



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

IMPLEMENTATION AND APPLICATION OF THE EDGE- MATERIAL PAIR METHODOLOGY AT ORBITAL DRILLING

IMPLEMENTACE A APLIKACE METODY PÁROVÁNÍ OBRÁBĚNÝCH MATERIÁLŮ A BŘITŮ PŘI
ORBITÁLNÍM VRTÁNÍ

MASTER'S THESIS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTHOR

AUTOR PRÁCE

Bc. Alan Saillet

SUPERVISOR

VEDOUCÍ PRÁCE

**Prof. Ing. Miroslav Píška, CSc;
Assoc. Prof. Guillaume Fromentin.**

BRNO 2018

Master's Thesis Assignment

Institut: Institute of Manufacturing Technology
Student: **Bc. Alan Saillet**
Degree programm: Industrial Engineering
Branch: Industrial Engineering
Supervisor: **prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.**
Academic year: 2017/18

As provided for by the Act No. 111/98 Coll. on higher education institutions and the BUT Study and Examination Regulations, the director of the Institute hereby assigns the following topic of Master's Thesis:

Implementation and application of the edge-material pair methodology at orbital drilling

Brief description:

A deepening of the inverse identification method, especially at the aspects related to the angular synchronization of modelled forces and experimental forces. A design of the experimental procedure allowing efficient identification of the angular tool positions according to the cutting coefficients. Experimental works enabling to realize an abacus of the coefficients of cut for standard edge geometries and for a material representative of the materials machined in aeronautics. An extension of the modelling to the orbital drilling, an adaptation to classical or vibratory drilling operations.

Master's Thesis goals:

- Analyses of the model tools used in helical milling.
- Enhancement of the model of milling forces in a simple operation.
- A definition of a method for angular synchronization of the modelled and experimental forces.
- A simulation of a helical milling using coefficients from a simple milling operation.
- A modelling of the orbital drilling, and its adaptation to a classical or a vibratory drilling operation.

Recommended bibliography:

BISSEY, S., POULACHON, G., LAPUJOLADE, F. Modelling of tool geometry in prediction of cutting forces during milling of hard materials. *Machining Science and Technology*. 2005, 9, pp. 101-115.

BISSEY, S. Développement d'un modèle d'efforts de coupe applicable à des familles d'outils: cas du fraisage des aciers traités thermiquement. Cluny, ENSAM, 2005.

BUDAK, E., ALTINTAS, Y., ARMAREGO, E. J. A. Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 1996, 118, pp. 216-224.

DENKENA, B., TRACHT, K., CLAUSEN M. Predictability of milling forces based on specific cutting forces. *Proceedings of the 8th CIRP workshop on modelling of machining operations*. Chemnitz, Germany, 2005. pp. 259-266.

CAMPOCASSO, S., POULACHON, G., BISSEY-BRETON, S., COSTES, J. P., OUTEIRO, J. C. Influence of Machining on the Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Behaviour of a Low Carbon Martensitic Stainless Steel. *Procedia CIRP*. 2016, 46. pp. 331-335.

GERMAIN, D., FROMENTIN, G., POULACHON, G., BISSEY-BRETON, S. From large-scale to micromachining: A review of force prediction models. *Journal of Manufacturing Processes*. 15(3), 2013. pp. 389-401.

OUTEIRO, J. C., ASTAKHOV, V. P. The role of the relative tool sharpness in modelling of the cutting proces. *Proceedings of the 8th CIRP workshop on modelling of machining operations*. Chemnitz, Germany, 2005, pp. 517-523.

IYER, R., KOSHY P., NG, E. Helical milling: an enabling technology for hard machining precision holes in AISI D2 tool steel. *Int J Mach Tools Manuf*. 2007, 47(2), 205–210.

LI, H., HE, G., QIN, X., WANG, G. Tool wear and hole quality investigation in dry helical milling of Ti-6Al-4V alloy. *Int J Adv Manuf Technol*. 2014, 71(5-8), 1511–1523.

LI, Z., LIU, Q. Surface topography and roughness in hole-making by helical milling. *Int J Adv Manuf Technol*. 2012, 66, 1415–1425.

Students are required to submit the thesis within the deadlines stated in the schedule of the academic year 2017/18.

