

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 732

ISSN 1213-4198

thesis
?
IS

Ing. Martin Madaj

**Vývoj výkonných vrtacích nástrojů
s využitím CAD/CAM
a analýzy mechanismu tvorby třísky**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

Ing. Martin Madaj

**VÝVOJ VÝKONNÝCH VRTACÍCH NÁSTROJŮ S VYUŽITÍM
CAD/CAM A ANALÝZY MECHANISMU TVORBY TŘÍSKY**

ON THE DEVELOPMENT OF HIGH-PERFORMANCE DRILLING
TOOLS BY MEANS OF CAD/CAM AND ANALYSIS OF CHIP
FORMATION MECHANISM

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Strojírenská technologie
Školitel: prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Oponenti: doc. Ing. Jaroslav Prokop, CSc.
prof. Ing. Alexander Janáč, CSc.
Datum obhajoby: 28. listopadu 2013

Klíčová slova

Vrtání, vrták, MKP, SPH, Johnson-Cook.

Keywords

Drilling, drill, FEM, SPH, Johnson-Cook.

Místo uložení práce:

Areálová knihovna Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně
Technická 2896/2, 616 69 Brno

© Martin Madaj, 2013

ISBN 978-80-214-4888-9

ISSN 1213-4198

OBSAH

OBSAH.....	3
1 MECHANISMUS TVORBY TŘÍSKY.....	6
1.1 Ortogonální řezání.....	6
1.2 Ortogonální řezání při vrtání.....	7
2 SIMULACE TVORBY TŘÍSKY.....	7
2.1 Explicitní metody MKP.....	7
2.2 Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH).....	8
3 SROVNÁVACÍ SIMULACE OBRÁBĚNÍ POMOCÍ METODY SPH.....	11
3.1 Simulace obrábění hliníkové slitiny A2024-T351.....	11
3.2 Výsledky simulace.....	12
3.3 Zhodnocení výsledků simulací ortogonálního obrábění.....	13
4 PROTOTYPY TŘÍBŘITÝCH VRTÁKŮ.....	15
4.1 Zhodnocení výsledků testování tříbřitých vrtáků.....	15
5 PROTOTYPY DVOUBŘITÝCH VRTÁKŮ S VNITŘNÍM ODVODEM TŘÍSKY.....	15
5.1 Geometrie nástroje.....	15
5.2 Vrtací experimenty.....	16
5.3 SPH simulace vrtání.....	18
6 ZÁVĚRY.....	21
6.1 Prototypy vrtacích nástrojů.....	21
6.2 SPH simulace obrábění.....	21
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	25
ŽIVOTOPIS AUTORA.....	29
ABSTRAKT.....	31

ÚVOD

Vrtání obecně je jednou z nejběžnějších obráběcích operací, při které se pomocí nástroje s definovanou geometrií břitu (vrtáku) vytváří otvory kruhového průřezu o různých průměrech a délkách. Vrtání probíhá do plného materiálu, nebo je možné zvětšovat již předpřipravené otvory. Hlavní pohyb je ve většině případů rotační a koná ho nástroj, vedlejší, posuvový pohyb ve směru osy vrtáku, koná ve většině případů také nástroj. V některých případech může hlavní pohyb vykonávat obrobek (např. vrtání na soustruhu) a vedlejší pohyb může být zajištěn pohybem stolu (např. při vrtání na frézce). Mezi technologie vrtání lze rovněž zařadit zahlubování, vyhrubování a vystružování. U posledních dvou zmíněných metod je díky použití nástrojů s větším počtem břitů než u vrtáku dosaženo lepších kvalitativních parametrů vyvrtané díry (odchylky jmenovitého průměru, kruhovitosti, válcovitosti, struktury povrchu) [1].

Při vrtání působí společně mnoho faktorů, které ovlivňují jak samotný nástroj, tak i kvalitu vrtané díry. Vliv na vrtací proces mají řezné podmínky (řezná rychlost v_c , posuv f), materiál obrobku a materiál nástroje včetně jeho povlaku, geometrie nástroje (např. v souvislosti s utvářením třísky), použití procesní kapaliny (chladí a maže rozhraní mezi nástrojem a obrobkem, usnadňuje odvod třísky z místa řezu), tuhost soustavy stroj-nástroj-obrobek, opotřebením nástroje v průběhu obrábění atd. Celý proces vrtání by měl být v průběhu svého trvání pokud možno stabilní, s co nejnižšími hodnotami posuvové síly F_f , krouticího (řezného) momentu M_c a samozřejmě i opotřebením. Sledování procesu vrtání lze provádět pomocí záznamu působícího silového zatížení dynamometrem (např. [2-5]) s následným statistickým vyhodnocením naměřených veličin. Díky tomu lze pro daný nástroj stanovit oblast vhodných řezných podmínek nebo provést pevnostní analýzu nástroje s následnou úpravou geometrie nástroje.

Existuje velké množství různých vrtacích nástrojů složitých tvarů, u nichž by bylo velmi obtížné, ne-li nemožné, aplikovat pro kontrolu pevnostních a funkčních vlastností (např. odvod třísky z místa řezu) analytické výpočty. K tomuto účelu jsou vhodné numerické metody, tedy analýzy pomocí Metody konečných prvků (MKP). I v dnešní době se obráběcí nástroje velmi často vyrábějí pouze na základě zkušeností konstruktéra a informací od zákazníků přímo z prostředí výroby, kde jsou tyto nástroje použity. Volba vhodných řezných podmínek pro konkrétní kombinaci obráběcího nástroje a materiálu obrobku a stanovení finálních parametrů geometrie se provádí až na základě zkoušek fyzického prototypu vrtacího nástroje, což může být zejména v dnešní době finančně nevýhodné. Pomocí implicitní a explicitní MKP, s využitím znalostí o mechanismu tvorby třísky, je možné proces obrábění virtuálně nasimulovat (např. [6-9] atd.) a stanovit tak vhodné parametry geometrie nástroje ještě před tím, než je vyroben první fyzický prototyp. Uvedené metody nejsou omezeny pouze na návrh vrtacích nástrojů, ale lze je samozřejmě aplikovat i na další metody třískového obrábění, jako např. soustružení, frézování apod.

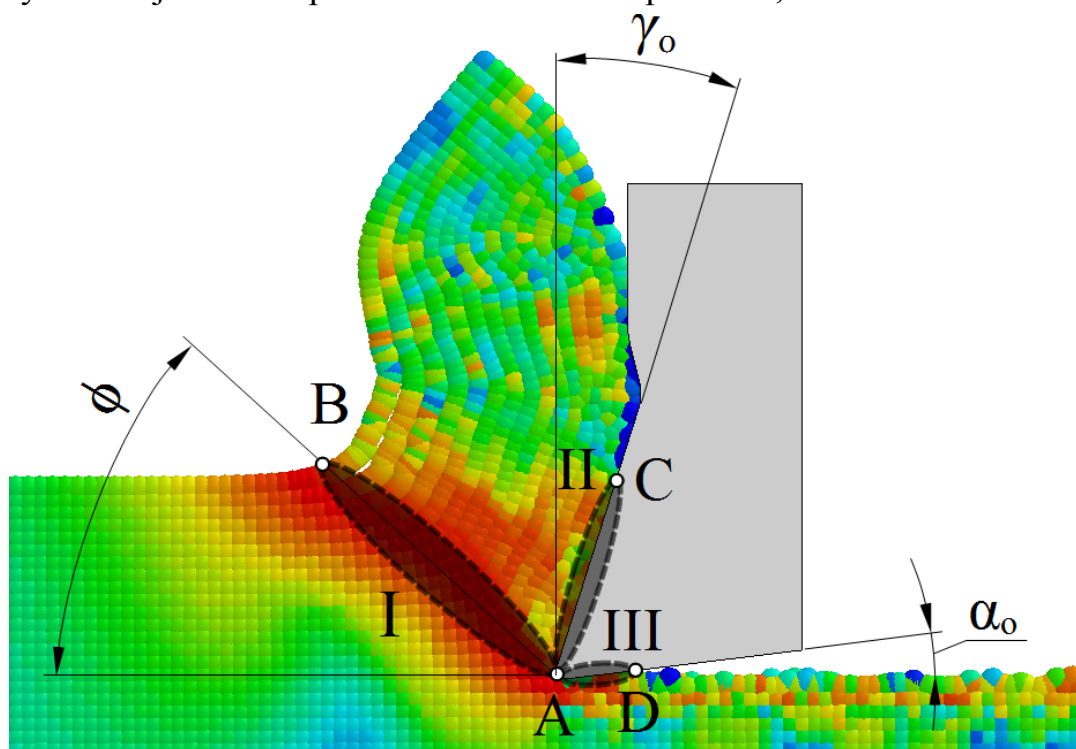
Cílem disertační práce je aplikace a využití explicitních numerických metod při vývoji nového prototypu vrtacího nástroje. Jako simulační metoda byla zvolena metoda Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH), která je schopna, oproti metodám MKP, relativně snadno zvládat velké deformace obrobku, aniž by docházelo k nadměrným deformacím sítě konečných prvků, které mohou způsobit nestabilitu a ukončení výpočtu – metoda SPH síť konečných prvků nepoužívá, patří do skupiny bezsít'ových metod.

1 MECHANISMUS TVORBY TŘÍSKY

Významný vliv na proces obrábění obecně má tvar odcházející třísky. Zejména u vrtání je tato problematika velmi důležitá, protože je nutné zajistit dostatečný odvod třísky z místa řezu, které je vzhledem k charakteru vrtací operace špatně přístupné (na dně vrtané díry). Materiál třísky se při obrábění deformuje elasticky a plasticky, s následným výskytem lomu. V průběhu tvorby třísky dochází současně k deformačnímu zpevňování materiálu a k tepelnému odpevňování. Oba tyto děje jsou ovlivněny deformační rychlostí. Převládá-li deformační zpevňování, je proces plastické deformace stabilní a tvoří se v celém průřezu rovnoměrně deformovaná tříska. V případě výskytu nestability v plastické deformaci se tvoří cyklická, segmentová tříska [10].

1.1 ORTOGONÁLNÍ ŘEZÁNÍ

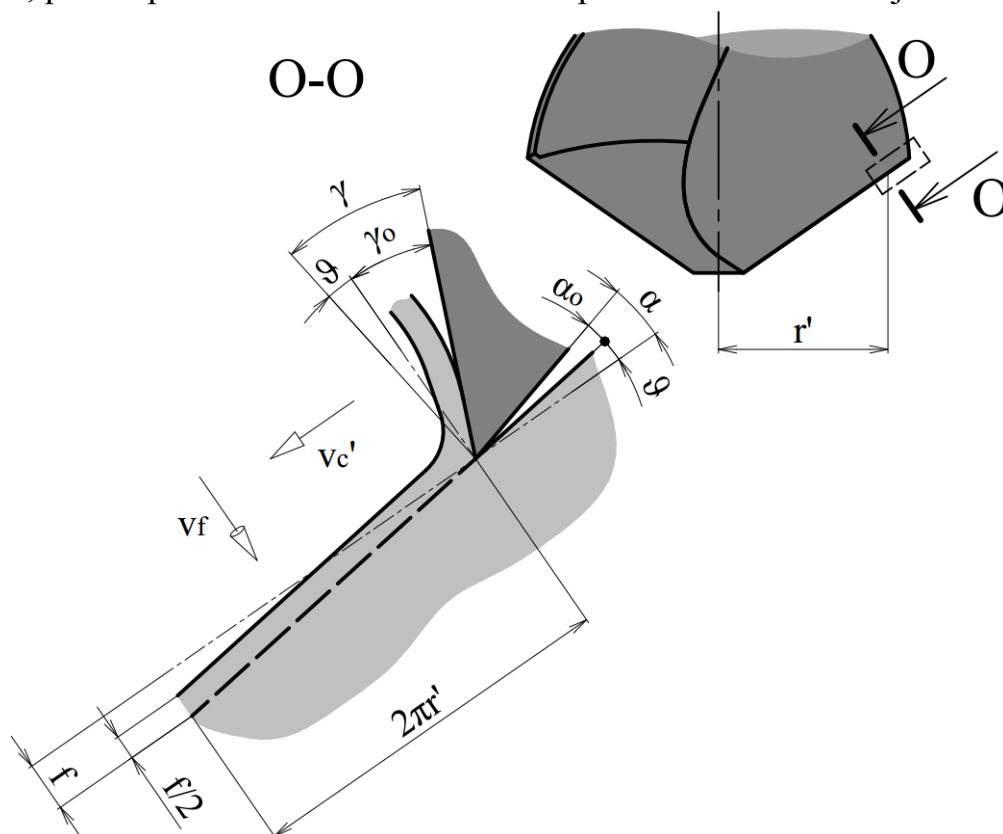
Mechanismus tvorby třísky se obvykle popisuje pomocí ortogonálního (pravoúhlého) řezání a bývá uveden v různých publikacích, např. v [10-12]. K přetváření materiálu na třísku dochází v kořeni třísky, viz Obr. 1, kde se nacházejí tři nejvýznamnější oblasti plastické deformace – primární, sekundární a terciární.



