno matematicky popsat. Dalším důležitým prvkem je počet a poloha uzlů a tyto důležité vlastnosti nám dohromady tvoří takzvanou síť. Hustota sítě nám ovlivní přesnost výsledku. MKP má teoretický základ v Lagrangeově variačním principu. A to je přímá úloha pružnosti, kterou budeme formulovat následovně: „Pro těleso se známou geometrií, materiálem, zatížením a vazbami k okolí určete jeho deformaci a napjatost.“ Pojmy deformace a napjatost byly dobře popsány v pružnosti pevnosti, víme tedy, že

v obecné statické úloze představují celkem 15 neznámých funkcí a tedy 15 rovnic proměnných  $x, y, z$ , které musí být doplněny okrajovými podmínkami. Z obecných rovnic pružnosti se postupně vyloučí neznámé funkce<sup>2</sup>. Jedná se o tyto neznámé funkce<sup>4</sup>:

- tři posuvy  $u, v, w$
- šest přetvoření  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$
- šest napětí  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$

### 1.2.1 Rovnice rovnováhy

Rovnice rovnováhy jsou podmínkami rovnováhy základního vnitřního prvku, na který působí složky napětí a vnější objemová síla o složkách  $o_x, o_y, o_z$ . Rovnice rovnováhy<sup>4</sup> uvádíme pro případ statického zatěžování ve vztahu (1.1).

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + o_x &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + o_y &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + o_z &= 0\end{aligned}\quad (1.1)$$

- kde:  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  - složky napětí,  
 $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$  - složky normálového napětí,  
 $o_x, o_y, o_z$  - složky objemové síly,

### 1.2.2 Rovnice geometrie

Rovnice geometrie<sup>2</sup> ve vztahu (1.2), mají vazbu mezi složkami posuvů a přetvoření. Jsou uvedeny pro případy malého přetvoření, řádu  $10^{-2}$  a menších<sup>2</sup>.

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} & \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} & \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} & \gamma_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} & \gamma_{xz} &= \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}\end{aligned}\quad (1.2)$$

- kde:  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  - složky délkového přetvoření,  
 $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}$  - složky uhlového přetvoření,  
 $u, v, w$  - složky posuvů,  
 $x, y, z$  - osově složky,

### 1.2.3 Konstitutivní rovnice

Konstitutivní rovnice<sup>2</sup> (1.4), mají spojitost mezi deformací a napjatostí. Rovnice uvádíme ve tvaru lineárně pružném, izotropním Hookovském materiálu, jehož vlastnosti jsou materiálové konstanty a ty spočteme podle vztahu<sup>2</sup> (1.3).

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (1.3)$$

kde:  $G$  [N.m<sup>-2</sup>] - modul pružnosti v tahu,  
 $E$  [N.m<sup>-2</sup>] - modul pružnosti ve smyku,  
 $\mu$  [N.m<sup>-2</sup>] - Poissonovo číslo,

Konstitutivní rovnice<sup>2</sup>:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E}[\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E}[\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)] \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E}[\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] \end{aligned} \quad (1.4)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy}$$

$$\gamma_{yz} = \frac{1}{G} \tau_{yz}$$

$$\gamma_{zx} = \frac{1}{G} \tau_{zx}$$

kde:  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  - složky délkového přetvoření,  
 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  - složky napětí,  
 $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}$  - složky uhlového přetvoření,  
 $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$  - složky normálového napětí,  
 $E$  [N.m<sup>-2</sup>] - modul pružnosti ve smyku,  
 $\mu$  [N.m<sup>-2</sup>] - Poissonovo číslo,  
 $G$  [N.m<sup>-2</sup>] - modul pružnosti v tahu,

### 1.2.4 Okrajové podmínky

Uvedené rovnice musí být doplněné o okrajové podmínky, které dále dělíme na geometrické a silové. Vždy můžeme předepsat jen jediné okrajové podmínky k danému místu a směru na povrchu. Geometrická podmínka vyjadřuje zadání posuvů na části povrchu tělesa. Tyto posuvy jsou předem známy z uložení tělesa a posuvů okolních těles<sup>2</sup>. Silové okrajové podmínky vyjadřují rovnováhu mezi vnitřními a vnějšími silami základního tělesa<sup>4</sup>.

## 2 POPIS JEDNOTLIVÝCH METOD

### 2.1 *Implicitní a explicitní MKP*

Explicitní a implicitní metody konečných prvků je v dnešní době stále častěji používanější. Příčinou je rychlý rozvoj výpočetní techniky a potřeby podniků dosáhnout vyšších výsledků za kratší čas a nižší náklady. Největší uplatnění explicitní MKP najdeme například při simulaci crash-testů automobilu nebo také v technologických operacích při výpočtovém modelování<sup>1</sup>.

### 2.2 *Implicitní MKP*

Implicitní metoda konečných prvků tak i explicitní začala v 60. letech 20. století, kdy na vysokých školách vznikaly první naprogramované kódy. První úlohy byly jen 2D a s postupem času a rozvojem techniky se v 70. letech objevují první 3D úlohy. Od té chvíle se naprogramované kódy rozvinuly do komerčních projektů, některé z nich působí na trhu dodnes. Nejznámější a nejpoužívanější jsou ANSYS LS-DYNA, ABAQUS-Implicit a mnoho dalších<sup>6</sup>.

#### 2.2.1 Základní principy implicitní MKP

Implicitní metoda konečných prvků je pro řešení nestacionárního dynamického problému bez tlumení, který je popsán pohybovou rovnicí<sup>2</sup> (2.1).

$$M.\ddot{U}+K.U=F(t) \quad (2.1)$$

kde: M - hmotnostní matice,  
Ü - zrychlení,  
K - matice tuhosti,  
U - matice posuvu,  
F - matice zatížení,

Naším úkolem je určit všechny neznámé veličiny v časovém okamžiku  $t_{n+1}$ , když za určitého předpokladu známe řešení v časových okamžicích  $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$ . Časový krok je  $\Delta t = t_{n+1} - t_n$ . Pohybová rovnice v čase  $t_{n+1}$  má podobu vztahu (2.2)<sup>2</sup>.

$$M.\ddot{U}_{n+1}+K.U_{n+1}=F_{n+1} \quad (2.2)$$

kde: M - hmotnostní matice,  
Ü - zrychlení v čase  $t_{n+1}$ ,  
K - matice tuhosti,  
U - matice posuvu v čase  $t_{n+1}$ ,  
F - matice zatížení v čase  $t_{n+1}$ ,

Ilustrativně se používá metoda do předních diferencí, ale v praxi se používá u implicitních algoritmů Newmarkova metoda<sup>2</sup>.

### 2.2.2 Parametry implicitní MKP

Určitou výhodu pro třídu problému:

- statické a pomalejší dynamické úlohy s mírnějšími nelinearitami typu plasticity
- rovinné a topologicky jednoduché prostorové sítě

Charakter softwaru:

- komplikovanější programy
- komunikace s vnější pamětí

Časový krok:

- větší (typicky 100x, 1000x)

Inverze matic:

- ano

Rovnovážné iterace v rámci kroku:

- ano

Popis kinematiky pohybu v rámci kroku:

- velké rotace

Požadavky na paměť:

- velké<sup>2</sup>

### 2.3 Explicitní MKP

U explicitní metody konečných prvků začal vývoj v 60. letech 20. století, kdy na vysokých školách vznikaly první naprogramované kódy. První úlohy byly jen 2D a s postupem času a techniky se v 70. letech objevují první 3D úlohy. Od té chvíle se naprogramované kódy rozvinuly do komerčních projektů, některé z nich působí na trhu dodnes. Nejznámější a nejpoužívanější jsou ANSYS Ls-Dyna, ABAQUS-Explicit, ADVANTEDGE, DEFORM a mnoho dalších<sup>5</sup>.

#### 2.3.1 Základní principy explicitní MKP

Explicitní metoda byla vyvinuta pro dynamické problémy týkající se deformace těles. Princip explicitní metody konečných prvků vychází ze základní myšlenky metody konečných prvků kódu obecné rovnice pohybu druhého Newtonova zákona, akorát přepsaný do maticové podoby a definovaný v určitém časovém okamžiku<sup>1</sup>, který je popsán ve vztahu (2.3).

$$M.\ddot{U}(t)+C.U(t)+K.U(t)=F(t) \quad (2.3)$$

kde: M	-	hmotnostní matice,
Ü	-	zrychlení,
C	-	matice tlumení,
K	-	matice tuhosti,
U	-	matice posuvu,
F	-	matice zatížení,

Tato rovnice je časově závislá a pro vyřešení je nutná časová integrace. Časovou integraci můžeme provést buď implicitně, nebo explicitně<sup>1</sup>. Implicitní

integrace je použita za pomoci Newmarkovy metody a explicitní metoda s použitím centrálních diferencí<sup>6</sup>.

### 2.3.2 Parametry explicitní MKP

Určité výhody pro třídu problému:

- rychlé dynamické přechodové děje s nelineárním chováním borcení skořepin
- velké prostorové úlohy s komplikovanou strukturou sítě
- není třeba sestavovat matice tuhosti [K]
- rázové zatížení

Charakter softwaru:

- jednoduchý kód
- vše ve vnitřní paměti

Časový krok:

- malý

Inverze matic:

- ne

Rovnovážné iterace v rámci kroku:

- ne

Popis kinematiky pohybu v rámci kroku:

- malé rotace

Požadavky na paměť:

- malé<sup>2</sup>

Sestavení matice tuhosti [K] a její inverze je velice složitá a spotřebuje většinu výpočtového času v implicitních kódech. Všechny nelineární výpočty jsou zahrnuty do vektoru vnitřních sil, které při výpočtech trvají nejdéle. Časová náročnost jednotlivých operací<sup>7</sup> nalezneme (viz tab. 2.1).