In Brno, 15. 12. 2017



prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
Director of the Institute



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
FME dean

Úvod

Obchod a produkty společnosti

HAM Francie Andreas Maier je výrobce standardních a speciálních řezných nástrojů: nástrojů pro vrtání, frézování, vyvrtávání a více nedávno nástrojů speciálně konstruovaných pro orbitální vrtání. Firma byla založena v roce 1982, jako součást německé skupiny HAM ANDREAS MAIER GmbH. Nachází se v Haute-Savoie, v blízkosti údolí Arve, kde více než tisíc malých a středních firem vyrábí téměř 60 % nástrojové produkce pro soustružení. V roce 2016 dosáhla společnost obrátu 6 576 200 €. Společnost zaměstnává 47 zaměstnanců. HAM Francie distribuuje nástroje z produkce mateřské společnosti pro francouzský trh, ale také vyrábí ve svých závodech také celokarbidové nástroje a nástroje z PCD dvou typů:

- standardní nástroje pro přesnou mechaniku, elektroniku a zdravotnickou techniku,
- speciální nástroje, které představují největší trh pro společnost.

Společnost rovněž poskytuje služby pro přebroušení nástrojů. Společnost je certifikována podle ISO 9001 (verze 2008) od AFAQ, které zaručují vysoce kvalitní průmyslové produkty a umožňují přístup k odvětví automobilového a leteckého průmyslu. Společnost je partnerem významných kosmických výrobních skupin jako Airbus nebo ASCO Industries, s automobilovými partnery, například PSA a mnoha subdodavatelů hlavních značek. Tato partnerství jsou důležitá, protože zajišťují velké pracovní objemy zakázek. Úkolem je rozvíjet nástroje, splňující komplexní požadavky klientů - obrábění žárovzdorných slitin, jakož i sendvičových konstrukcí s často úzkými tolerancemi.

Krátká historie

- 1982: vznik společnosti
- 1995: orientace na výrobu speciálních nástrojů s vytvořením speciálních dílen, zaměstnává 19 osob
- 2000: společnost obdržela certifikaci ISO 9001 AFAQ
- 2016: testovacího zařízení se otevře pro výzkum a vývoj, v pronájmu pana Dr. Florian Barelliho.

PRACARTIS skupina HAM Francie potlačila místní konkurenci tím, že se rozhodla spolupracovat s HAM Francie Medical, Precise France SAS, Carbilly SA, Diamond concept SARL pod názvem skupina PRACARTIS, vytvořená v roce 2016. Existuje pět hlavních programů pro spolupráci při zachování původních zaměření firem.

Průmyslový význam této práce Pro zlepšení nástrojové geometrie se musí rozumět procesu odebrání třísek, zejména pro složité operace. Tloušťka nedeformované tloušťky třísky se záběrem ve šroubovici je mnohem těžší pro modelování než při frézování do rohu nebo frézování drážek. To je způsobeno tím, že obrobený povrch není generován jedním zubem, ale je to komplexní povrch vytvořený několika zuby. Kromě toho se pro nástroj a účel optimalizace procesu musí brát v úvahu komplexní geometrie bříty. Proto je nutné použití modelu výpočtu řezné síly, který není závislý na geometrii nástroje. Za tímto účelem je nutné modelovat řezné síly pro většinu operací tří-osého frézování s komplexní nástrojovou geometrií, trajektorií a použít je pak i pro orbitální vrtání.

Zobecněná parametrizace frézování stopkovou frézou

Pro 3-osé frézování se používá široká škála břitů se skloněnými zuby či zuby ve šroubovici. Nástrojová parametrizace je klíčovým prvkem pro přesné modelování frézovacích sil. V některých případech dokonce každého zubu frézy může mít jinou geometrii. Geometrie frézovaných ploch je dána obálky frézování a čelní plochou břitu podél ostří [13]. Vyjádřením obáلكových ploch a rovnic čelních ploch lze pak vypočítat souřadnice každého bodu ostří. Použití empirických modelů pro predikci síly také vyžaduje výpočet lokálních úhlů břitu, což může být řešeno geometricky.