Obr. 1: Zóny plastické deformace v kořeni třísky

1.2 ORTOGONÁLNÍ ŘEZÁNÍ PŘI VRTÁNÍ

Oproti soustružnickým nástrojům, které jsou pro simulace ortogonálního řezání používány nejčastěji, jsou vrtáky vícebřité nástroje s proměnlivou geometrií břitu, kdy při pohybu podél břitu vrtáku směrem k ose nástroje dochází ke změně úhlu čela z pozitivních hodnot na negativní. Při vrtání lze model ortogonálního obrábění, viz Obr. 2, použít pouze na malém úseku břitu poblíž obvodu nástroje.



Obr. 2: Schéma ortogonálního řezání při vrtání, upraveno podle [13] a [14]

2 SIMULACE TVORBY TŘÍSKY

Numerická simulace tvorby třísky může být velmi užitečná např. v případě návrhu geometrie řezné části nového obráběcího nástroje. Nástroj není nutné fyzicky vyrobit, a přesto již ve fázi virtuálního prototypu může konstruktér získat důležité informace o jeho vlastnostech prostřednictvím simulovaného tvaru třísky, hodnot řezných sil a momentů, rozložení redukovaného napětí v obráběném materiálu i v obráběcím nástroji, teplotních polí, nebo zjištěných deformací nástroje. To vše s ohledem na použité řezné podmínky simulace, materiálový model, nebo zjednodušení nástroje (tuhý nástroj), pokud bylo použito.

2.1 EXPLICITNÍ METODY MKP

Při simulacích tvorby třísky je nejčastěji využíváno několika základních metod [15] – používá se Lagrangeova metoda, Eulerova metoda, nebo ALE (Arbitrary-Lagrangian Eulerian) metoda. Aplikovat lze i jiné výpočetní metody, mezi nimi např. metodu SPH.

2.2 SMOOTHED PARTICLE HYDRODYNAMICS (SPH)

Metoda SPH je jednou z tzv. bezsít'ových metod, které nepoužívají síť k tomu, aby propojily jednotlivé uzly nebo částice modelu rozložené v prostoru. Byla vyvinuta v roce 1977 pro účely astrofyziky ([15, 16]) a následně se její využití rozšířilo i do dalších oblastí mechaniky těles a tekutin. Podle potřeby je možné SPH modely v rámci jedné simulace párovat i s jinými bezsít'ovými modely nebo se síťovými (MKP) modely [15, 17, 18].

Simulovaný systém je u SPH metody představován diskrétními částicemi, z nichž každá obsahuje informaci o materiálových vlastnostech. SPH částice se pohybují společně s deformovaným materiálem, a proto lze SPH metodu, ačkoliv je částicová, zařadit do Lagrangeovy metody.

Výhodou SPH metody je její adaptabilita, které je dosaženo již v brzkém stádiu aproximace stavových proměnných prováděné v každém časovém kroku na základě aktuální lokální sady náhodně rozmístěných částic. Náhodné rozmístění částic nemá díky adaptabilitě na SPH formulaci vliv, a proto může tato metoda relativně snadno pracovat i s velkými deformacemi materiálu [15].

2.2.1 Stručný přehled příkladů využití SPH metody

Historie SPH metody sahá do 70. let 20. století, kdy ji pro řešení astrofyzikálních problémů poprvé využili Lucy a také Gingold s Monaghanem [15, 16]. Pro různé astrofyzikální simulace je využívána i nadále.

Další rozšíření SPH metody proběhlo zejména do oblasti dynamiky tekutin a příbuzných oborů.

SPH se rovněž používá pro simulace lomu křehkých materiálů, pro simulace tváření byla SPH metoda využita v roce 2000 Bonetem a Kulasegaramem [15].

Vzhledem k charakteru (nepřítomnost deformovatelné sítě) je SPH metoda často využívána pro simulace dopadů velmi vysokou rychlostí (High/Hyper Velocity Impacts – HVI). S těmito problémy se lze setkat také u družic nebo raketoplánů, které jsou vystaveny dopadům mikrometeoritů nebo „smetí“ vyskytujícího se na oběžné dráze Země. Obdobně lze SPH metodou simulovat i průstřely nebo výbuchy, viz např. [19].

SPH metoda v simulacích obrábění

Využití SPH metody pro simulace obrábění je (alespoň na základě zhodnocení obsahu některých dostupných vědeckých databází) méně časté než v případě MKP metody. Praktickými aspekty SPH metody vztahujícími se primárně k simulacím obrábění se zabývali zejména Limido a kol. [20], Villumsen a Fauerholdt [21], Espinosa a kol. [22] nebo Schwer [19].

Villumsen a Fauerholdt [21] provedli 3D simulaci ortogonálního obrábění hliníkové slitiny Al 6082-T6 a popsali některé důležité parametry nastavení aplikace LS-DYNA týkající se zejména kontaktu mezi nástrojem a obrobkem, okrajových podmínek, materiálových vlastností a rovnic rovnováhy (EOS – Equation of State). Následně provedli citlivostní analýzu zkoumající vliv hustoty SPH částic, mass

scalingu (umělého vložení hmoty do výpočtu), řezné rychlosti a součinitele tření na řezné a posuvové síly.

Espinosa a kol. [22] srovnali SPH metodu s „klasickou“ simulační metodou využívající síťový model a diskutovali další důležitá nastavení simulace, zejména vliv umělé viskozity nebo renormalizované formulace SPH. Navrhli zvýšení hodnoty lineárního koeficientu umělé viskozity Q_2 z 0,06 na 0,50. Provedená úprava výrazně vylepšila (vyhladila) rozložení redukovaného napětí dle von Misesa. Renormalizovaná formulace najde využití zejména u simulací třískového obrábění, protože ovlivňuje tvar třísky a přispívá k jeho realističtějšímu (více zahnutému) vzhledu, zatímco při použití klasické aproximace je tříska příliš rovná a neohýbá se.

Schwer se ve své práci [19] nezabýval obráběním, ale SPH simulací průstřelů hliníkových plátů, nicméně uvedl některé zajímavé poznatky týkající se umělé viskozity a použití modelu porušení Johnson-Cook: změnil hodnotu lineárního koeficientu umělé viskozity Q_2 z 0,06 na 1,00 a do SPH simulace zahrnul parametry porušení dle Johnson-Cooka, které se u SPH metody běžně nepoužívaly [21, 23]. Zavedení parametrů D_1 - D_5 do výpočtu se ukázalo být užitečné i v této práci.

2.2.2 Aplikace SPH metody na simulace vrtání

Jedním ze záměrů této práce je vytvoření SPH simulačního modelu procesu vrtání aplikovaného na nový prototyp vrtacího nástroje. Využití SPH metody pro simulace obrábění je zdokumentováno pouze v relativně malém množství případů, a to pouze u simulací ortogonálního obrábění. Pro SPH simulace vrtání nebyly podkladové zdroje pro tuto práci nalezeny. K tématice simulací vrtání je k dispozici pouze relativně malý počet článků zabývajících se simulacemi pomocí síťových metod (např. [9, 24-27]), ale ani v těchto případech není vždy prezentována „úplná“ simulace s procesem utváření třísky. Důvodem může být relativní náročnost jak preprocessingu – je nutné vytvořit a nasítovat složitý model vrtacího nástroje, tak výpočtové fáze – není možné použít symetrii modelu a pro získání „kvalitního“ tvaru simulované třísky jsou nutné elementy s malou délkou strany nebo částice s malou roztečí (řádově alespoň setiny mm, lépe tisícinny mm), což způsobuje zvýšení počtu elementů, resp. prudký pokles časového kroku a mnohdy zásadní nárůst výpočtového času.

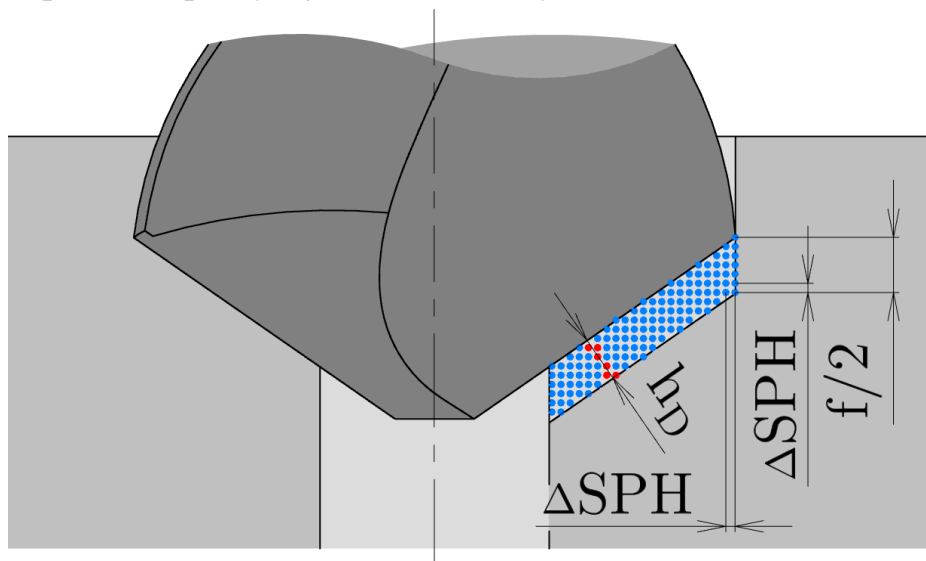
Jelikož SPH metoda je schopna přirozeně zvládat velké deformace a přetvoření aniž by docházelo ke zborcení elementů, byla vybrána jako potenciálně vhodná pro simulace vrtání. V průběhu přípravy SPH modelů bylo zjištěno některé důležité praktické poznatky, které ovlivňují jak kvalitu simulované třísky, tak výpočetní čas, a které jsou uvedeny níže.

2.2.3 Vliv posuvu na parametry simulace

Pro úspěšné simulování tvaru třísky při obrábění včetně její možné segmentace je nutné, aby byla tříska složena z dostatečného počtu elementů, a to zejména ve směru tloušťky třísky. Čím větší je počet elementů, tím lépe je možné simulovat tvar třísky, ale zároveň dochází ke zmenšení charakteristické délky elementu (pro síťové

metody) nebo ke zmenšení vzdálenosti mezi SPH částicemi, narůstá počet elementů nebo částic a dochází ke snížení časového kroku a prodloužení výpočtového času.