Tab. 2.1 Příklad časové náročnosti operací<sup>7</sup>.

Operace	Jednotky	CPU
Inicializace	[%]	0.1
Vnitřní síly	[%]	74
Uzlové operace	[%]	13
Kontakty	[%]	12
Okrajové podmínky	[%]	0.9

### 2.3.3 Kritická hodnota časového kroku

Explicitní časová integrace je podmíněně stabilní. To znamená, že stabilních výsledků můžeme dosáhnout pouze tehdy, pokud časový krok nepřekročí svoji kritickou hodnotu. Ta je definována jako čas, za který čelo napěťové vlny projde přes element<sup>1</sup>. Kritická hodnota časového kroku je spočtena podle vztahu (2.4).

$$t^{crit} = l * \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (2.4)$$

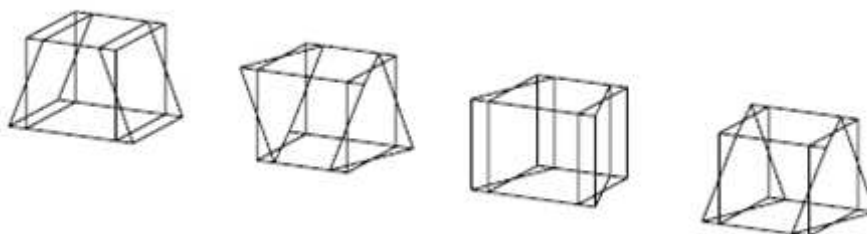
- kde:  $t^{crit}$  [s] - kritická hodnota časového kroku,  
 $l$  [mm] - charakteristický rozměr prvku,  
 $\rho$  [kg.m<sup>-3</sup>] - hustota materiálu,  
 $E$  [N.m<sup>-2</sup>] - modul pružnosti,

Kritická hodnota minimálního časového kroku je závislá na druhé odmocnině hustoty a druhé odmocnině tuhosti materiálu<sup>1</sup>.

Pro urychlení výpočtu při stejné velikosti i počtu elementu za pomoci vložení do výpočtu „nefyzické“ hmoty se používá následující metoda. Tato metoda se nazývá „Mass scaling“, díky které zmenšíme časový krok u výpočtu. Ovšem přidáním takové hmoty do výpočtu u dynamických dějů, může ovlivnit výsledné hodnoty. Toto ovlivnění výsledných hodnot si můžeme dovolit jen v případech malých rychlostí, když kinetická energie soustavy je nižší než vnitřní energie soustavy. Dalším uměle snížením běhu simulace je překročení povolené rychlosti za pomoci deformace nebo rychlosti zatěžování<sup>6</sup>. Faktor, který může dále ovlivnit výpočet, je hustota, u níž se vlivem změny, změní tepelné vlastnosti materiálu. Pokud teplota závisí na ploše plasticity, pak také na mechanických vlastnostech<sup>7</sup>.

### 2.3.4 Jednobodová integrace prvků

V explicitních úlohách se aplikují prvky s jedním Gaussovým (integračním) bodem, které jsou vhodné pro velké deformace sítě. Použití jediného Gaussova bodu je výhodné z důvodu úspory výpočtového času. Nevýhodou aplikace Gaussovým bodem je snížená stabilita oproti více bodové integraci. Deformace začne kolem tohoto integračního prvku (viz obr. 2.1). Tato deformace nemá vliv na vnitřní energii prvku, ale má vliv na geometrii, tedy i na celé těleso. Tento jev se nazývá „hourglassing“. Následující problém vnáší chybu do výsledného výpočtu čistě numericky<sup>7</sup>.



Obr 2.1 Módy s nulovou energií při jednobodové integraci<sup>1</sup>.

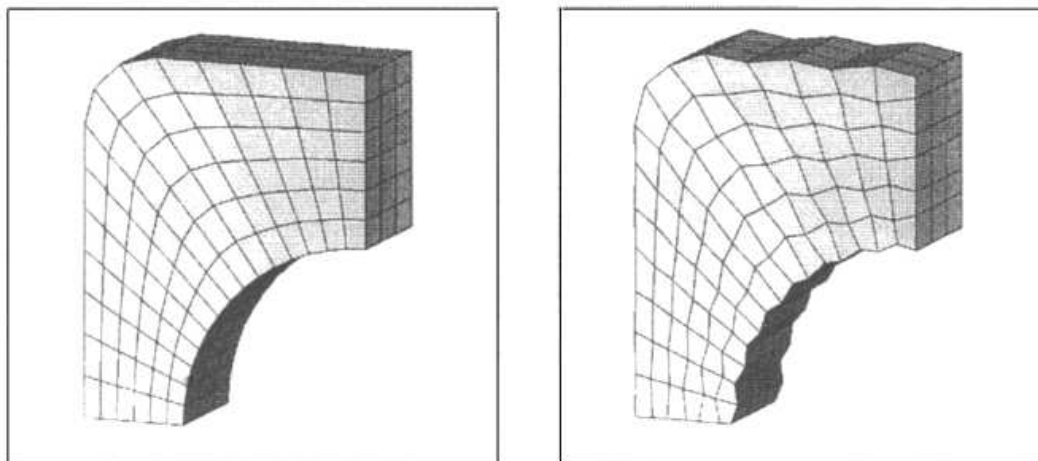
### 2.3.5 Hourglassing

Hourglassing (nestabilní deformace prvků sítě), nebo-li problém „přesýpacích hodin“, se projevuje u prvku s jednobodovou integrací, kde u nulové změny



vnitřní energie a v módech hourglassingu, které mají nulovou tuhost, nastane deformace prvku<sup>1</sup>. Deformace se projevuje na celém tělese nespoutaně a můžou zničit celou simulaci (viz. obr. 2.2). Výskyt hourglassingu ve výpočtech je nežádoucí a měl by být minimalizován. Za hranici se považuje, když energie dosáhne 5% vnitřní energie modelu. Při navrhování konečně prvkového modelu je vhodné brát v potaz hourglassing<sup>8</sup>. Pro zmenšení tohoto jevu se používají následující faktory<sup>7</sup>:

- použití spojitých zatížení, nepoužívat bodová zatížení, která vedou ke vzniku hourglassingu
- zjemnění sítě vede ke zmenšení energie hourglassing, ale zvyšuje výpočtové časy a objemu dat úlohy
- použití plně integrovaných prvků se tomuto problému dá zcela vyhnout, při vícebodové integraci se hourglassing nemůže objevit, ale nastávají problémy uvedené výše
- zvýšení tuhosti modelu, ale jen u nižší rychlosti deformace, např. tváření
- zvýšení viskozity, ale jen u vysokých rychlostech deformace, např. rázové vlny



Obr. 2.2 Deformovaná síť s nezatelným a výrazným hourglassing<sup>7</sup>.

### 2.3.6 Formulace explicitní MKP

Pro správnost výpočtu daného problému je nutné zvolit správnou formulaci modelu sítě konečných prvků. Na výběr jsou čtyři formulace modelů Lagrangeova, Eulerova, ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) a SPH (Smoothed Particle Hydrodynamic)<sup>1</sup>.

#### Formulace Lagrangeova metody

Tato metoda je vhodná pro velké deformace a zkroucení, ale méně vhodná pro plastické deformace se třením a kontaktní okrajové podmínky. Kolísání napětí je zřejmé s velkým napětím. Síť je pevně spojena s obrobkem a je deformována společně. Problémem sítě je narušení obrobku prvkem, je znát v každém elementu obrobku. Výhodou této metody je v simulacích obrábění

vznik třísky při obrábění až po jeho ukončení a ustálení<sup>9</sup>. Tvar třísky a geometrie hranic materiálu nemusí být dopředu známý, ale jsou v průběhu vypočteny jako funkce deformace, parametrů obrábění a materiálových charakteristik. U Lagrangeovy metody je nevýhodou nárůst časového kroku a u velkých zkroucení obrobku ztráta stability. Při srovnání Lagrangeovy metody s Eulerovou je tato metoda výpočetně rychlejší, protože není potřeba vypočítávat přemístění materiálu uvnitř sítě<sup>1</sup>.

### **Formulace Eulerova metody**

Tato metoda je charakteristická tím, že materiál se pohybuje skrz síť a neznámé materiálové proměnné jsou vypočteny v nastaveném místě sítě. V Eulerově metodě je nutné řádně určit materiál a jeho vlastnosti. Síť je nezávislá na zkroucení obrobku a také nejsou potřeba algoritmy pro výpočet nových sítí<sup>1</sup>. Další výhodou je existence více materiálů v jedné síti a velkých deformací materiálu. Jednou z hlavních nevýhod je delší výpočtový čas a nutnost jemné sítě. Tvar třísky je třeba předem definovat při simulaci obrábění, ale další kritéria oddělení třísky nemusí být definována. Metoda Eulerova se nejvíce zabývá problémy v hydrodynamice a aerodynamice<sup>9</sup>.

### **Formulace ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian ) metody**

ALE metoda kombinuje výhody Lagrangeovy a Eulerovy metody potřebnou pro přesnou simulaci tvářecích procesů. Lagrangeova metoda spočívá o přidání výpočetního kroku, kde je nahrazována deformovaná síť sítí novou a výsledky jsou zobrazeny na této nové síti, to je jedna z hlavních výhod této metody, další je možnost dynamické nastavení sítě. Nevýhodou v případech velkých deformací by mohla síť být velmi zkreslena a výpočet se stane nepřesným, nebo dokonce dojde k selhání<sup>9</sup>. Při simulaci obrábění je využita výhoda Eulerovy metody přístupu k modelování okolí špičky nástroje a u Lagrangeovy metody pro modelování tvorby třísky ve volných hranicích. V tomto případě je možné se vyhnout problémům zkroucení obrobku v místě jejich porušení bez použití tvorby nové sítě. Lagrangeova metoda je vhodnější pro pevné mechaniky a Eulerova pro mechaniky tekutin<sup>1</sup>.