Parametrizace profilu frézy Parametrizace profilu frézy je založena na modelu vyvinutém Enginem et al. [11]. Hlavním myšlenkou tohoto modelu je použití parametru z , tzn. axiální osové souřadnice v referenčním souřadnicovém systému nástroje. Tato metoda nepovoluje stejné souřadnice pro různé body břitu nástroje v tomto axiálním směru. Uvažujeme-li čisté válcovou stopkovou frézu s určitým počet bodů vedlejšího ostří, pak mají všechny stejné axiální souřadnice. Použití parametru z není omezeno pro vrtáky, ale většina fréz stopkových fréz má úhel r takový, že alespoň dva body budou mít stejné souřadnice z . U rovinných frézovacích operací to není problém, protože vedlejší ostří se používá částečně pouze u špičky zubu. U tří-osých frézovacích operací, například frézování ve šroubovici, má však daleko větší význam. Tento rozdíl je způsoben axiálním posuvem. Pro všechny tyto důvody byl model uzpůsoben pro aplikace v tří-osých frézovacích operacích. Použití parametru r , definovaného jako radiální souřadnice v referenčním prostoru zubu, je nevhodné. Proto byl zvolen parametr s , definovaný jako křivočará úsečka. Vzhledem k tomu, každý bod profilu frézy má jedinou křivočarou úsečku a tato křivočará úsečka odpovídá jednomu bodu profilu, pak použití parametru s umožňuje účinnou funkci pro parametrizaci profilu frézy. Kromě toho geometrické vstupní parametry byly také změněny. Souřadnice C středu žebra zubu již nejsou geometrickým parametrem, ale jsou počítány pomocí tečny k zaoblení a vedlejšímu ostří na straně jedné a mezi tímto zaoblením a hlavním ostřím na straně druhé. Nový model také umožňuje modelovat zkosené kuželové frézy. Další segment byl přidán do nástrojového modelu pro břity vedoucí k ose rotace nebo pro zkrácené ostří, protože v některých případech frézování ve šroubovici břity odebírají materiál téměř až k ose frézy [25]. V modelu vyvinutém v této studii je uveden profil frézy podle průměru každého zubu, délky nástroje, který je potřeba modelovat, úhlů vedlejšího ostří a postavení zubových segmentů, zahrnujících hlavní i vedlejší ostří, poloměr zaoblení břitu, zkosení, délku a úhel zkosení i vrcholový úhel frézy. Z těchto parametrů jsou vypočítané souřadnice hlavních bodů profilu frézy. K parametrizaci profilu frézy jsou na geometrické segmenty použity lineární a kruhové interpolace. Nicméně výběr parametru není snadné definovat. Několik bodů mají stejné parametry z nebo r . Je-li úhel nastavení vedlejšího břitu ostří nula a úhel hlavního ostří se rovná 90° , pak teoreticky nekonečný počet bodů má společné souřadnice a není možné dát výpočtové funkce profilu parametrizovat použitím parametrů r a z . Pro řešení tohoto problému se musí použít křivočarých úseček.

Parametrizace hlavní čelní plochy Parametrizování čelní plochy je založen na pracích Fromentina a Poulachona [13].

Některé nástroje frézy mají rovinný povrch na vedlejší ostří, který se získává během broušení. V závislosti na velikosti tohoto povrchu to lze považovat za čelní plochu, nebo jako zkosení hrany. Je-li tloušťka třísky v této zóně mnohem menší než délka sražení, je tento povrch považován za čelní plochu. V některých případech má sklon čelní plochy a geometrie drážky vliv na vedlejší geometrii břitu. Pro lepší přesnost modelu tyto faktory musí být vzaty v úvahu. Protože čelní plocha zahrnuje hlavní i vedlejší břit, určuje úhly obou břitů. Pojem "hlavní čelní plocha" bude zahrnovat hlavní i vedlejší břit, ale je určena i zakřivením drážky frézy.

Parametrizace vedlejší čelní plochy Vedlejší čelní plocha je modelována jako rovina orientovaná svým normálovým vektorem a jejím posunem vůči špičce zubu.