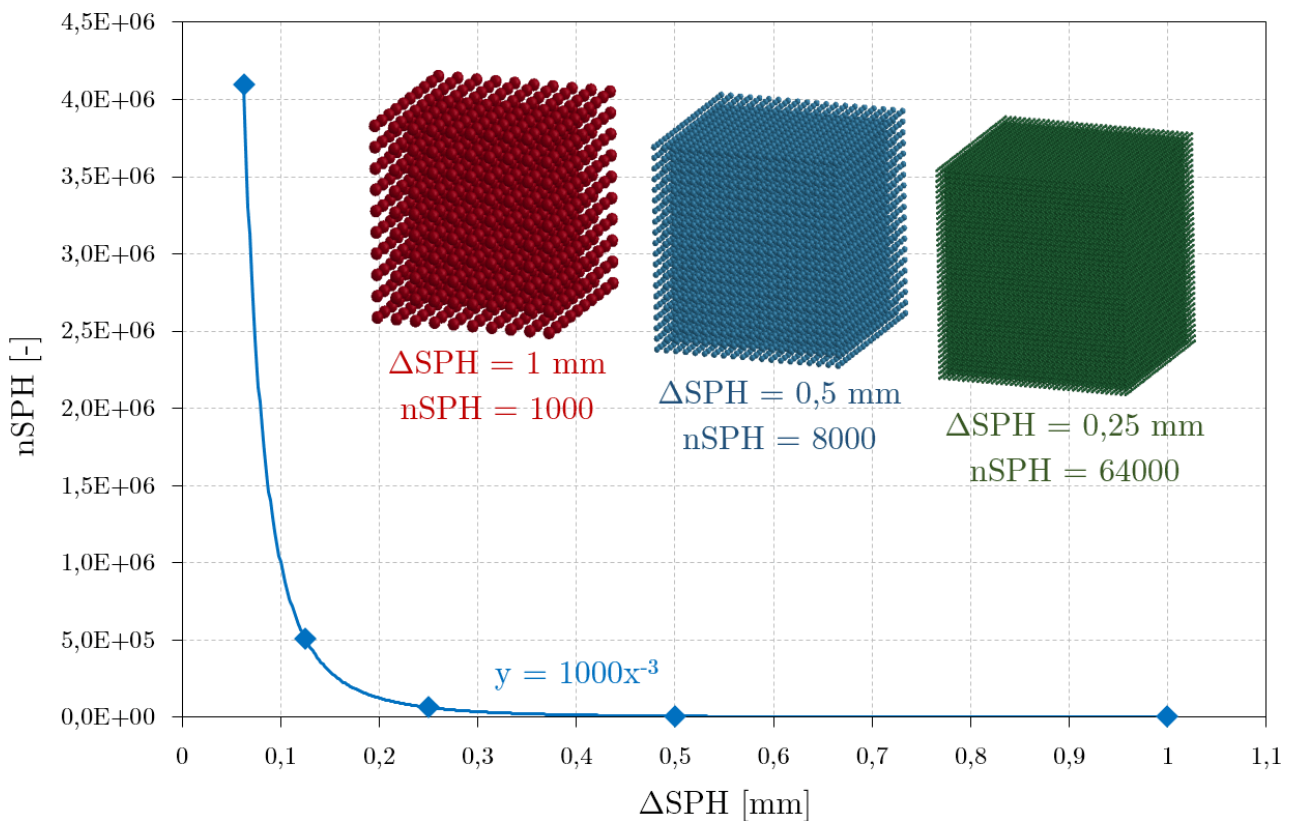
Velikost posuvu f (resp. posuvu na zub) má přímý vliv na počet SPH částic, které je nutné pro simulaci vrtání vygenerovat. Čím větší je hodnota posuvu, tím menší počet částic je nutné vytvořit (je možné použít větší rozteče) a tím je větší časová úspora výpočtu. Schematicky je rozmístění částic v oblasti třísky vyznačeno na Obr. 3, přičemž důležitá je rozteč SPH částic při pohledu na obrobek ve směru osy vrtacího nástroje – kolmo na vrtanou plochu. Rozteč SPH částic výchozího modelu by měla být ve všech osách pokud možno stejná. Červeně jsou na Obr. 3 vyznačeny částice, které přibližně pokrývají tloušťku třísky h_D .



Obr. 3: Rozložení SPH částic v průřezu třísky

Generování dostatečného počtu SPH částic je ale spojeno s prudkým nárůstem jejich počtu, a tudíž i s významným zpomalením výpočtu. Závislost mezi roztečí SPH částic a jejich počtem je dána mocninnou funkcí. Např. pro krychli o straně 10 mm je funkce ve tvaru $n_{SPH} = 1000 \cdot \Delta_{SPH}^{-3}$, kdy n_{SPH} je počet SPH částic a Δ_{SPH} je rozteč SPH částic. Ukázka závislosti je na Obr. 4 na straně 11.

Nejmenší hodnota rozteče, resp. vyhlazovací délky, tak výrazným způsobem ovlivňuje délku časového kroku, resp. délku celé simulace. V případě simulace vrtání se mohou rozteče mezi SPH částicemi pohybovat v setinách nebo i tisícinách mm, což nastaví časový krok na hodnoty řádově v 10^{-10} - 10^{-9} s. Časový krok se navíc v průběhu řešení kontaktů může automaticky snižovat. Zejména výpočty 3D simulací pak mohou trvat i na výpočetních clusterech dny nebo i týdny. Určitého zkrácení výpočtového času lze v případě použití aplikace LS-DYNA dosáhnout zvětšením počtu časových kroků mezi seřazováním SPH částic (particle sorting) v sekci *CONTROL_SPH_NCBS. Je-li využito větších hodnot roztečí SPH částic, lze na výsledky simulace nahlížet z globálního hlediska (rozložení redukovaného napětí, průběhy zatížení), ale pravděpodobně se nepodaří vhodně zdokumentovat např. segmentaci třísky.



Obr. 4: Závislost počtu SPH částic na rozteči

2.2.4 Volba softwaru pro SPH simulace

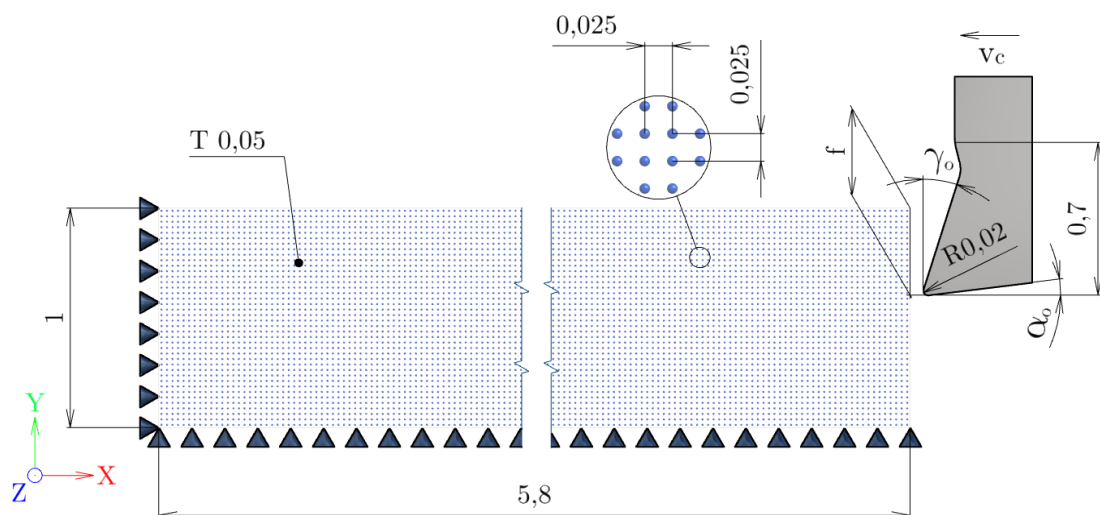
SPH metoda je obsažena např. v aplikaci ANSYS Autodyn nebo LS-DYNA (resp. ANSYS LS-DYNA). Pro tuto práci byl zvolen software ANSYS LS-DYNA, který obsahuje (alespoň oproti aplikaci ANSYS Autodyn v14.0) renormalizovanou formulaci SPH, která je důležitá pro realističtější simulaci tvaru třísky [20].

3 SROVNÁVACÍ SIMULACE OBRÁBĚNÍ POMOCÍ METODY SPH

Aby bylo možné obecně ověřit vhodnost SPH metody pro simulaci třískového obrábění, byl na základě parametrů uvedených Mabroukim a kol. [8] vytvořen simulační model pro ortogonální obrábění hliníkové slitiny A2024-T351. Publikace [8] obsahuje i experimentální výsledky, se kterými je SPH model rovněž srovnáván.

3.1 SIMULACE OBRÁBĚNÍ HLINÍKOVÉ SLITINY A2024-T351

Schéma SPH modelu s některými geometrickými parametry je na Obr. 5. Nástroj byl modelován jako tuhý s umožněním pohybu v ose X. Dostatečné zavazbení (upnutí) obrobku bylo zajištěno odebráním translačních stupňů volnosti krajním elementům na levé a spodní straně obrobku. Zbývající SPH elementy měly odebrány translační stupeň volnosti v ose Z.



Obr. 5: Schéma modelu pro simulaci ortogonálního obrábění Al slitiny A2024-T351

3.1.1 Geometrie nástroje a řezné podmínky

Dle [8] odpovídala geometrie nástroje nepovlakované vyměnitelné břitové destičce CCGX 12 04 08-AL H10 s ortogonálním úhlem čela $\gamma_0 = 17,5^\circ$ a ortogonálním úhlem hřbetu $\alpha_0 = 7^\circ$. Použité řezné podmínky byly následující: řezná rychlost v_c postupně 200, 400 a 800 m/min; posuv $f = 0,4$ mm, šířka záběru při experimentu $a_p = 4$ mm.

3.1.2 Materiálový model

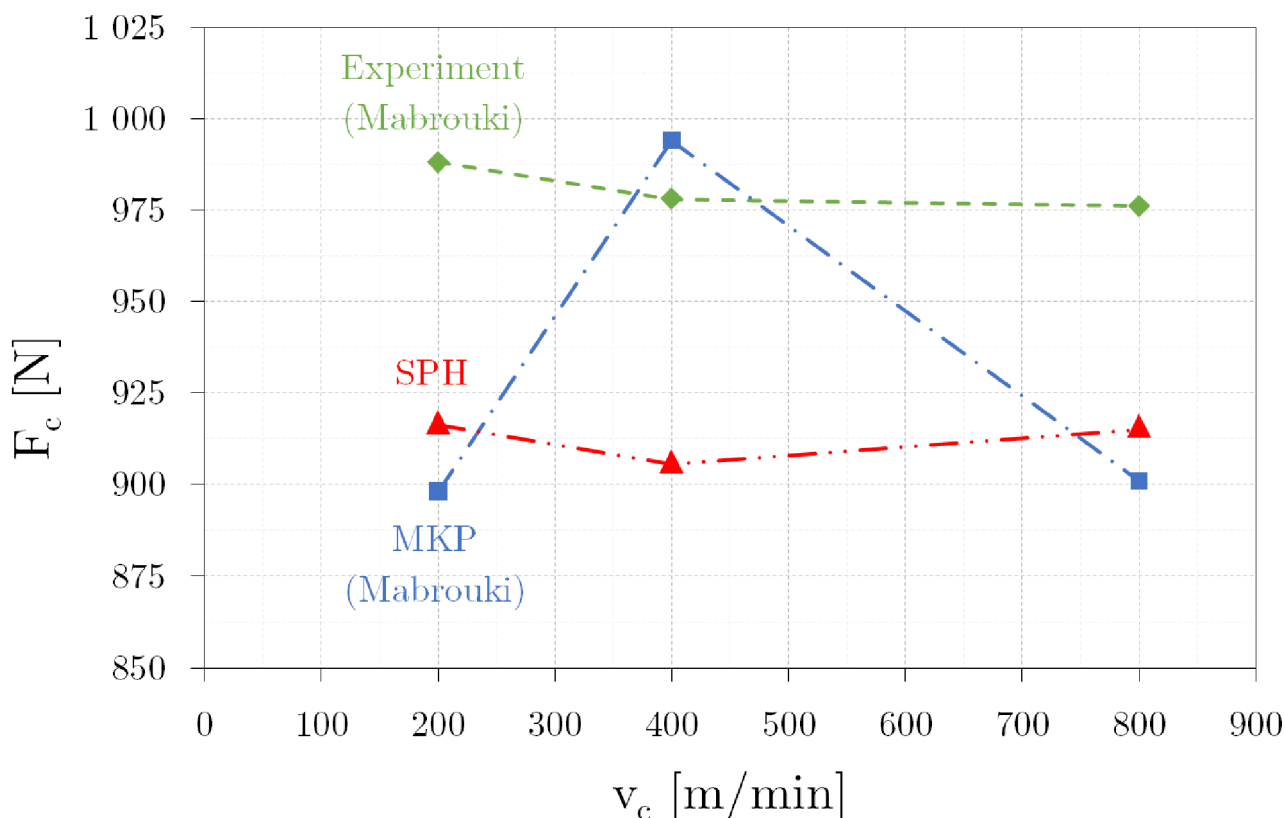
Parametry materiálového modelu Johnson-Cook a odpovídající parametry porušení pro obrobek byly následující [8]: $A = 352$ MPa; $B = 440$ MPa; $n = 0,42$; $C = 0,09$; $m = 1,03$; $D_1 = 0,13$; $D_2 = 0,13$; $D_3 = -1,5$; $D_4 = 0,011$; $D_5 = 0$.