### **Formulace SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) metody**

Tato metoda SPH se liší od předešlých zmiňovaných metod tím, že je bez-síťová. Rozdílem je hlavně aplikace rovnic na sousedící částice, nikoli na pevně spojené body v obrobku<sup>10</sup>. V této metodě je dovoleno výpočet velkých deformací a to je zapříčiněno absencí sítě a výpočet působení jednotlivých částic založený na poruše jejich vazeb. SPH metoda je využívána pro výpočty mechaniky tekutin a velké deformace pro tříštivé materiály<sup>1</sup>.

### **3 POPIS JEDNOTLIVÝCH PROGRAMŮ**

#### **3.1 ANSYS**

Program Ansys i stejnojmenná společnost je již na trhu přes 40. let. Ansys vyvíjí, prodává a podporuje inženýrský simulační software, který při návrhu výrobku zjišťuje, jak se bude chovat ve výrobním procesu a v reálném světě. Program nabízí komplexní řešení inženýrských sad a poskytuje přístup k jakékoliv oblasti strojírenství<sup>11</sup>.

##### **3.1.1 Popis programu Ansys**

Program Ansys je velmi přehledný, roletové menu v levé části obsahuje odkazy, které na sebe logicky navazují. V programu je nutné zadat typ prvku, vlastnosti materiálu, vytvořit geometrii, síť a omezení posuvů, zatížení. Výhodou takového postupu je velká úspora času při nečekaných změnách v zadání a znovu vytvoření sítě a zamezení vzniku výsledků, které neodpovídají realitě<sup>13</sup>. Ls-Dyna je integrovaný produkt programu Ansys, ve kterém lze modelovat, získávat explicitní dynamické řešení a výsledek je možné si prohlédnout v prostředí Ansysu nebo programem LsPrePost<sup>13</sup>.

##### **3.1.2 Ls-Dyna**

Ls-Dyna je program pro rychlé dynamické děje využívající Ansys- Workbench pro tvorbu modelu a zpracování výsledků. Ls-Dyna je multifunkční implicitní a explicitní program určený pro analýzy nelineárních fyzikálních dějů spojených s velkými deformacemi, které probíhají v krátkém časovém úseku. Nejznámější aplikací jsou crash simulace, analyticky ověřují bariérové zkoušky dopravních technik. Dalšími aplikacemi jsou simulace tvářecích procesů, jak za studena, tak za tepla<sup>12</sup>.

#### **3.2 ABAQUS**

Program Abaqus je od společnosti Simulia, která poskytuje velkou škálu produktů pro řešení metody konečných prvků. Jedním z hlavních těchto produktů je systém Abaqus FEA, který se dále dělí na Abaqus CAE, Abaqus Standart, Abaqus Explicit a další doplňkové nástroje<sup>14</sup>.

##### **3.2.1 ABAQUS- Explicit**

Abaqus Explicit je určen pro explicitní metodu konečných prvků. Program je vhodný pro simulace krátké přechodné dynamické akce, jako odolnost automobilu proti nárazu a dopad balistické střely. A další schopnost programu zpracovávat nelineární chování, jako válcování horkého plechu a pomalé deformování zařízení pohlcující energii<sup>14</sup>.

##### **3.2.2 Tvorba modelu**

Uživatel má mnoho možností jak vytvořit model pro simulování. Jedna z možností je vytvoření geometrie modelu přímo v Abaqusu. Vývojáři tohoto

programu se spíše zaměřili na import modelu z CAD systémů. Abaqus plně podporuje převádění modelu z různých CAD systémů. Kromě CAD systémů Abaqus podporuje rozhraní z CATIA V4 i V5, SolidWorks a Pro Engineer. Převádění modelů z CAD systémů do Abaquusu je vhodné pro další simulace modelu. Hlavním nárokem převodu je převod bez deformace modelu a ztráty dalších doplňujících parametrů potřebné pro simulaci<sup>15</sup>.

### 3.2.3 Tvorba sítě konečných prvků

Abaqus poskytuje kompletní prostředí pro tvorbu sítě a celou řadu přístupů k zjednodušení a urychlení vytvoření sítě. Příkladem je užitečná typologie sady nástrojů, které mohou být použity k vytvoření přesné a čisté sítě konečných prvků na převedeném modelu z CAD systémů. Další technikou na vytvoření sítě je použití hexadecimálních prvků a to rychle na celý model<sup>15</sup>.

### 3.2.4 Knihovna materiálů

Zvyšování nároků na životní prostředí nutí návrháře pro lehčí a efektivnější materiály. Abaqus poskytuje rozsáhlou knihovnu materiálů pro modely, které mohou být použity k realistické simulaci chování moderních materiálů. Na výběr jsou třeba homogenní materiály pro masivní či skořepinové modely. Abaqus po nastavení dokáže rozlišit i vznik trhlinky bodového sváru i lepeného spoje, čímž je zapříčiněno poškození či porušení modelu. Program poskytuje obecné soustavy materiálů pro modelování postupného poškození, které může pomoci předvídat následné selhání, které umožňuje výrobcům vyrábět bezpečnější návrhy a vyhnout se nákladným prototypům<sup>16</sup>.

### 3.2.5 Zadávání podmínek zatížení

V Abaquusu se musejí zadávat zatížení a okrajové podmínky pro definování konkrétních podmínek zatížení. Nastavit lze použití jedné nebo více případů statických zatížení nebo ustálené dynamické. Můžeme definovat zatížení přímo z hlediska zatížení a okrajových podmínek, nebo v podobě kombinace dříve definovaných zatížení. K dispozici jsou například následující podmínky: posunutí, souměrnost, definice vnitřního tlaku, rychlost daného bodu na modelu<sup>16</sup>.

### 3.2.6 Výsledky simulace

Po zadání podmínek zatěžování se ve výsledku zobrazí model a jeho struktura sítě, jestli se model zdeformoval nebo vydržel předepsané zatěžování. Součástí tohoto programu je sada vizualizačních možností a pomáhá uživateli interpretovat a zhodnocovat výsledky analýzy. Velké složité modely mohou být zobrazeny velikou škálou možností, včetně vrstevnice a řezu v rovině XY. Výsledné simulace mohou být převedeny do různých formátů včetně obrázků, zpráv a animace. Abaqus poskytuje jedinečné vizualizace a vykreslování, které nejsou dostupné v jiných podobných produktech<sup>15</sup>.

### **3.3 DEFORM**

Scientific Forming Technologies Corporation byla založena v roce 1991 v Ohio. Software Deform je jedním z nejpoužívanějších u metod konečných prvků. Deform je strojírenský software, který umožňuje návrhářům analyzovat tváření a tepelná zpracování<sup>17</sup>.

#### **3.3.1 Volba parametrů nástroje**

V Programu Deform se z knihovny definuje určitý nástroj a definuje si parametry ostří. U nástroje se určí materiál, ze kterého je nástroj vyroben, nebo může být případně ještě povlakován. Jednou z hlavních vlastností je vygenerování sítě, kde si v nabídce zvolí hustotu sítě, uzlové okrajové podmínky a vzájemné působení obrobku na nástroj. Dalším krokem jsou tepelné mezní podmínky, kde program generuje výměnu tepla s okolím<sup>18</sup>.

#### **3.3.2 Volba parametrů obrobku**

Obrobek se může buď najít v knihovně a různými úpravami parametrů nadefinovat podle konkrétního příkladu, nebo navrhne obrobek pomocí menu a dokončíme dle parametru zadání. Nastavení obrobku je stejné jako u nastavení nástroje, nejdříve definujeme materiál obrobku, pak vygenerování sítě a na konec nastavíme okrajové podmínky<sup>18</sup>.

#### **3.3.3 Simulace**

Po vygenerování nástroje a obrobku nastavíme výchozí polohu vůči sobě pro simulaci deformace třísky. Pro zobrazení řezného procesu jako simulace musíme nastavit délku řezu, počáteční a konečné body na povrchu obrobku. Po nastavení všech potřebných parametrů můžeme spustit přímo simulaci řezu, kde si nastavíme potřebné údaje, které chceme, aby nám vyhodnotil program Deform<sup>18</sup>.

#### **3.3.4 Výsledky simulace**

Jakmile proběhne simulace řezu nástroje obrobkem a deformace třísky, zadá se už jen příkaz pro generování výstupních hodnot. Deform je velmi užitečný program v různorodých typech simulací<sup>18</sup>.

### **3.4 ADVANTEDGE**

AdvantEdge vyvinula společnost ThirdWave, jež sídlí v Minneapolis. AdvantEdge MKP je software CAE, který řeší optimalizaci obrábění kovů umožňující uživatelům analyzovat obrábění ve 2D a 3D prostředí. Program je používán pro ty, kteří chtějí zlepšit kvalitu nástrojů, prodloužení životnosti nástroje atd. Program je cenným zdrojem při navrhování drážkování, frézování, vrtání, řezání a soustružení<sup>19</sup>.

### 3.4.1 Tvorba modelu

Uživatelé AdvantEdge jsou schopni snadno importovat model z CAD software pro rychlejší a přesnější výsledky. Importovaná rozhraní mohou AdvantEdge využívat pro analýzu široké škály souborů, a to: STL, STEP, VRML, DXF atd. Program má zabudovaný také editor pro jednoduché nástroje a obrobky. AdvantEdge má také velmi rozsáhlou knihovnu materiálu s modely mnoha strojírenských kovů a slitin. AdvantEdge užívá také adaptivní tvorbu sítě, která v oblasti vysokých deformací zvětší přesnost řešení<sup>19</sup>.

### 3.4.2 Simulace

Před samotným spuštěním simulace nastavíme ještě samotné vstupní řezné podmínky teploty a napětí, abychom mohli předvídat opotřebení nástroje a jeho chování. Pro simulování je dobré používat výkonný počítač z důvodu dlouhých a náročných výpočtů<sup>19</sup>.

### 3.4.3 Výsledek simulace

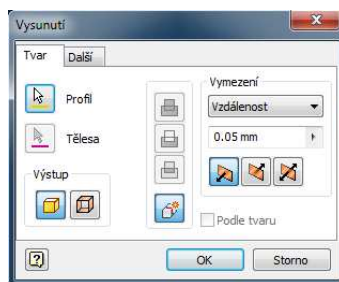
Pro simulaci pohybu nástroje a obrobku porovnáme výsledků simulace pro různé řezné podmínky nebo geometrie nástroje abychom našli optimální výsledky. Ačkoliv AdvantEdge nenabízí pro uživatele mnoho jednoduchých ovládacích prvků, má velmi jednoduché rozhraní a umožňuje při simulaci procesů obrábění rychle nastavení<sup>19</sup>.

## 4 VZOROVÝ VÝPOČET PRO ORTOGONÁLNÍ OBRÁBĚNÍ

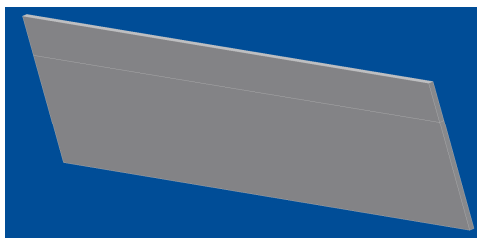
Vzorový výpočet provedeme v programu Ls-Dyna, který je součástí Ansysu. Další součástí Ansysu je program Workbench, kde nastavíme základní parametry pro tento výpočet. Nejdříve, ale vytvoříme součásti v programu Autodesk Inventor 2010.

### 4.1 Vytvoření součásti

Po otevření Inventoru v záložkách hlavního menu dáme *Nový*, kde nám vyjede nabídka, a my zvolíme *Součást*. Po zvolení nám naběhne okno s názvem *Náčrt*, kde si nakreslíme první součást a to obrobek (viz. obr. 4.2). Nejprve si nakreslíme obdélník o požadovaných rozměrech pro náš příklad. Po dokončení náčrtu zmáčkneme *Dokončit náčrt* a posledním krokem u součásti obrobek už jen stiskneme *Vysunutí* (viz. obr. 4.1). U vysunutí součásti nastavíme tloušťku a směr vysunutí.



Obr. 4.1 Vysunutí.



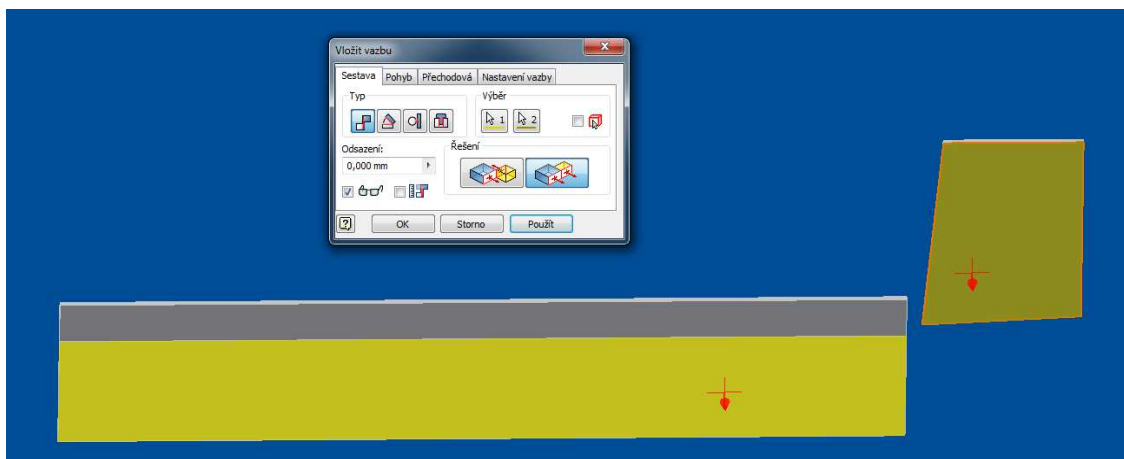
Obr. 4.2 Součást- obrobek.

Druhou součástí je část soustružnického nože (viz. obr. 4.3). Stejným způsobem vytvoříme náčrt i vysunutí součásti.



Obr. 4.3 Součást- Soustružnický nůž.

Po dokončení obou součástí dáme *Nový*, kde nám vyjede nabídka, a my zvolíme *Sestava*. V sestavě stiskneme *Umístit*, kde otevřeme obě součásti a vložíme do sestavy. Posledním krokem pro další použití v programu Workbench je vytvoření vazeb součástí vůči vlastnímu pohybu. Stiskneme *Omezit* a v něm nastavíme plochy buď ve stejném směru (viz. obr. 4.4), nebo proti sobě a vybereme součásti. Vytvoříme vazby tak aby se nám součásti pohybovali vůči sobě jen ve směru osy x.

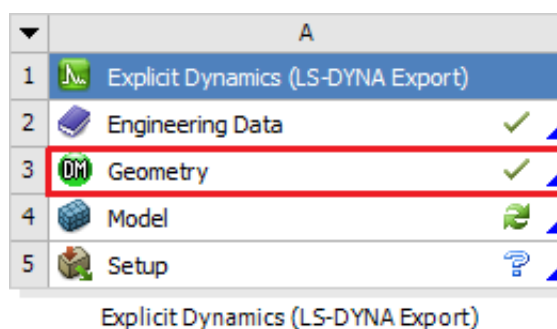


Obr. 4.4 Vytvoření vazeb u součástí.

Posledním co uděláme v programu Inventor, je stisknout *Exportovat – Formát CAD* a uložit do formátu s koncovkou *.igs*.

#### 4.2 Načtení geometrii součástí

V prostředí Workbench kde jsme si otevřely *Explicit Dynamics (LS-DYNA Export)* tentokrát stiskly *Geometry* (viz. obr. 4.5). Otevře se nám nové okno *A: Explicit Dynamics (LS-DYNA Export) – DesignModeler*. V tomto okně, v hlavním menu stiskneme *File – Import External Geometry File* kde otevřeme exportovaný soubor s koncovkou *.igs*, který jsme před tím vytvořily v Autodesk Inventor 2010. Po načtení součástí do *Geometry*, okno zavřeme a v pod menu u ikony *Geometry* se nám ukáže zelená fajfka.

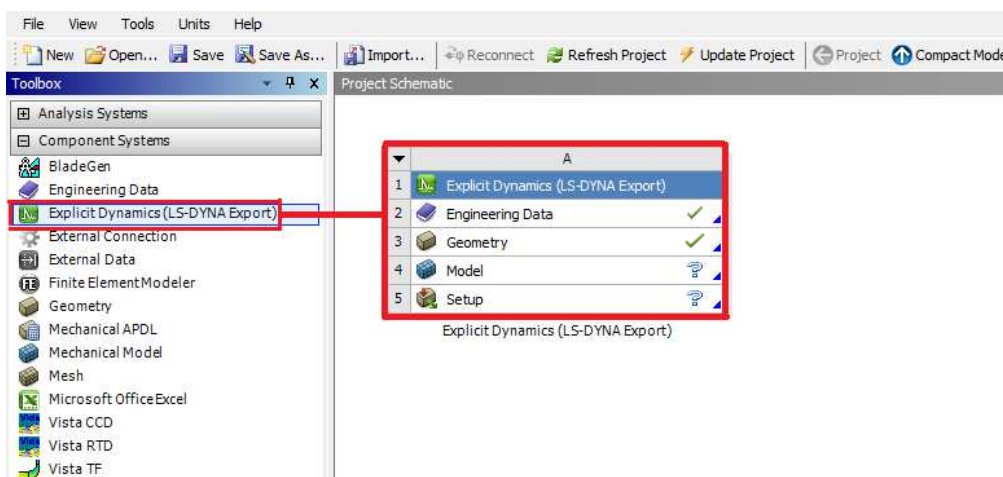


Obr. 4.5 Načtení geometrii součástí.



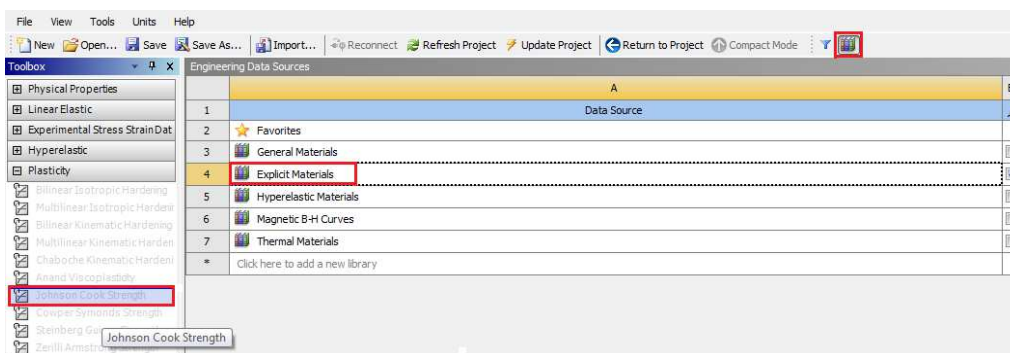
### 4.2.1 Načtení materiálu

Určení materiálu už proběhne v programu Workbench, proto tento program otevřeme, kde v levé liště nástrojů *Component Systems* stiskneme *Explicit Dynamics (LS-DYNA Export)*. Do *Project Schematic* se nám otevře menší menu o pěti podpoložkách (viz. obr. 4.6).



Obr. 4.6 Otevření *Explicit Dynamics (LS-DYNA Export)*.