3.2 VÝSLEDKY SIMULACE

Následující kapitoly obsahují stručný přehled výsledků SPH simulace.

3.2.1 Řezné síly

Srovnání experimentálních hodnot a hodnot získaných numerickými simulacemi je provedeno na Obr. 6. Je patrné, že SPH metodou vypočtené řezné síly jsou ve velmi dobré shodě s hodnotami získanými metodou konečných prvků i s experimentálně naměřenými hodnotami, ačkoliv u řezné rychlosti $v_c = 400$ m/min je mezi hodnotami řezné síly F_c vypočtenými metodou SPH a metodou MKP [8] relativně velký rozdíl (přibližně -9,77 %) ve srovnání s hodnotami řezných sil u řezných rychlostí $v_c = 200$ m/min a $v_c = 800$ m/min. Obecně řečeno, kromě hodnoty průměrné řezné síly vypočtené v [8] pro rychlost $v_c = 400$ m/min, je rozvoj hodnot řezných sil v závislosti na řezné rychlosti predikovaný metodou SPH podobný experimentálně zjištěným měřením i simulaci publikované v [8], ačkoliv jsou hodnoty řezných sil ve srovnání s experimentem mírně nižší a ve srovnání s MKP simulací mírně vyšší.



Obr. 6: Grafické srovnání průměrných hodnot řezných sil pro různé řezné rychlosti

3.2.2 Tvar třísky, redukované napětí v třísce, plastické přetvoření

Na Obr. 7a-c na straně 14 jsou postupně ve třech časových okamžicích (0,747 ms; 0,864 ms; 1,287 ms) zobrazeny následující výsledky simulace pro řeznou rychlost $v_c = 200$ m/min: referenční tvar třísky dle Mabroukiho [8] a tvar třísky získaný SPH simulací včetně rozložení redukovaného napětí a plastického přetvoření.

3.2.3 Vliv součinitele tření

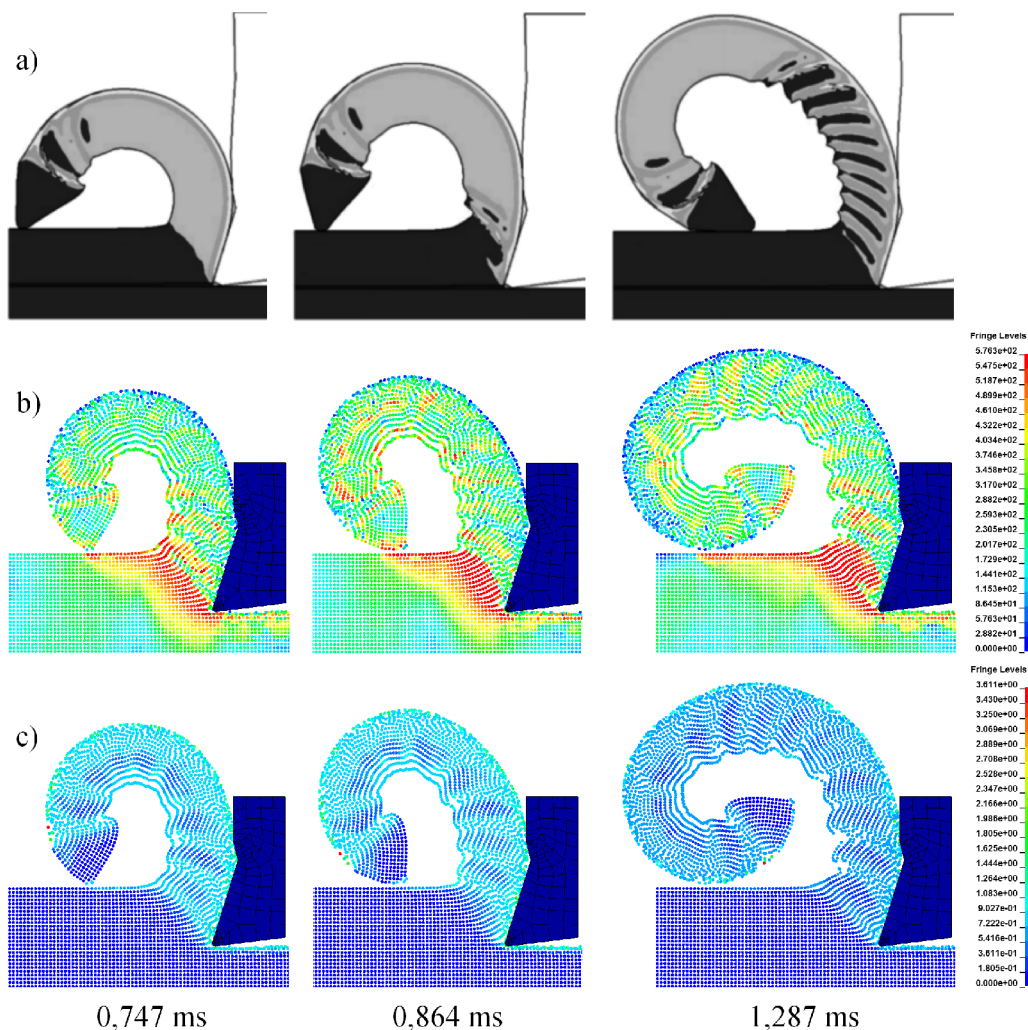
Jelikož byly v rámci jednoho simulačního modelu kombinovány MKP i SPH elementy, bylo nutné nastavit hodnotu součinitele tření. Aby byl prověřen možný vliv součinitele tření na velikost řezné síly a tvar třísky, byly u simulace pro $v_c = 800$ m/min použity 3 různé hodnoty součinitele tření μ : 0, 0,17 (výchozí hodnota z [28]) a 0,34.

Změny hodnot součinitele tření ovlivnily tvar třísky, hodnoty plastického přetvoření a hodnoty řezných sil. Vliv na tvar třísky je prezentován na Obr. 8.

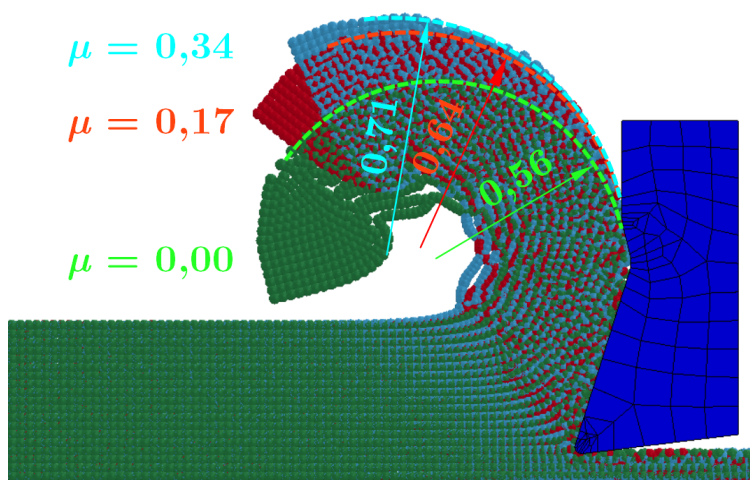
3.3 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ SIMULACÍ ORTOGONÁLNÍHO OBRÁBĚNÍ

Na základě získaných výsledků srovnávací simulace ortogonálního obrábění hliníkové slitiny A2024-T351 lze soudit, že SPH metoda je schopna (přinejmenším ve zde popisovaném případě) predikovat tvar třísky a řeznou sílu v dobré shodě s experimentálním měřením i MKP simulací. Rozdíly mezi predikovanými hodnotami řezných sil a hodnotami zjištěnými experimentálně nebo pomocí MKP se

pohybovaly do 10 %. V případech, kdy je očekáváno, že výsledkem simulace bude segmentovaný tvar třísky, by měly být použity parametry porušení dle Johnson-Cooka.



Obr. 7: $v_c = 200$ m/min: a) tvar třísky dle Mabroukiho; b) tvar třísky a rozložení hodnot redukovaného napětí u SPH simulace; c) rozložení hodnot plastického přetvoření u SPH simulace

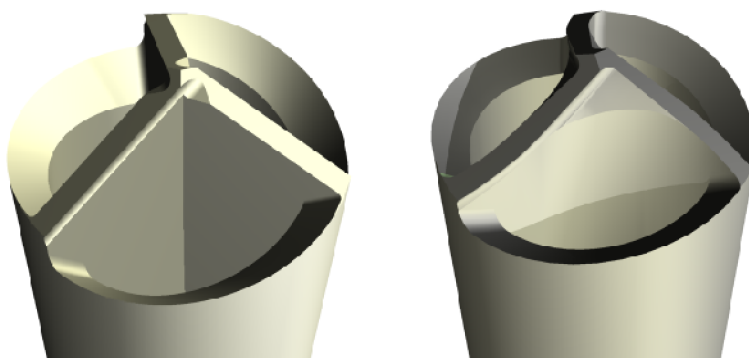


Obr. 8: Vliv součinitele tření na tvar třísky, $v_c = 800$ m/min

Tvar třísky je možné ovlivnit pomocí hodnoty EFMIN tak, aby lépe odpovídal experimentálním výsledkům – je ale nutné vzít v úvahu, že zadání hodnoty EFMIN představuje „umělý“ zásah do simulace.

4 PROTOTYPY TŘÍBŘITÝCH VRTÁKŮ

Prvními testovanými prototypy vrtacích nástrojů byly dvě varianty tříbřitého vrtáku ve tvaru trubičky s vnitřním odvodem třísky, které by mohly mít využití např. při vrtání kostní tkáně. Výhoda myšlenky vnitřního odvodu třísky při chirurgických zásazích spočívá v omezení znečištění operovaného místa třískou, která je u „běžného“ šroubovitého vrtáku odváděna drážkou a přichází do kontaktu s okolní tkání. Návrhy byly vytvořeny dle myšlenky prof. Píšky z FSI VUT v Brně a jednalo se o tříbřité vrtáky s přímými (Obr. 9 vlevo) a obloukovými břity (Obr. 9 vpravo).



Obr. 9: Vlevo – vrták s přímými břity, vpravo – vrták s obloukovými břity

4.1 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ TESTOVÁNÍ TŘÍBŘITÝCH VRTÁKŮ

S ohledem na data získaná z měření, zejména na přílišné zahlcování vrtáku s přímými břity třískami a na výraznou tvorbu otřepů u vrtáku s obloukovými břity, bylo rozhodnuto o úpravě konstrukce vrtáku. Koncept vnitřního odvodu třísky byl zachován, ale došlo ke zvětšení průměru trubkové části a snížení počtu břitů ze tří na dva. Upravený koncept vrtáku je popisován v další kapitole.

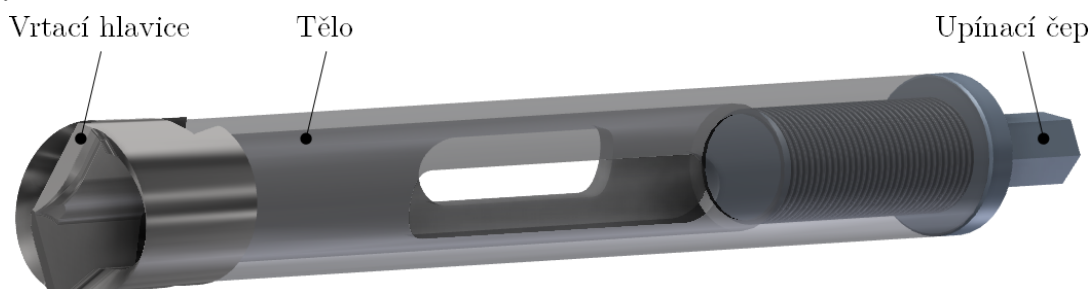
5 PROTOTYPY DVOUBŘITÝCH VRTÁKŮ S VNITŘNÍM ODVODEM TŘÍSKY

Na základě analýzy výsledků popisovaných v kap. 4.1 byly dle myšlenky prof. Píšky z FSI VUT v Brně navrženy prototypy dvoubřitého vrtacího nástroje, kdy na jednom konci těla nástroje je monolitní hlavice s břity a na druhém konci je upínací část.