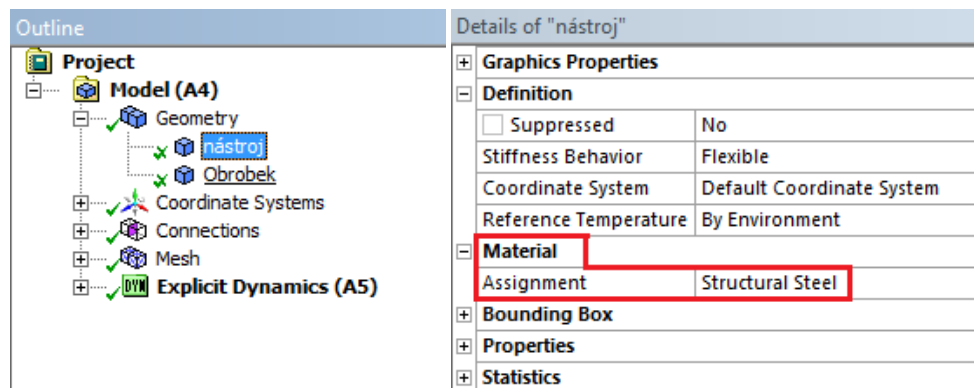
Dalším krokem pro otevření knihovny materiálů a tím určení materiálu pro součásti je stisknutím *Engineering Data* a další tlačítko *Engineering Data Sources*. Po otevření tabulky s materiály, které jsou rozděleny podle základních vlastností, vybereme *Explicit Materials* (viz. obr. 4.7) a po stisknutí nám v levé části hlavní nabídky pod názvem *Toolbox* vyjede tabulka, už se samotnými materiály. Tyto materiály uvádím v příloze. Pro náš výpočet zvolíme materiál plastický a to *Johnson Cook strength*, který použijeme pro nástroj i obrobek.



Obr. 4.7 Otevření knihovny materiálů určení materiálu.

Jak si definujeme materiál pro součásti, stačí už jen přiřadit k samotnému nástroji a obrobku. V nabídce stejně jako *Engineering Data* je položka *Model*, kterou stiskneme a otevře se nám nové okno s názvem *A: Explicit Dynamics (LS-DYNA Export) – Mechanical [ANSYS Multiphysics/LS-DYNA]*, kde máme načtený součásti. V hlavním přehledu postupu *Outline* stiskneme *Geometry* a označíme první součást. V okně *Details* u *Material* vybereme

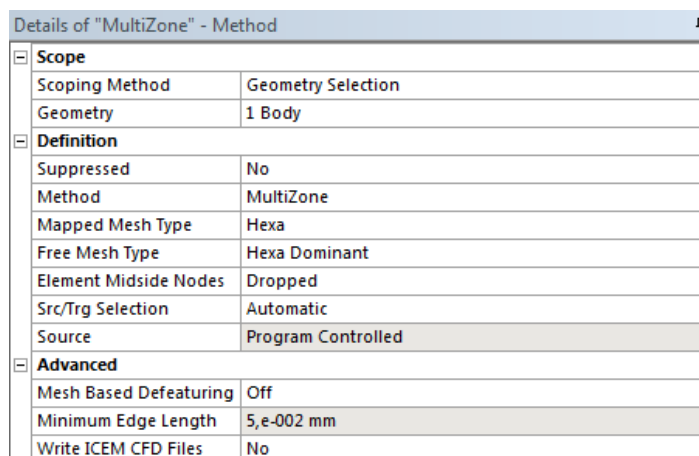
z nabídky, kde místo předem definovaného materiálu *Structural Steel* vybereme *Johnson Cook Strength* (viz. obr. 4.8).



Obr. 4.8 Přiřazení materiálu součástím.

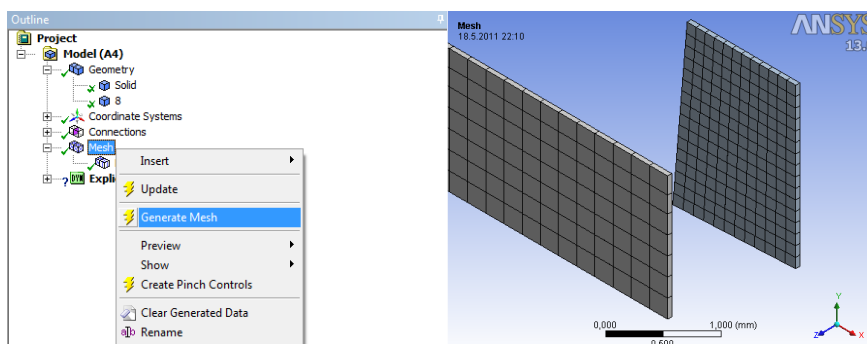
### 4.3 Vytvoření sítě

Další ikonou v pod menu je *Model*, který také stiskneme. Otevře se nám nové okno s názvem *A: Explicit Dynamics (LS-DYNA Export) – Mechanical [ANSYS Multiphysics/LS-DYNA]*, kde máme načtený součásti. Prvním krokem pro vytvoření sítě, stiskneme tlačítko *Body* v hlavní liště nástrojů. Vybereme součást a klikneme pravým tlačítkem myši, kde se nám rozvine nabídka a my zmáčkneme *Insert – Method*. V okně *Details* u *method* zvolíme *MultiZone* (viz. obr. 4.9), u *Free Mesh Type – Hexa Dominant* a u *Element Midside Nodes – Dropped* a ostatní záložky zůstávají bez změny.



Obr. 4.9 Nastavení více zónové sítě.

Po nastavení více zónové sítě zbývá stisknout pravým tlačítkem myši v hlavním přehledu postupu výpočtu na záložku *Mesh* a stisknout *Generate Mesh* (viz. obr. 4.10).



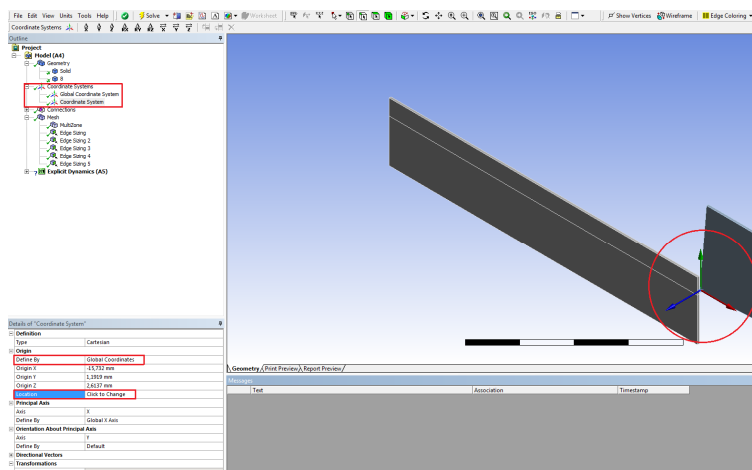
Obr. 4.10 Vygenerování sítě.

### 4.3.1 Zhuštění sítě u obrobku

Tímto postupem jsme vygenerovaly síť. Pro naše zadání ale hustota sítě nevyhovuje, tak síť zhušíme. Nejprve stiskneme tlačítko *Edge* v hlavní liště nástrojů, to nám místo celého těla vybere jen hranu, u které budeme zhušťovat síť. Vybereme hranu součásti a klikneme pravým tlačítkem myši, kde se nám rozvine nabídka a my zmáčkneme *Insert – Sizing*. V okně *Details* u *Element Size* dáme požadovanou velikost sítě. Po nastavení požadované hustoty sítě zbývá stisknout pravým tlačítkem myši v hlavním přehledu postupu příkladu na záložku *Mesh* a stisknout *Generate Mesh*. Tímto postupem označování hran si nastavíme síť podle požadavku.

### 4.3.2 Zhuštění sítě u nástroje

Pro nástroj síť můžeme udělat stejným způsobem jako výše pro obrobek. Jinak síť vytvoříme podle následujícího postupu. Nejprve si musíme zadat počátek souřadného systému do špičky nástroje. V hlavním přehledu postupu stiskneme pravým tlačítkem myši *Coordinate Systems* a v nabídce dáme *Insert - Coordinate Systems*. V okně *Details* u *Define By* zvolím *Global Coordinates* a u *Location* kliknu na hranu na ostří nástroje a potvrdím *apply* a souřadný systém máme ve špičce nástroje (viz. obr. 4.11).



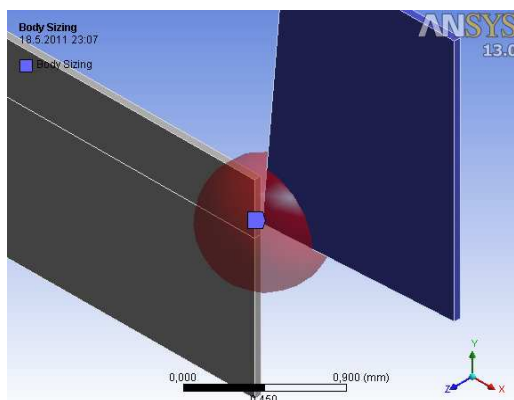
Obr. 4.11 Přenesení souřadného systému do špičky nástroje.

Stiskneme tlačítko *Body* v hlavní liště nástrojů. Vybereme nástroj a klikneme pravým tlačítkem myši, kde se nám rozvine nabídka a my zmáčkneme *Insert – Sizing*. V okně *Details* u *Type* zvolíme *Sphere of Influence* a u *Sphere Center* zvolíme *Coordinate System* a u *Sphere Radius* (viz. obr. 4.13) a *Element Size* zvolím hodnoty dle zadání (viz. obr. 4.12).