5.1 GEOMETRIE NÁSTROJE

Jedná se o dvoubřitý vrtací nástroj s možností odvodu třísky vnitřkem nástroje s relativně snadno vyměnitelnou vrtací hlavicí. Koncept prototypu je zachycen na Obr. 10. Vrtací nástroj se skládá ze tří částí, a to z připájené vrtací hlavice pojištěné rybinovou drážkou, těla vrtáku sloužícího k odvodu třísky a pomocí vyfrézovaných

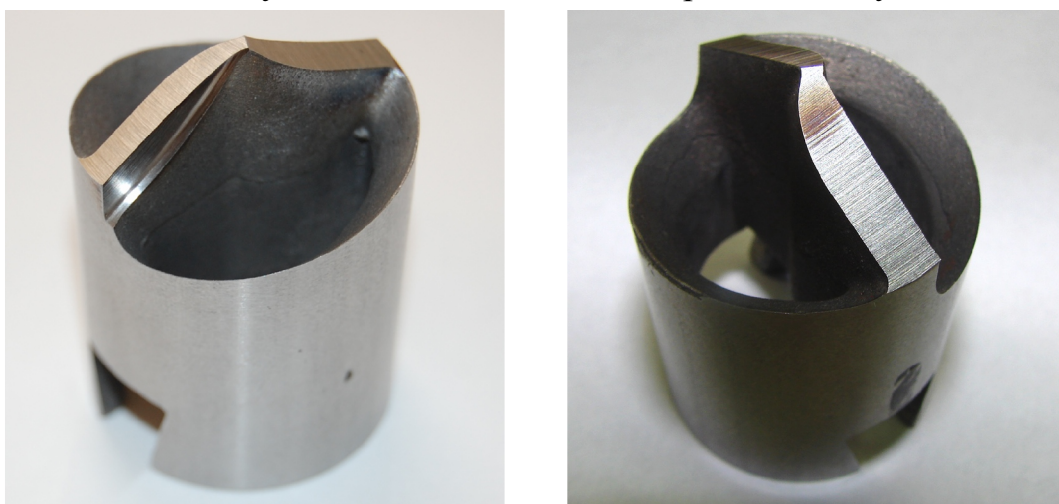
drážek k odstraňování třísky a/nebo k přívodu procesní kapaliny, a z šestihhranného nebo válcového upínacího čepu našroubovaného do zadní části těla vrtáku pro přenos krouticího momentu z vřetena stroje. Nástroj je možné použít pro hluboké vrtání.



Obr. 10: Sestava prototypu vrtáku

5.1.1 Prototypy z lité oceli

Z materiálu HSSE (litá rychlořezná ocel, označení dle podnikové normy PN 422993.3) byly vyrobeny dvě varianty vrtacích hlavice, označované jako *Vrták 1* a *Vrták 2*, viz Obr. 11. *Vrták 1* se od *Vrtáku 2* odlišuje výbrusem čela sloužícím k ohýbání a lámání třísky, zatímco *Vrták 2* má čelní plochu bez výbrusu.



Obr. 11: Vlevo – vrtací hlavice (*Vrták 1*), vpravo – vrtací hlavice (*Vrták 2*)

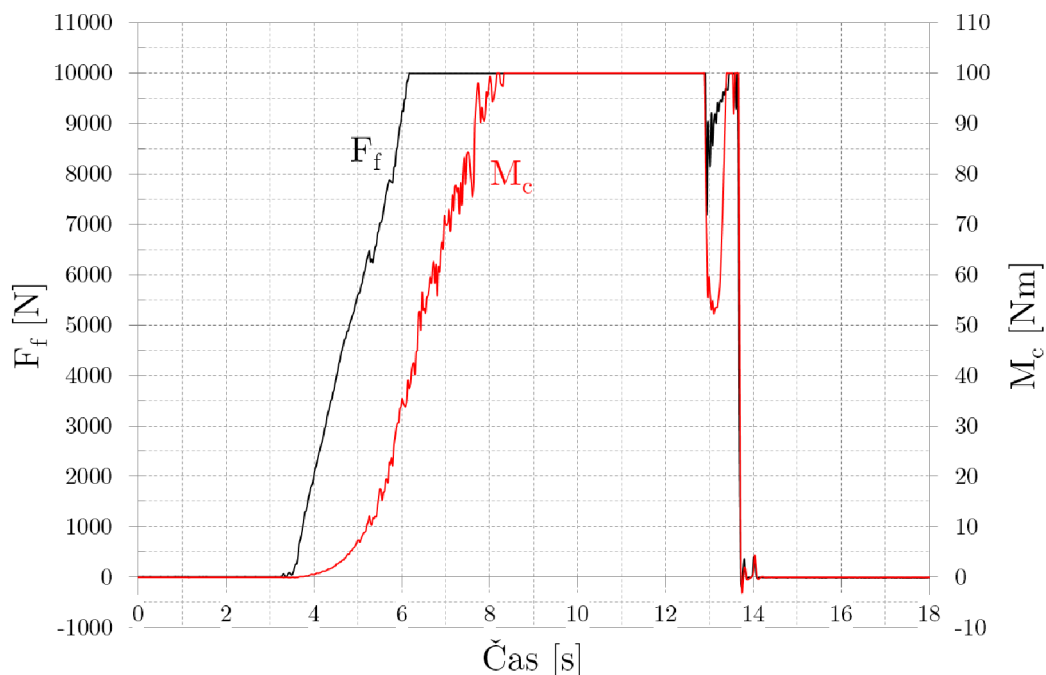
5.2 VRTACÍ EXPERIMENTY

Tento dokument uvádí výsledky testování týkající se pouze varianty *Vrták 1*. Vrtací testy byly prováděny do 4 materiálů s různými parametry rezných podmínek. Silové a momentové zatížení bylo zaznamenáváno pomocí dynamometru KISTLER 9272 a dvou nábojových zesilovačů KISTLER 5011.

Jako materiály obrobků byly zvoleny SikaBlock[®] M 450 ($v_c = 66$ m/min), smrkové dřevo ($v_c = 66$ m/min, $v_c = 35,2$ m/min), litina EN-GJL-200 ($v_c = 19,7$ m/min) a ocel ČSN 12 050 ($v_c = 19,7$ m/min). Posuv byl nastaven vždy na hodnotu $f = 0,2$ mm.

5.2.1 Ukázka naměřených hodnot pro ocel ČSN 12 050

Průběh změřeného silového a momentového zatížení pro díru 1/9 je prezentován na Obr. 12.



Obr. 12: Ocel ČSN 12 050, díra 1/9 – silové a momentové zatížení

Nástroj vrtal do připraveného zahloubení, díky čemuž nedošlo k jeho rozkmitání. Přesto bylo zejména v počáteční fázi patrné, že je tříska odebrána z větší části pouze jedním břitem nástroje – vrtací hlavice byla pravděpodobně připájena mírně excentricky vůči tělesu vrtáku. Tříška se dále hromadila na čele nástroje u vstupu do vnitřní části nástroje a následně došlo k překročení pevnosti pájeného spoje, což vedlo k vysmeknutí hlavice z ryby a současně k lomu připájené vrtací hlavice. Primární příčinou lomu vrtací hlavice byl zřejmě špatný odvod třísky a její hromadění na čele nástroje. Podíl na hromadění třísky mohl mít zábrus na čele, který ohýbal třísku zpět k břitu nástroje, nebo nevhodně nastavená hodnota posuvu pro danou kombinaci geometrie nástroje a obráběného materiálu. Vliv hromadění třísky v nástroji je velmi dobře zdokumentován prudkým nárůstem posuvové síly F_f až nad limit měření nastavený na dynamometru (10000 N).

5.2.2 Zhodnocení výsledků experimentu

Testovaná varianta vrtací hlavice s výbrusem na čelní ploše (Vrták 1) se na základě zde prezentovaných experimentů ukázala jako problematická. Kromě obrábění smrkového dřeva po směru let a litiny EN-GJL-200 docházelo k postupnému zahlcování nástroje třískami, což se projevovalo nárůstem posuvové síly i krouticího momentu. Nárůst krouticího momentu mohl být ovlivněn i nedostatečnou hodnotou zpětné kuželovitosti vrtací hlavice. Jako nevyhovující se ukázalo využití nástroje s výbrusem na čelní ploše pro vrtání do oceli ČSN 12050, kdy výbrus neumožnil volný odvod třísky do střední části nástroje, ačkoliv dobře

plnil funkci utvařeče třísky. Následkem zahlcení nástroje třískami došlo k překonání pevnosti pájeného rybinového spoje a k lomu vrtací hlavice.

5.3 SPH SIMULACE VRTÁNÍ

SPH simulace vrtání popisovaná v tomto dokumentu byla provedena pro obě varianty nástrojů – *Vrták 1* i *Vrták 2*. S ohledem na poznatky uvedené v kap. 2.2.3 a výpočetní výkon dostupného hardwaru bylo nutné při nastavování parametrů simulací zvolit kompromis mezi odhadovaným výpočtovým časem a „rozlišením“ simulačního modelu (roztečí SPH částic). Simulace byla provedena pro materiál obrobku ČSN 12 050 a odpovídající řezné podmínky (viz kap. 5.2). Rovněž byl testován vliv zvýšených řezných podmínek a změněné hodnoty součinitele tření na výsledky simulace.

5.3.1 Základní simulační model

Simulační model sestával ze dvou částí – nástroje (*Vrták 1* nebo *Vrták 2*) a obrobku. Pro zkrácení výpočtového času byl nástroj složený z 15153 tetrahedronů modelován jako tuhý s umožněním posuvu v ose *Z* a rotace kolem osy *Z*. Obrobek byl tvořen 6712 SPH částicemi o výchozí rozteči $\Delta\text{SPH} = 0,8$ mm a pro co největší snížení počtu vytvořených částic byl modelován do tvaru dutého, z jedné strany uzavřeného komolého kužele navazujícího na válcovou část.

5.3.2 Materiálový model obrobku

Parametry materiálového modelu Johnson-Cook a odpovídající parametry porušení pro obrobek byly následující [29]: $A = 375$ MPa; $B = 552$ MPa; $n = 0,457$; $C = 0,02$; $m = 1,4$; $D_1 = 0,25$; $D_2 = 4,38$; $D_3 = -2,68$; $D_4 = 0,002$; $D_5 = 0,61$.

5.3.3 Ukázky výsledků SPH simulace

Následující kapitoly prezentují některé z výsledků získaných při SPH simulacích vrtání s prototypy vrtacích hlavic.

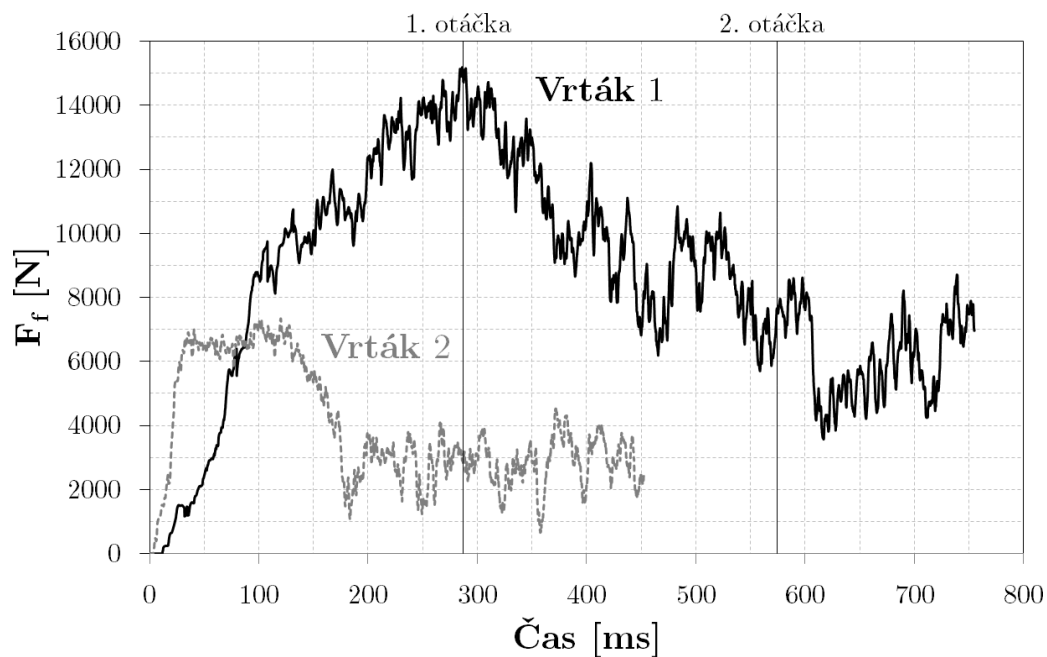
Posuvová síla a krouticí moment

Průběhy posuvových sil pro obě varianty vrtacích hlavic s řeznými podmínkami odpovídajícími experimentu, jsou vykresleny na Obr. 13.

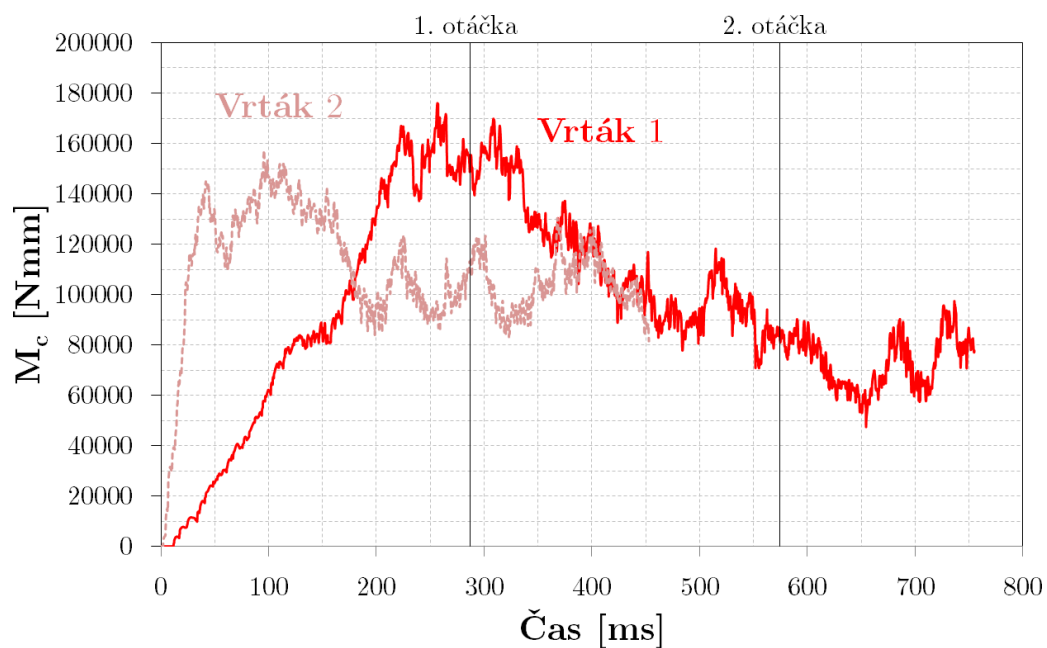
U *Vrtáku 2* je patrné, že přibližně po polovině první otáčky došlo k poklesu posuvové síly F_f na průměrnou hodnotu 2873 N a k ustálení stavu obrábění. U *Vrtáku 1* nelze z průběhu simulované posuvové síly usuzovat, zda k ustálení stavu obrábění dochází nebo ne i přesto, že byl simulován delší časový úsek.

Průběhy krouticích (řezných) momentů M_c pro obě varianty vrtacích hlavic s řeznými podmínkami odpovídajícími experimentu jsou vykresleny na Obr. 14.

Mezi maximálními hodnotami řezných momentů obou vrtacích hlavic již nejsou tak výrazné rozdíly jako v případě posuvových sil – maximální hodnota u *Vrtáku 1* činí 176000 Nmm, u *Vrtáku 2* je to 156731 Nmm. U *Vrtáku 2* došlo přibližně po polovině první otáčky k poklesu hodnot řezného momentu a k jeho ustálení kolem průměrné hodnoty 103090 Nmm.



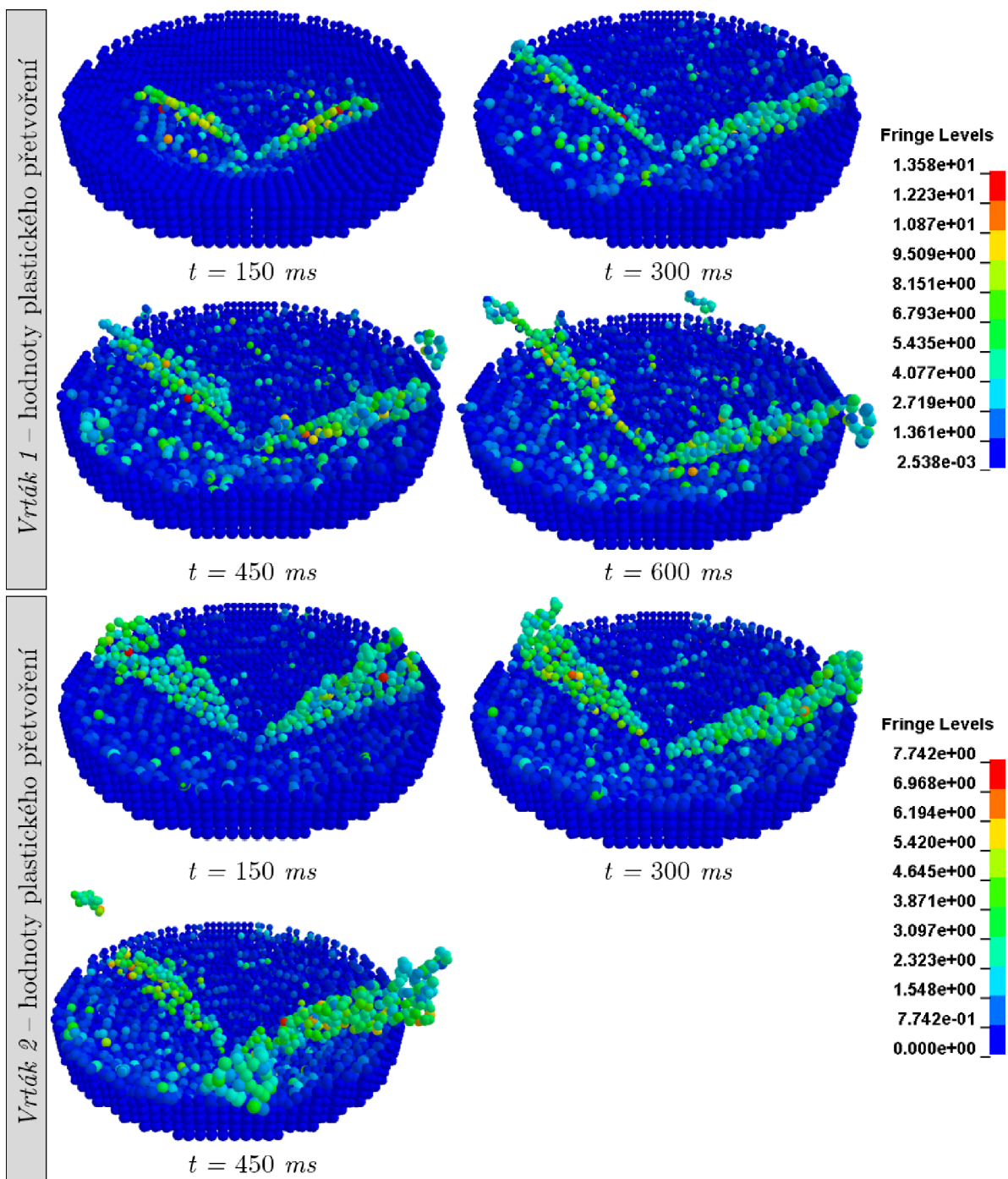
Obr. 13: Průběhy posuvových sil pro *Vrták 1* a *Vrták 2* s parametry dle experimentu



Obr. 14: Průběhy řezných momentů pro *Vrták 1* a *Vrták 2* s parametry dle experimentu

Tvar třísek, plastické přetvoření

Tvary třísek včetně rozložení hodnot plastického přetvoření postupně ve čtyřech, resp. třech časových okamžicích, jsou zobrazeny na Obr. 15 na následující straně. Hodnoty napětí v legendě platí vždy pro poslední zobrazený stav dané simulace, tedy pro 600 ms u *Vrtáku 1* a 450 ms u *Vrtáku 2*.



Obr. 15: Tvar třísek a rozložení hodnot plastického přetvoření; parametry dle experimentu

Mezi oběma vrtáky jsou poměrně výrazné rozdíly ve tvaru třísek i v hodnotách plastického přetvoření. Vrták 1 dosahuje maximální hodnoty plastického přetvoření 13,58, zatímco Vrták 2 dosahuje hodnoty 7,74. Vyšší hodnoty plastického přetvoření u Vrtáku 1 jsou způsobeny výbrusem na čele, který zadržuje SPH částice třísky a neumožňuje jejich odchod z místa řezu.

6 ZÁVĚRY

Prezentovaná disertační práce popisuje návrh geometrie nových typů vrtacích nástrojů, fyzické testování řezivosti prototypů navrhovaných vrtacích nástrojů a simulace ortogonálního obrábění a vrtání pomocí SPH metody.

6.1 PROTOTYPY VRTACÍCH NÁSTROJŮ

Nové geometrie vrtacích nástrojů s koncepcí vnitřního odvodu třísky byly navrženy ve dvou rozměrových variantách – nejprve jako trubičkové vrtáky o průměru 7 mm se dvěma nebo třemi břity a následně jako vrtací nástroje (hlavice) s vnější kuželovou částí se dvěma symetricky uspořádanými břity o navrhovaném průměru 30 mm. Potenciálním výstupem měla být přihláška vynálezu u Úřadu průmyslového vlastnictví.

Po prvních testech řezivosti do materiálu SikaBlock® M 450 bylo v důsledku zahlcování vrtáku (trubičky) odcházejícími třískami upuštěno od menší varianty s průměrem 7 mm a bylo rozhodnuto navrhnout variantu o větším průměru s relativně snadno vyměnitelnou vrtací hlavicí.

Pomocí rapid prototypingu, přesného lití a broušení byly vyrobeny prototypy vrtacích hlavic o navrhovaném průměru 30 mm. Zakalené vrtací hlavice byly nasazeny pomocí rybinového vedení na tělo vrtáku sloužící k odvodu třísky a/nebo přívodu procesní kapaliny a k přenosu krouticího momentu od vřetene stroje. Rybinový spoj byl pojištěn připájením tvrdou pájkou. Varianta vrtací hlavic (*Vrták 1*) jejíž testování je popisováno v této práci, obsahovala výbrus na čelní ploše, který měl sloužit jako utvařeč a lamač třísky.

Při zátěžových vrtacích testech se utvařeč třísky projevil jako problematický, když bránil volnému odvodu třísky z místa řezu do střední části nástroje. Kromě případů obrábění smrkového dřeva po směru let a litiny EN-GJL-200 docházelo k postupnému zahlcování nástroje třískami, což se projevovalo nárůstem posuvové síly i krouticího momentu. Při vrtání do oceli ČSN 12050 došlo vlivem třísky hromadící se v místě před utvařečem k překročení pevnosti pájeného spoje a k vysmeknutí vrtací hlavic z rybinové drážky. Současně došlo k lomu vrtací hlavic.

Na základě zkušeností s výše popisovaným experimentem bylo u přípravy podkladů pro přihlášku vynálezu dále pokračováno s variantou vrtací hlavic bez výbrusu čela (*Vrták 2*), resp. s modifikací vrtací hlavic, která obsahovala vnější vodicí fazety. Tyto geometrické varianty nebyly v disertační práci blíže popisovány. Na prototyp dvoubřitého vrtacího nástroje s vyměnitelnou monolitickou vrtací hlavicí ve variantě s vodicími fazetami byla dne 22. 5. 2013 u Úřadu průmyslového vlastnictví podána přihláška vynálezu s názvem „Vrtací nástroj“, evidovaná pod spisovou značkou PV 2013-375.