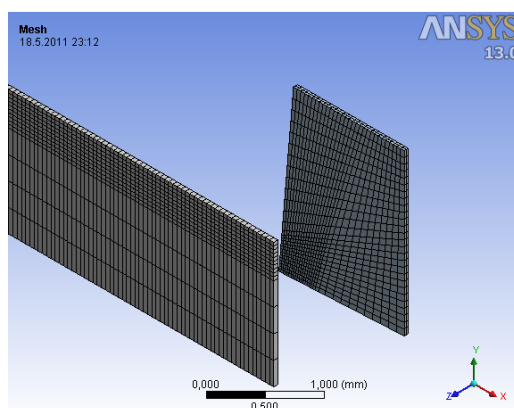
Details of "Body Sizing" - Sizing	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
[-] Definition	
Suppressed	No
Type	Sphere of Influence
Sphere Center	Coordinate System
<input type="checkbox"/> Sphere Radius	0,4 mm
<input type="checkbox"/> Element Size	2,e-002 mm

Obr. 4.12 Detail pro nastavení hustoty sítě ve špičce nástroje.

Po nastavení požadované hustoty sítě (viz. obr. 4.14) zbývá stisknout pravým tlačítkem myši v hlavním přehledu postupu příkladu na záložku *Mesh* a stisknout *Generate Mesh*.



Obr. 4.13 Velikost zhuštění na špičce nástroje.



Obr. 4.14 Výsledná síť součástí.

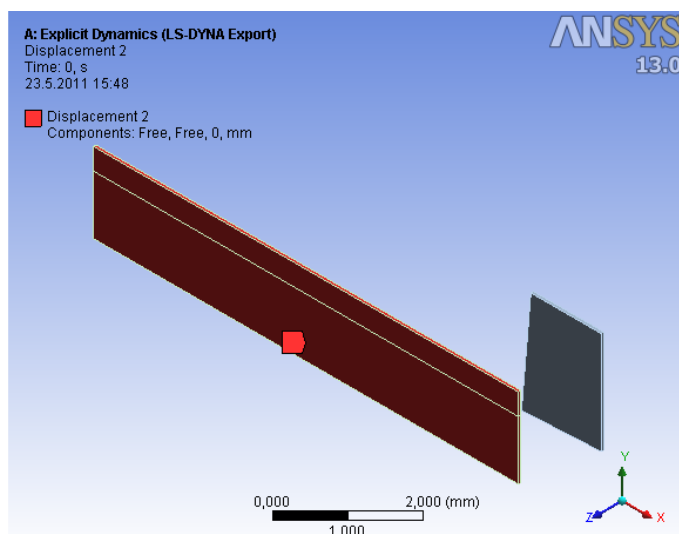
#### 4.4 Přiřazení vazeb

Přiřazení vazeb i posuvů se dělá ve stejném okně jako vytvoření sítě. Nejprve v hlavní liště nástrojů stiskneme *Support – Displacement*. Vybereme plochy, které se nebudou moc pohybovat ve všech třech osách. V okně *Details* u *X Component*, *Y Component*, *Z Component*, nastavíme nulu (viz. obr. 4.15), aby se obrobek nepohyboval do žádného směru.

Details of "Displacement"	
<input type="checkbox"/> Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	3 Faces
<input type="checkbox"/> Definition	
Type	Displacement
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
<input type="checkbox"/> X Component	0, mm (ramped)
<input type="checkbox"/> Y Component	0, mm (ramped)
<input type="checkbox"/> Z Component	0, mm (ramped)
Suppressed	No

Obr. 4.15 Nastavení vazeb obrobku.

Stejným postupem nastavíme zbylou část obrobku (viz. obr. 4.16), jen s rozdílem že u *X Component*, *Y Component* ponecháme *Free* (volný) a *Z Component* nastavíme nulu.



Obr. 4.16 Vybrání potřebných ploch pro vazbu.

Poslední vazbou, kterou provedeme, je vazba nástroje. Stejným postupem si vybereme všechny plochy nástroje a v okně *Details* u *X Component* necháme *Free* nastavení, *Y Component* a *Z Component* nastavíme nulu.

#### 4.5 Přiřazení posuvu

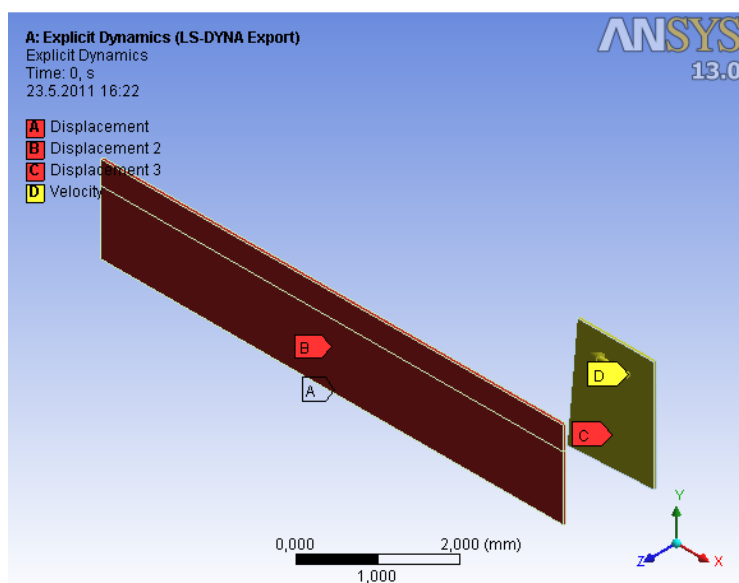
V našem vzorovém výpočtu nastavujeme posuv nástroje, a to jen ve směru osy X. Nastavení posuvu se děje ve stejném okně jako při vytvoření sítě konečných prvků. Nejprve v hlavní liště nástrojů stiskneme *Support – Velocity* a vybereme nástroj, jako člen který se bude moct posouvat v ose X. V okně

*Details* u *X Component* nastavíme podle zadání rychlost posuvu 56 mm/s a *Y Component*, *Z Component* nastavíme 0 mm/s a tím zabránili posuvu v těchto směrech (viz. obr. 4.17).

Details of "Velocity"	
<input checked="" type="checkbox"/> <b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
<input checked="" type="checkbox"/> <b>Definition</b>	
Type	Velocity
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
<input type="checkbox"/> X Component	-56, mm/s (step applied)
<input type="checkbox"/> Y Component	0, mm/s (step applied)
<input type="checkbox"/> Z Component	0, mm/s (step applied)
Suppressed	No

Obr. 4.17 Směr a velikost posuvu.

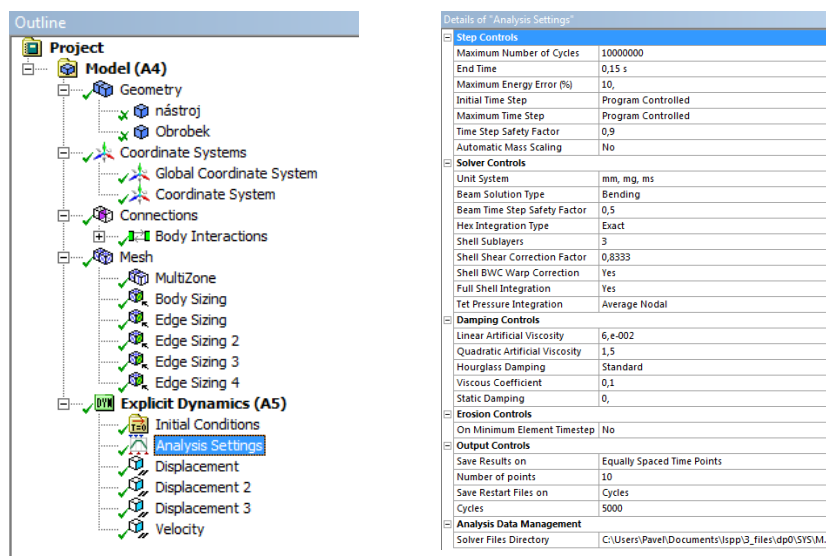
Po nastavení vazeb i posuvu (viz. obr. 4.18), zbývá už jen potvrdit tyto hodnoty tím, že stiskneme pravým tlačítkem myši na *Explicit Dynamics (A5)* a dáme *Solve*.



Obr. 4.18 Součásti s vazbami a posuvem.

#### 4.6 Nastavení parametrů výpočtu

Poslední částí, kterou budeme v programu Workbench dělat, je nastavení parametrů pro vzorový výpočet (viz. obr. 4.19). V hlavním přehledu postupu výpočtu, stiskneme *Analysis Settings*. V okně *Details*, jako hlavní prvky pro výpočet je potřeba nastavit *End Time*, který jsme si před tím spočítaly z délky obrobku a rychlosti posuvu nástroje. Ostatní hodnoty, ponecháme v základním nastavení jako např.: základní jednotky- mm, mg, ms, Hourglass- Standart, atd.

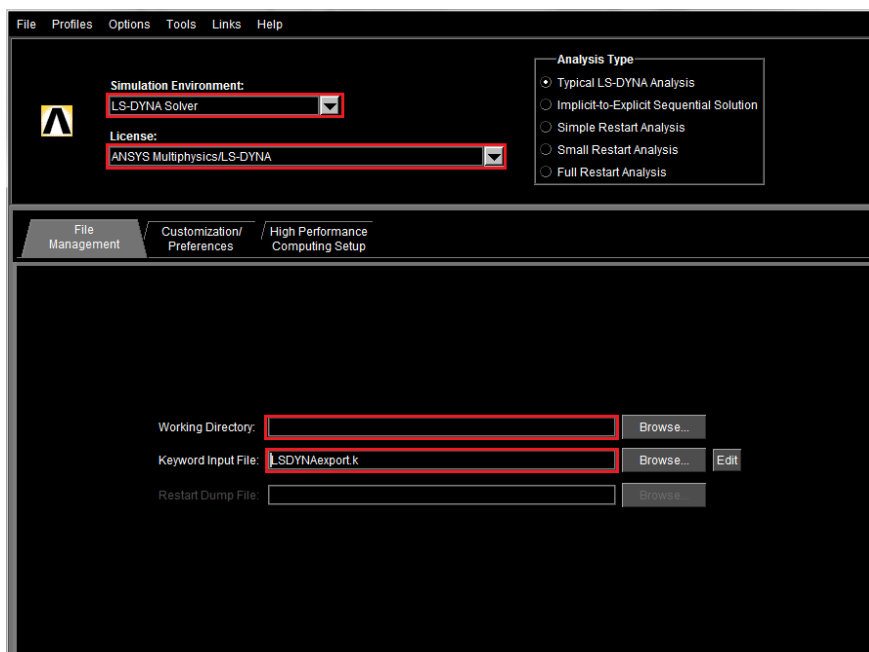


Obr. 4.19 Hlavní přehled postupu výpočtu a parametry výpočtu.