6.2 SPH SIMULACE OBRÁBĚNÍ

Popisované prototypy dvoubřité monolitní vrtací hlavice rovněž posloužily jako vzorové modely pro simulace vrtání pomocí metody SPH.

Metoda SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) je v porovnání se síťovými výpočetními metodami (metoda konečných prvků – MKP/FEM), alespoň na základě zhodnocení obsahu některých dostupných vědeckých databází (např. ScienceDirect), využívána pro simulace třískového obrábění mnohem méně nebo v současné době téměř vůbec, a to i celosvětově. Mezi poměrně malým počtem dokumentů, které byly na toto téma publikovány, se téměř výlučně objevují SPH simulace ortogonálního řezání. Informace o využití SPH metody pro simulace vrtání nejsou dostupné, resp. dosud nebyly s největší pravděpodobností nikde publikovány. Tato práce obsahuje dva příklady využití SPH metody pro simulace obrábění.

6.2.1 SPH simulace ortogonálního obrábění

V prvním případě se jednalo o simulaci ortogonálního obrábění hliníkové slitiny A2024-T351. Uvedená simulace měla sloužit pro ověření vhodnosti SPH metody pro simulace obrábění a pro určení některých výchozích parametrů a nastavení simulace, které by bylo možné později aplikovat na simulaci vrtacího procesu.

Simulace potvrdila poměrně dobrou shodu predikovaných hodnot řezné síly F_c a tvaru třísky s experimentem i MKP simulací publikovanou v [8]. Odchyšky hodnot silového zatížení predikovaného SPH metodou se pohybovaly do 10% ve srovnání s výsledky MKP simulací a s výsledky experimentu. Stávajícím poznatkům mechaniky tvorby třísky rovněž odpovídal i vliv různých hodnot součinitele tření μ na tvar třísky (poloměr zaoblení a tloušťku), stejně jako na úhel roviny maximálních smykových napětí ϕ a velikosti řezných sil F_c .

Jako velmi zajímavé se ukázalo být použití parametrů porušení materiálového modelu Johnson-Cook D_1 - D_5 . Tyto parametry zásadním způsobem ovlivnily tvar třísky, která se po jejich aplikaci změnila z plynulé na segmentovanou. Pokud byly parametry D_1 - D_5 nastaveny na nulové hodnoty (nebyly použity), byla simulována pouze plynulá tříska bez náznaků segmentace i při rychlosti $v_c = 800$ m/min, což neodpovídalo MKP simulacím ani experimentu. V doposud publikovaných dokumentech vztahujících se k SPH simulacím obrábění tyto parametry nikdy nebyly použity, protože bylo využíváno přirozeného „obtékání“ částic kolem nástroje, které je pro SPH metodu charakteristické.

S využitím parametrů porušení dle Johnson-Cooka a se simulací segmentace třísky byla spojena nutnost omezit hodnotu přetvoření při porušení materiálu parametrem EFMIN. Pokud byla hodnota parametru EFMIN nastavena na výchozí (nulovou) hodnotu a parametry D_1 - D_5 byly použity, byla simulována pouze segmentovaná tříska i při rychlosti $v_c = 200$ m/min, což opět neodpovídalo výsledkům MKP simulace a experimentu, protože v počáteční fázi obrábění při řezné rychlosti $v_c = 200$ m/min byla pozorována plynulá tříska. S ohledem na to, že není stanoven postup, jakým způsobem má být hodnota EFMIN určena (a vzhledem k možným kombinacím materiálu obrobku a nástroje, geometrie nástroje a řezných podmínek to zřejmě ani není možné), byla na základě metody pokusů a omylů nastavena na hodnotu 0,65. Simulovaný tvar třísek poté velmi dobře odpovídal referenčním tvarům popisovaným v publikaci [8]. Je ale nutné zmínit, že zavedení

parametru EFMIN do výpočtu představuje umělý zásah do simulace, který byl korigován pouze porovnáním tvaru třísek s výsledky referenční MKP simulace a experimentu. Jednalo se tedy o opačný postup než v ideálním stavu, kdy by nejprve měla proběhnout simulace, a až poté fyzický experiment.

Je pravděpodobné, že vliv na segmentaci třísky má i rozteč mezi jednotlivými SPH částicemi a nastavení parametrů vyhlazovací délky. Hypotéza, že při vhodné volbě zmíněných parametrů by nebylo nutné používat parametry porušení D_1 - D_5 ani parametr EFMIN, by měla být dále prověřována. Na základě výsledků současných simulací se přesnou závislost mezi jednotlivými parametry a vlivem na tvar třísky nepodařilo určit.

6.2.2 SPH simulace vrtání

Druhý popisovaný případ SPH simulace se týkal aplikace na simulaci procesu vrtání oceli ČSN 12 050 pomocí nového prototypu dvoubřitého vrtacího nástroje s vnitřním odvodem třísky.

Z hlediska silového zatížení a tvaru třísky potvrdila SPH simulace, že u Vrtáku 1 dochází vlivem výbrusu na čele k zadržování třísky (SPH částic), což vedlo ke zvyšování posuvové síly F_f a řezného momentu M_c . Oproti tomu u Vrtáku 2 (vrtací hlavice bez výbrusu na čele) simulace prokázala o cca 50 % nižší hodnoty maximální posuvové síly než u Vrtáku 1. Rovněž hodnoty plastického přetvoření byly díky absenci výbrusu na čele u Vrtáku 2 nižší v průměru o 31 % oproti Vrtáku 1.

Všechny zde prezentované simulace vrtání byly prováděny s roztečí SPH částic 0,8 mm. Hodnota rozteče SPH částic u simulace vrtání, kromě toho, že ovlivňuje kvalitu simulované třísky, má významný vliv na dobu trvání simulace. Toto bylo jedním z rozhodujících faktorů při tvorbě geometrie SPH modelu obrobku. Při nastavování vzdálenosti mezi SPH částicemi by vždy měla být zohledněna velikost posuvu na zub – rozteč SPH částic by měla mít takovou hodnotu, aby byla simulovaná tříska tvořena dostatečným počtem částic (např. alespoň 5-10 částic na tloušťku třísky h_D , přesný počet ale není nijak stanoven a je nutné jej určit individuálně pro každou simulaci). U SPH simulace ortogonálního řezání lze tuto podmínku splnit poměrně jednoduše, aniž by došlo k zásadnímu navýšení počtu SPH částic, a tím pádem k významnému prodloužení doby simulace. U SPH simulace vrtání je situace odlišná. Rozteče SPH částic se mohou (pokud by měla být splněna podmínka dostatečného počtu částic na tloušťku třísky) pohybovat řádově v setinách i tisícinách mm, což má zásadní vliv na navýšení počtu SPH částic a výpočetního času. Při každém zmenšení rozteče na polovinu původní hodnoty vzroste počet částic dle mocninné funkce. Např. u krychle o straně 10 mm a výchozí rozteči 1 mm budou hodnoty počtu částic postupně 1000, 8000, 64000 apod. Výpočetní čas tak může podle druhu simulace a použitých nastavení snadno dosáhnout stovek až tisíců hodin, protože cca 98% času je věnováno právě zpracování SPH částic.

Z výše uvedených důvodů byla pro simulace vrtání použita relativně velká rozteč SPH částic 0,8 mm. Toto nastavení mělo vliv na tvar třísky a s největší pravděpodobností i na průběhy posuvových sil a řezných momentů, kdy nástroj vykonával část pohybu nad „vrstvou“ dalších SPH částic, což se mohlo projevit dočasným poklesem uvedených veličin. Simulované výsledky by vlivem uvedeného nastavení měly být hodnoceny spíše z globálního hlediska (velikosti posuvových sil a momentů, celkový tvar třísek, rozložení redukovaného napětí), zatímco pro podrobnější zkoumání utváření třísek by bylo nutné snížit rozteč částic.

Dle získaných poznatků se tak u SPH simulací vrtání jeví jako nejpálčivější problém výkonnost výpočetního hardwaru, na kterou má přímý vliv počet generovaných SPH částic. U simulací vrtání navíc nelze využít symetrii modelu, která by počet částic snížila např. na polovinu nebo čtvrtinu původních hodnot. Obecně lze pro zkrácení výpočtového času použít rychlejší řezné podmínky, nicméně tato volba má přímý vliv na simulované výsledky a finální simulace by vždy měla být provedena se skutečnými řeznými podmínkami.

Jako další možnost pro alespoň částečné omezení počtu generovaných částic a zkrácení výpočtového času se jeví párování SPH částic s MKP elementy. MKP elementy by byly použity v části obrobku, ve které by nástroj neodebíral materiál, a mohly by mít tudíž mnohem větší délku strany v porovnání s roztečí SPH částic. SPH částice s menší hodnotou rozteče by navíc mohly být umístěny pouze v určitém, obloukovém úseku obrobku, čímž by mohlo dojít k dalšímu snížení jejich počtu. Bylo by ale možné simulovat tvorbu třísky pouze ve zmíněném obloukovém úseku obrobku. Při velmi malých roztečích SPH částic je nárůst výpočetního času ale i tak velmi výrazný.

I přes zmíněné komplikace, které naznačují, jaké oblasti SPH simulací vrtání by měly být dále studovány, lze popisovanou SPH simulaci vrtání považovat za úspěšnou – podařilo se sestavit základní simulační model vrtání a pro dané podmínky simulovat utváření třísky. Podobná simulace nebyla, alespoň dle současných informací z vědeckých databází, pro SPH metodu doposud publikována.

Aktuálnost zvoleného tématu SPH simulací třískového obrábění byla potvrzena prezentací dílčích výsledků výzkumu ([30]) na mezinárodní konferenci „14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations” konané 13.-14. června 2013 v Italském Turíně.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HUMÁR, A. TECHNOLOGIE I, TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 2. část. Studijní opory pro magisterskou formu studia. *Odbor technologie obrábění: Ústav strojírenské technologie: FSI, VUT v Brně*. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003. [cit. 14. 4. 2009]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-2cast.pdf.
- [2] BIERMANN, D., KERSTING, M. a KESSLER, N. Process Adapted Structure Optimization of Deep Hole Drilling Tools. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* [online]. 2009, roč. 58, č. 1, s. 89-92 [cit. 28. 6. 2010]. ISSN 0007-8506. DOI: 10.1016/j.cirp.2009.03.102. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850609000407>.
- [3] PÍŠKA, M. a HUMÁR, A. Testování PVD povlaků na rychlořezných vrtácích (1. část). *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2001, roč. 10, s. 58-61 [cit. 15. 3. 2010]. ISSN 1212-2572.
- [4] PÍŠKA, M. a HUMÁR, A. Testování PVD povlaků na rychlořezných vrtácích (2. část). *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2001, roč. 11, s. 61-63 [cit. 15. 3. 2010]. ISSN 1212-2572.
- [5] VILČEK, I. a POSKOČILOVÁ, A. Monitoring Tool Conditions For Drilling. *8th International Conference – Advanced Manufacturing Operations* [online]. Kranevo: AMO Society, 2008. [cit. 8. 6. 2009]. Dostupné z: <http://amo.dmt-product.com/amo08/pdfamo08/11.pdf>.
- [6] ÖZEL, T. a ZEREN, E. Finite Element Method Simulation of Machining of AISI 1045 Steel With A Round Edge Cutting Tool. *Proceedings of 8th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations* [online]. 2005, s. 533-542 [cit. 12. 6. 2010]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?rep=rep1&type=pdf&doi=10.1.1.128.2799>.
- [7] PANTALÉ, O., BACARIA, J. L., DALVERNY, O., RAKOTOMALALA, R. a CAPERAA, S. 2D and 3D Numerical Models of Metal Cutting With Damage Effects. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* [online]. 2004, roč. 193, č. 39-41, s. 4383-4399 [cit. 7. 6. 2009]. ISSN 0045-7825. DOI: 10.1016/j.cma.2003.12.062. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V29-4CMYR02/2/8667152417cc14430c4427e8206895ae>.
- [8] MABROUKI, T., GIRARDIN, F., ASAD, M. a RIGAL, J. F. Numerical and experimental study of dry cutting for an aeronautic aluminium alloy (A2024-T351). *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2008, roč. 48, č. 11, s. 1187-1197 [cit. 9. 9. 2012]. ISSN 08906955. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2008.03.013. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695508000631>.

- [9] ROUD, P., ZETEK, M., ČESÁKOVÁ, I., SKLENIČKA, J. a KOŽMÍN, P. Using of FEM for Chip Formation and Cutting Force Prediction when Drilling Tool Steel AISI D3. *MM Science Journal* [online]. 2011, s. 236-239 [cit. 8. 4. 2011]. ISSN 1805-0476. Dostupné z: http://www.mmscience.eu/archives/MM_Science_201102.pdf.
- [10] KOVÁR, L. *Hodnocení deformačního chování materiálu při řezání na základě stability a nestability plastické deformace a smykového napětí v primární oblasti plastické deformace*. Brno: VUT FSI, 2002. 94 s. Disertační práce. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Bohumil BUMBÁLEK, CSc.
- [11] AVALLONE, E. A., BAUMEISTER, T. a SADEGH, A. M. *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers*. 11th edition. New York: McGraw-Hill, 2007. 1800 s. ISBN 978-0-07142-867-5.
- [12] CHILDS, T. H. C., MAEKAWA, K., OBIKAWA, T. a YAMANE, Y. *Metal Machining – Theory and Applications*. Elsevier, 2000. 435 s. ISBN 978-0-340-69159-5.
- [13] DOLINŠEK, S. Work-hardening in the drilling of austenitic stainless steels. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2003, roč. 133, č. 1-2, s. 63-70 [cit. 23. 3. 2012]. ISSN 0924-0136. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00245-5. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013602002455>.
- [14] LANGELLA, A., NELE, L. a MAIO, A. A torque and thrust prediction model for drilling of composite materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [online]. 2005, roč. 36, č. 1, s. 83-93 [cit. 26. 2. 2013]. ISSN 1359-835X. DOI: 10.1016/j.compositesa.2004.06.024. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X04001770>.
- [15] LIU, G. R. a LIU, M. B. *Smoothed Particle Hydrodynamics: a meshfree particle method*. New Jersey: World Scientific Publishing, 2003. 449 s. ISBN 98-123-8456-1.
- [16] MONAGHAN, J. J. Smoothed particle hydrodynamics. *Reports on Progress in Physics* [online]. 2005, roč. 68, č. 8, s. 1703-1759 [cit. 19. 7. 2011]. ISSN 0034-4885. DOI: 10.1088/0034-4885/68/8/R01. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0034-4885/68/i=8/a=R01?key=crossref.c562820df517a049ca7f11d0afe49b4>.
- [17] CHONG, S., LIDA, Z. a WANSHAN, W. Simulation Research on Cutting Process of Single Abrasive Grain. *Advanced Materials Research* [online]. 2011, roč. 239-242, s. 3123-3126 [cit. 16. 5. 2012]. ISSN 1662-8985. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.239-242.3123. Dostupné z: <http://www.scientific.net/AMR.239-242.3123>.

- [18] ZANG, M. Y., CHEN, H. a LEI, Z. Simulation on High Velocity Impact Process of Windshield by SPH/FEM Coupling Method. *2010 WASE International Conference on Information Engineering: proceedings* [online]. Los Alamitos, Calif: IEEE Computer Society, 2010. [7. 11. 2011]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5571596>.
- [19] SCHWER, L. E. Aluminium Plate Perforation: A Comparative Case Study Using Lagrange with Erosion, Multi-Material ALE, and Smooth Particle Hydrodynamics. *7th European LS-DYNA Conference* [online]. Salzburg: DYNAMore GmbH, 2009. [cit. 27. 4. 2012]. Dostupné z: <http://www.dynalook.com/european-conf-2009/J-I-01.pdf>.
- [20] LIMIDO, J., ESPINOSA, C., SALAÜN, M. a LACOME, J. L. SPH method applied to high speed cutting modelling. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 2007, roč. 49, č. 7, s. 898-908 [cit. 11. 12. 2011]. ISSN 00207403. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2006.11.005. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020740306002712>.
- [21] VILLUMSEN, M. F. a FAUERHOLDT, T. G. Simulation of Metal Cutting using Smoothed Particle Hydrodynamics. *7. LS-DYNA Anwenderforum* [online]. Bamberg: DYNAMore GmbH, 2008. [cit. 26. 6. 2011]. Dostupné z: <http://www.dynamore.de/de/download/papers/forum08/dokumente/C-III-02.pdf>.
- [22] ESPINOSA, C., LACOME, J. L., LIMIDO, J., SALAÜN, M., MABRU, C. a CHIERAGATTI, R. Modelling High Speed Machining with the SPH Method. *10th International LS-DYNA Users Conference* [online]. Detroit: Livermore Software Technology Corporation, 2008. [cit. 7. 8. 2011]. Dostupné z: <http://www.dynalook.com/international-conf-2008/MetalForming3-2.pdf>.
- [23] GALLET, C. a LACOME, J. L. S.P.H.: A Solution to Avoid Using Erosion Criterion? *Papers submitted personally by authors*. DYNALook, 2002. [cit. 24. 1. 2013]. Dostupné z: <http://www.dynalook.com/Personally/60.pdf>.
- [24] ISBILIR, O. a GHASSEMIEH, E. Finite Element Analysis of Drilling of Titanium Alloy. *Procedia Engineering* [online]. 2011, roč. 10, s. 1877-1882 [cit. 31. 8. 2011]. ISSN 1877-7058. DOI:10.1016/j.proeng.2011.04.312. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705811005005>.
- [25] OZCELIK, B. a BAGCI, E. Experimental and numerical studies on the determination of twist drill temperature in dry drilling: A new approach. *Materials & Design* [online]. 2006, roč. 27, č. 10, s. 920-927 [cit. 31. 8. 2011]. ISSN 0261-3069. DOI:10.1016/j.matdes.2005.03.008. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306905000798>.
- [26] GARDNER, J. D. a DORNFELD, D. Finite Element Modeling of Drilling Using DEFORM. *Consortium on Deburring and Edge Finishing, Laboratory*

- for Manufacturing and Sustainability, UC Berkeley* [online]. 2006, s. 1-9 [cit. 25. 4. 2013]. Dostupné z: <http://escholarship.org/uc/item/9xg0g32g>.
- [27] PALANI, V. *Finite Element Simulation of 3D Drilling in Unidirectional CFRP Composite*. Madras: University of Madras, 2006. 99 s. Diplomová práce. University of Madras, India. Vedoucí diplomové práce prof. Dr. Behnam Bahr.
- [28] ASAD, M. *Elaboration of concepts and methodologies to study peripheral down-cut miling process from macro-to-micro scales*. Lyon: INSA-Lyon, 2010. 125 s. Disertační práce. Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures. Vedoucí disertační práce Tarek MABROUKI, Jean-François RIGAL.
- [29] BOŘKOVEC, J. *Výpočtová simulace procesu dělení materiálu*. Brno: VUT FSI, 2008. 84 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Jindřich PETRUŠKA, CSc.
- [30] MADAJ, M. a PÍŠKA, M. On the SPH Orthogonal Cutting Simulation of A2024-T351 Alloy. *Procedia CIRP* [online]. 2013, roč. 8C, s. 151-156. ISSN 2212-8271. DOI: 10.1016/j.procir.2013.06.081.

ŽIVOTOPIS AUTORA

Osobní údaje

Jméno a příjmení: Martin Madaj
Datum narození: 7. 8. 1982
E-mail: madaj@fme.vutbr.cz

Vzdělání

2006-2013: Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně: doktorské studium, obor Strojírenská technologie.
2001-2006: Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně: magisterské studium, obor Dopravní a manipulační technika, specializace Stavební, transportní a zemědělské stroje. Ukončení studia – státní závěrečná zkouška.
1997-2001: Střední průmyslová škola, Frýdek-Místek, obor Strojírenství. Ukončení studia – maturita.

Certifikace

Autodesk Inventor 2012 Certified Professional
Autodesk Inventor 2012 Certified Associate
Autodesk Approved Instructor

Zaměstnání a pracovní zkušenosti

08/2013-dosud: CAD Studio a.s.: technický konzultant.
2012-07/2013: Centrum podpory projektů, VUT v Brně: lektor CAD softwaru.
10/2011-12/2011: Roper Engineering, s.r.o.: externí konzultant pro Autodesk Inventor.
2007-07/2013: Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie – Odbor technologie obrábění: technicko-hospodářský pracovník, asistent, pedagogický pracovník.
2005-2008: Institut celoživotního vzdělávání VUT v Brně: příprava výukových materiálů v oblasti CAD/CAM/CAE.
2004-2010: Tech Data Distribution, s.r.o., Amden, s.r.o., Pythagoras, s.r.o., Idealab, s.r.o.: příprava článků zaměřených na produkty fy Autodesk pro portál www.24hdesign.cz, později www.autodeskclub.cz; překlady technické dokumentace a marketingových materiálů z anglického jazyka do češtiny pro produkty fy Autodesk.

- 07/2005-05/2006: J+P BASE, s.r.o.: technický pracovník zejména pro tvorbu výkresové dokumentace zvedacích plošin a hydraulických výtahů.
- 2002-07/2013: Computer Agency, o.p.s.: lektor pro produkty Autodesk Inventor, Edgecam, AutoCAD, MechSoft; spolupráce na vzdělávacích projektech.
- 07/2001-09/2001: HUTNÍ PROJEKT Frýdek-Místek, a.s.: kresličské práce v programu AutoCAD.
- 07/2000: Slévárna SPECIAL, s.r.o.: krátkodobá brigáda ve slévárenském provozu.

ABSTRAKT

Dokument pojednává o návrhu vrtacích nástrojů za pomoci CAD a CAE technologií. Nejprve jsou stručně nastíněny různé postupy tvorby 3D modelů vrtacích nástrojů, zmíněny možnosti měření jejich silového zatížení při vrtání, je uveden popis mechanismu tvorby třísky a následně je prezentován přehled nejpoužívanějších explicitních (síťových) metod konečných prvků využívaných pro simulace obrábění. Pro tuto práci byla vybrána bezsíťová metoda SPH, která i přes to, že je schopna velmi dobře zvládat velké deformace a přetvoření materiálu, není pro simulace obrábění téměř využívána a v dostupných publikacích lze nalézt pouze informace týkající se simulací ortogonálního obrábění. Demonstrována je na příkladu simulace ortogonálního obrábění hliníkové slitiny A2024-T351, která zároveň slouží jako výchozí bod pro simulace vrtání pomocí metody SPH. Následuje popis návrhu, simulací a testování prototypů nových vrtacích nástrojů – tříbřitých a dvoubřitých vrtáků s vnitřním odvodem třísky, přičemž podrobněji se dokument zaměřuje na dvoubřitou variantu s monolitní vrtací hlavicí. Pro tento typ nástroje byla provedena i SPH simulace vrtání, která odhalila některé nevýhody dané metody spojené s požadavkem na přesnější simulaci tvaru třísky, a to sice prudký nárůst počtu SPH elementů a následné, v některých případech zásadní prodloužení výpočtového času. Podklady týkající se dvoubřitých vrtacích nástrojů byly poté využity pro tvorbu přihlášky vynálezu.

ABSTRACT

This document deals with the development of drilling tools by means of CAD and CAE technologies. At first, a brief overview of various design procedures of 3D drill models is presented, possibilities of measurement of force and moment loading during drilling are mentioned, a chip formation mechanism is briefly described and then a list of commonly used explicit (mesh) finite element methods used for cutting simulations is presented. A meshless SPH method have been selected for this work. Although it is able to handle the large deformations easily, it has been used for cutting simulations very rarely and only an orthogonal cutting simulations related information can be found in scientific databases. It has been demonstrated on the orthogonal cutting simulation of A2024-T351 alloy that was also the starting point for SPH simulation of drilling. The following is a description of the design, simulation and prototyping of new drilling tools – drills with three and two cutting edges and an internal chip channel. This document is focused in detail on the variant with two cutting edges for which SPH drilling simulation has also been performed. Some drawbacks related to more precise chip simulation demands have been revealed, especially a rapid increase in number of SPH elements followed with prolongation of a computational time. Information related to the design of the drilling head with two cutting edges were then used to create the patent application.