Pro dokončení výpočtu v programu Workbench stiskneme pravým tlačítkem myši na *Explicit Dynamics (A5)* a dáme *Solve*. A už stačí jen uložit do požadovaného souboru.

#### 4.7 Spuštění výpočtu

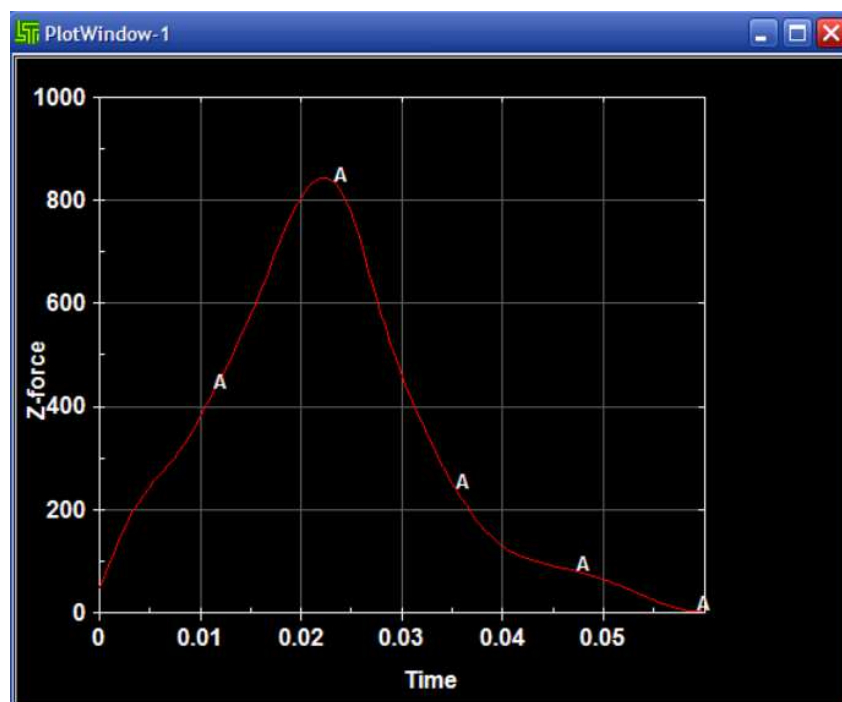
Součástí instalace Ansysu je i Mechanical APDL Product Launcher (viz. obr. 4.20), který spustíme a nastavíme v něm *Simulation Environment – LS-DYNA Solver*, *License – ANSYS Multiphysics/LS-DYNA*, *Working Directory – místo kde nám program uloží výsledky*, *Keyword Input File – místo načtení výpočtu souboru .k*. Po nastavení těchto vlastností stiskneme *Run* v dolní liště.



Obr. 4.20 Ansys Ls-Dyna Solver.

#### 4.8 Výsledky výpočtu

Výsledky výpočtu, které nám Ls-Dyna vygeneruje do předem určeného souboru, si spustíme v programu LS-PrePost. V programu Ls-PrePost lze zobrazovat výsledky jako grafy zatížení na časový úsek (viz. obr. 4.21), posun na časový úsek, síla na posun atd. Kde si nastavíme souřadnice, jednotky, popis os a typ grafu. Další formou výsledků lze vytvořit filmové formáty, kde třeba vidíme deformace autu při crash-testech. A jedny z nejhlavnějších výsledků je přetvoření dle Von Mises, kde vidíme barevně průběh zatížení na určité těleso v určitém kroku, který potřebujeme vyhodnotit (viz. Obr. 4.23).



Obr. 4.21 Graf zatížení na časový úsek.

##### 4.8.1 LS-PrePost

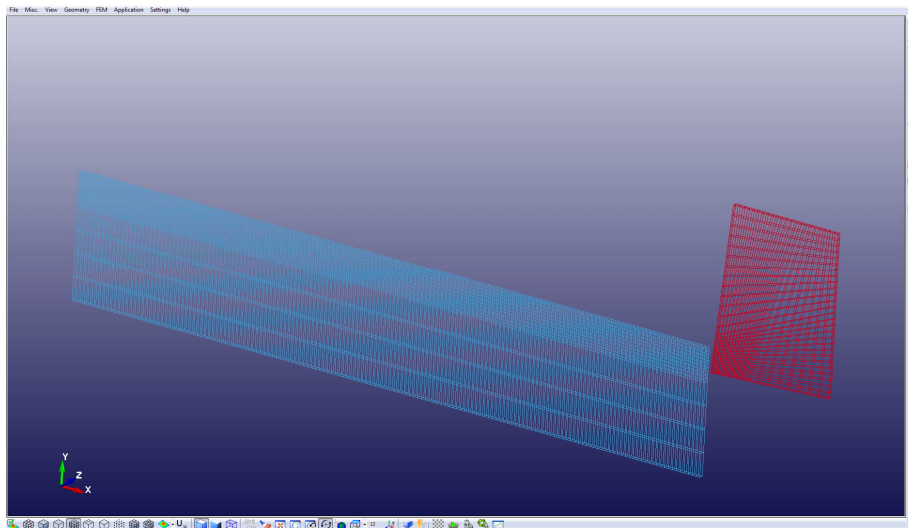
LS-PrePost je moderní interaktivní program pro zpracování výsledků z LS-DYNA analýzy s názvem Post-processing a i vytvoření samotného modelu v Ls-PrePostu pod názvem Pre-processing. Uživatelské rozhraní je intuitivní a snadné použití. Všechna data a menu jsou navrženy logicky a efektivním způsobem. LS-PrePost využívající OpenGL grafiku standard pro dosažení rychlého vykreslování a XY vykreslování<sup>20</sup>.

##### 4.8.2 Zobrazení výsledku v LS-PrePost

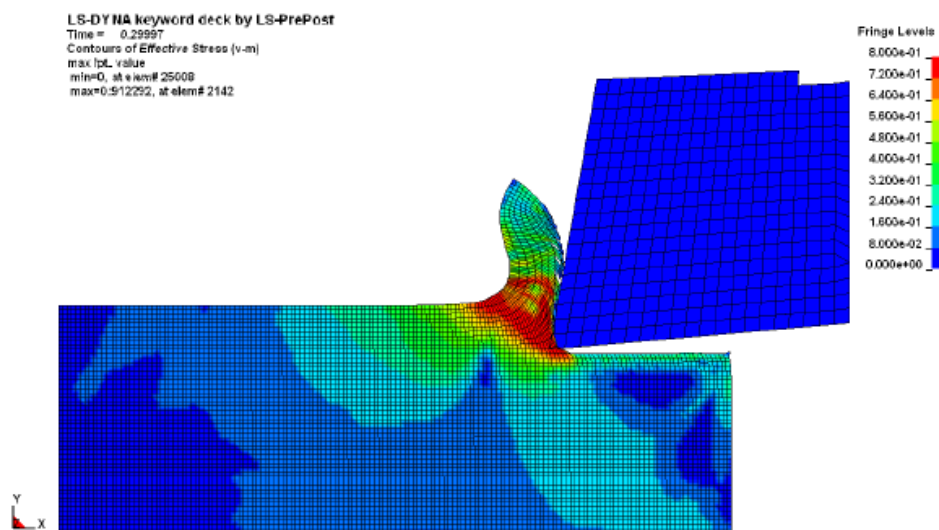
V našem vzorovém výpočtu pro ortogonální obrábění, se výsledky zobrazí v programu LS-PrePost. Výpočet je modelován ve Workbench a spočten v Ls-Dyna proto využijem tzv. Post-processing. Post-processing obnáší otevření souboru s názvem d3plot, kde se nám hned načte obě součásti, jak obrobek, tak nástroj (viz. obr. 4.22). V LS-PrePostu lze prohlížet video sekvenci



s pohybem nástroje do obrobku a samotné deformace třísky. (viz. Obr. 4.23) Máme přetvoření třísky dle Von Mises. Další výsledky, které v programu lze prohlížet jsou různé diagramy<sup>20</sup> (viz Kapitola 4.8).



Obr. 4.22 Zobrazení obrobku a nástroje v LS-PrePost.



Obr. 4.23 Přetvoření třísky dle Von Mises<sup>1</sup>.

## ZÁVĚR

V této práci je obecně popsána metoda konečných prvků od prvních zmínek této metody, matematicky základ a obecný princip. Nadále je popsáno rozdělení MKP a programy které s metodou souvisejí. Posledním bodem práce je výpočet. Výpočet je tvořen modelem, který byl narýsován v programu Inventor 2010, a pak dále exportován do Ansysy Workbench. V programu Ansys jsme přiřadili modelu materiál s vlastnosti Johnson Cook, na modelu byla vytvořena síť konečných prvků o velikosti elementu dvou setin milimetru. Dalším důležitým krokem jsme zamezily pohyb úplně v ose z a v ose x jsme nechaly posun nástroje do obrobku, kde jsme nastavily rychlost posunu nástroje 56 mm/s. Po dokončení zadávání vlastností pro výpočet byl proveden samotný výpočet v programu Ls-Dyna a výsledek zobrazen v Ls-PrePost.

Metoda konečných prvků ať jen metoda, nebo celý vědní obor, je poměrně rozšířena a některé vědní obory si bez ní nelze ani představit. Mnoho pomůcek, nástrojů či součástí používaných ve všedním životě by byla o dosti dražší či nešla vyrobit. Důvodem je, že v dnešní době existují specializované programy, které nasimulují ať už součásti nebo nástroje v reálném prostředí, a tím dají výrobcí informace o bezpečnosti, životnosti, výrobě a řadu dalších užitečných informací o produktu. Tím také ušetří výrobcí značnou částku peněz a nemusí vyrábět produkty metodou pokus, omyl. Velikou výhodou je u metody konečných prvků jednoznačně softwarová dostupnost, kdy jsme schopni za pomoci jednoho počítačového programu (Ansys) řešit celou řadu problémů v různých vědních oborech. Hlavním kritériem u simulování je hustota sítě, to nám zvýší výpočtový čas, ale zase vygeneruje podrobnější výsledky.

Metoda konečných prvků podstatnou částí zasahuje do oboru obrábění, kde má největší zásluhy na vývoji nástrojů, stanovení optimálních řezných podmínek, stabilitě obrábění, atd. MKP pomáhá vyvíjet nástroje, kde odbourává zdoluhavé vývojové procesy, tím šetří čas a peníze. V CAD programu vymodelujeme nástroj tak aby při procesu obrábění měl co nejlepší výsledky z hlediska obrobené plochy, životnosti nástroje, řezných podmínek, atd. Dalším faktorem je přiřazení materiálu dle aktuální nabídky materiálů na trhu, popř. úprava už nadefinovaného materiálu. Po dokončení návrhu nástroje vymodelujeme i obrobek abychom mohli řezný proces odsimulovat v pracovní činnosti. Stejně jak pro nástroj, tak i pro obrobek přiřazujeme materiál, abychom věděly, jak se chová nástroj při obrábění různých materiálů. Po stanovení řezných podmínek a dokončení simulace obrábění se dá usoudit, jak by se vymodelovaný nástroj choval v reálných podmínkách. Tudíž z výsledku simulace se dají předvídat optimální řezné podmínky, pro splnění parametrů trvanlivosti, kvality obrobené plochy, silového působení v nástroji, atd.

K sepsání této bakalářské práce mě vedlo nadšení pro různé výpočetní programy a informace kolem problematiky tohoto tématu. Při psaní této práce jsem se seznámil blíže s Ansys Workbench a určitě bych chtěl dále rozvíjet své schopnosti v tomto programu.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

1. MADAJ, M., PÍŠKA, M., ZOUHAR, J. *Moderní metody konstruování řezných nástrojů pomocí systému CAD/CAM/CAE*. [online]. Ústav strojírenské technologie. Brno, 2009. 85 s. [vid. 12. Března 2011]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/madaj/FRVS2009/index.html>
2. PETRUŠKA, J. *Počítačové metody mechaniky II*. VUT-FSI, Ústav mechaniky těles. Brno, 2003. 96 s. [vid. 15. Března 2011]. Dostupné z: <http://www.umt.fme.vutbr.cz>
3. ZIENKIEWICZ, O., C., TAYLOR, R., L., ZHU, J., Z. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. Sixth edition. Oxford. Elsevier. 2005. 802 p. ISBN 0 7506 6320 0. [vid. 15. Března 2011].
4. JANÍČEK, P., ONDRÁČEK, E., VRBKA, J. *Mechanika těles: Pružnost a pevnost I*. VUT-FSI, Fakulta strojní. Nakladatelství VUT Brno. Brno, 1992. 287 s. [vid. 23. Března 2011].
5. NG, E., ASPINWALL, D., K. *Modelling of hard part machining*. Journal of Materials processing technology. Elsevier. Birmingham, 2002. 8 p. [vid. 29. Března 2011].
6. HAREWOOD, F.,J., MCHUGH, P.,E. *Comparison of the implicit and explicit finite element methods using crystal plasticity*. Science direct. Elsevier. Ireland, 2007. 14 p. [vid. 3. Dubna 2011].
7. BOŘKOVEC, J., SUCHÁNEK, M. *Výpočtové modely tvárného porušování kovu v simulaci technologických procesů*. VUT-FSI, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Brno, 2006. 34 s. [vid. 9. Dubna 2011].
8. BARGE, M., HAMDÍ, H., RECH, J. *Numerical modelling of orthogonal cutting: influence of numerical parameters*. Journal of Materials processing technology. Elsevier France, 2005. 1153 p. [vid. 23. Dubna 2011].
9. GADALA, M., S., WANG, J., A. *Practical Procedure for Mesh Motion in Arbitrary Lagrangian- Eulerian Method*. Engineering with computer. Verlag. London, 1998. 12 p. [vid. 24. Dubna 2011].
10. CALAMAZ, M., et al. *Toward a better understanding of tool wear effect through a comparison between experiments and SPH numerical modelling of machining hard materials*. Journal of Refractory Metals & Hard Materials. Journal of refractory metals & hard materials. Elsevier. France, 2009. 27 p. 595-605. [vid. 29. Dubna 2011].
11. Ansys, Inc. Ansys [online]. O společnosti Ansys. [vid. 9. Května 2011]. Dostupné z: <http://www.ansys.com/About+ANSYS>
12. Ansys, Inc. SYS FEM [online]. LS-DYNA. [vid. 9. Května 2011]. Dostupné z: <http://www.svsfem.cz/content/ansys-ls-dyna>
13. HALLQUIST, J., O. *LS-DYNA : Theory manual*. Livermore software technology corporation. California, 2006. 680 p. [vid. 9. Května 2011].
14. *Simulia*. Vlastnosti Abaqusu [online]. Abaqus- Explicit. [vid. 10. Května 2011]. Dostupné z: [http://www.simulia.com/products/abaqus\\_explicit.html](http://www.simulia.com/products/abaqus_explicit.html)

15. Simulia. *Abaqus Unified FEA: Complete Solution for Realistic Simulation*. USA, 2010. 6 p. [vid. 10. Května 2011].
16. Simulia. *Abaqus/CAE : User manual*. USA, 2004. 805 p. [vid. 10. Května 2011].
17. *Scientific Forming Technologies Corporation*. Deform [online]. Popis programu Deform. [vid. 11. Května 2011]. Dostupné z: <http://www.deform.com/>
18. *2D machining (cutting) lab*. *Scientific Forming Technologies Corporation*. USA, 2004. 20 p. [vid. 13. Května 2011].
19. *Third Wave Systems*. *AdvantEdge* [online]. Funkce programu AdventEdge. [vid. 13. Května 2011]. Dostupné z: [http://www.thirdwavesys.com/products/advantedge\\_fem.htm](http://www.thirdwavesys.com/products/advantedge_fem.htm)
20. *LS-PrePost* [online]. O programu LS-PrePost. [vid. 23. Května 2011]. Dostupné z: <http://www.lstc.com/lsppl/>

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka	Jednotka	Popis
<b>MKP</b>	[-]	Metoda konečných prvků
<b>FEM</b>	[-]	The Finite Element Method
<b>CPU</b>	[%]	Central Processing Unit
<b>ALE</b>	[-]	Arbitrary Lagrangian-Eulerian
<b>SPH</b>	[-]	Smoothed Particle Hydrodynamic
<b>FEA</b>	[-]	Finite Element Analysis
<b>CAE</b>	[-]	Computer-aided Engineering
<b>CAD</b>	[-]	Computer Aided Design
<b>2D</b>	[-]	Dvourozměrná součást
<b>3D</b>	[-]	Třírozměrná součást
<b>STL</b>	[-]	Formát souboru CAD systému
<b>STEP</b>	[-]	Formát souboru CAD systému
<b>VRML</b>	[-]	Formát souboru CAD systému
<b>DXF</b>	[-]	Formát souboru CAD systému
<b>doc</b>	[-]	Formát souboru Word
<b>k</b>	[-]	Formát souboru Ansys Worbench

Symbol	Jednotka	Popis
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	[-]	složky napětí
$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$	[-]	složky normálového napětí
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	[-]	složky normálového napětí
$\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$	[-]	složky délkového přetvoření
$\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}$	[-]	složky uhlového přetvoření
$u, v, w$	[-]	složky posuvů
$x, y, z$	[-]	osové složky
<b>G</b>	[N.m <sup>-2</sup> ]	modul pružnosti v tahu
<b>E</b>	[N.m <sup>-2</sup> ]	modul pružnosti ve smyku
$\mu$	[N.m <sup>-2</sup> ]	Poissonovo číslo

<b>M</b>	[-]	hmotnostní matice
<b>Ü</b>	[-]	zrychlení
<b>K</b>	[-]	matice tuhosti
<b>U</b>	[-]	matice posuvu
<b>F</b>	[-]	matice zatížení
<b>C</b>	[-]	matice tlumení
$t^{crit}$	[s]	kritická hodnota časového kroku
<b>l</b>	[mm]	charakteristický rozměr prvku
$\rho$	[kg.m <sup>-3</sup> ]	hustota materiálu
<b>A</b>	[MPa]	počáteční mez kluzu
<b>B</b>	[MPa]	konstanta zpevňování
<b>C</b>	[-]	konstanta deformační rychlosti
<b>n</b>	[-]	exponent zpevňování
<b>m</b>	[-]	exponent teplotního měknutí

**SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1 Výstupní soubor Workbench LS-DYNAexport.k

Příloha 2 Seznam materiálu pro model

Příloha 3 CD-ROM

- obsahuje elektronickou verzi bakalářské práce ve formátech .doc a .pdf

- obsahuje vytvořený vzorový výpočet v programu Workbench