Hlavní čelní plocha generující křivkovou parametrizaci Hlavní čelní plocha je parametrická plocha definovaná pomocí křivky profilu hlavního břitu a šroubovice. Tento profil je generován pomocí brusného kotouče při broušení drážky. Některé modely dávají profil této drážky brusného kotouče profilu a technologické parametry. Tyto modely jsou založeny na geometrických, logických a analytických přístupech [10, 23]. V kontextu současné studie tyto modely nelze použít, protože geometrie brusného kotouče geometrie není někdy přesně známá, když se nástrojem reálně brousí drážka. Nicméně existují algoritmy, které umožňují vypočítat parametry operace a broušení geometrie těchto kol pro daný návrh profilu frézy [19]. V tomto případě profil frézy je navržen jako blízký CAD

souborům nástrojů z produkce HAM France. Profil velké čelní plochy je definován v rámci referenčního zubu v rovině souřadnice $z = 0$. Úhel čela hlavního břitu, používaný v profilu programu je úhel čela naprogramovaný během broušení nástroje. Tento úhel odpovídá ortogonálnímu úhlu čela s úhlem nastavení hlavního břitu rovného 90° (může to být také nástrojový vedlejší úhel nastavení, není to však často používáno). Toto se používá pro vytvoření geometrie břitu; jeho hodnota se však v jednotlivých bodech liší. Profil frézy je považován za kruhový a je vymezen jeho poloměrem. Konečně některé nástroje mají čelní plochy posunuté z původní pozice o hodnotu odsazení. Všechny hodnoty profilu frézy jsou uvedeny v CAD souborech, takže tento model je blízký metodice použité pro konstrukci nástroje firmou HAM Francie. Z těchto parametrů jsou vypočítané souřadnice hlavní body generující pak křivky. Rovnice generování křivky přidružené k profilu čela frézy se pak získávají jako lineární interpolace mezi těmito body.

Parametrizace hlavního čela První musí být namodelována tvořící křivka (šroubovice). Stoupání drážky je dáno úhlem stoupání šroubovice. To musí být zadáno pomocí parametrických rovnic šroubovice. Pak lze jednotlivé body čelní plochy vyjádřit pomocí radiálních souřadnic r a z .

Parametrizace skutečné hlavní a vedlejší čelní plochy po broušení V této studii, je generována stopková fréza pomocí parametrického modelování s dvěma komplementárními přístupy: strukturálním a technologickým [23]. Strukturální přístup slouží ke generování drážky z profilu hlavní čelní plochy, zatímco technologický slouží ke generování menší čelní plochy, modelování roviny broušené brusným kotoučem. Povrch nástroje tak obsahuje hlavní a dílčí čelní plochy. Nejdříve je vypočítávána pozice bodu na hlavní čelní ploše spojené s parametry r a z . Pak se tento bod promítá v tangenciální směru referenčního prostoru zubu na vedlejší čelní plochu. Označení parametru pro projekci dává relativní pozici obou povrchů pro uvažované parametry r a z . Je-li vedlejší čelní plocha za hlavní čelní plochou, pak můžeme odvodit, že materiál na velké čelní ploše v tomto okamžiku byl odstraněn při generování menší čelní plochy. Proto je tento povrch spojený s parametry r a z vedlejší čelní plochy. Je-li vedlejší čelní plocha před hlavní čelní plochou, pak bude tento bod odpovídat hlavní čelní ploše. Kromě toho menší čelní plocha má omezenou výšku, takže projekce není počítána pro body nad tuto výšku plochy vymezené vedlejší čelní rovinou.

Parametrizace ostří Ostří se objevuje po broušení drážky a čelní plochy. Proto ostří je definováno jako průsečnice mezi povrchem obálky plochy drážky a čelní plochy [13].

Obecné frézovací trajektorie pro 3-osé frézovací operace zahrnující odchyšky nástroje z řezu

Homogenní souřadnice dávají možnost k popisu rotace a posuvů pomocí referenčních rámců [6, 8]. Změny referenčních rámců jsou získávány homogenními multiplikacemi matic. Výhodou této metody ve srovnání s jinými metodami je vypočítat rotace a translace stejnými základními rovnicemi. Z tohoto důvodu se používají v této studii tzv. homogenní souřadnice.

Model odchylek nástroje Odchyšky polohy nástroje mají významný vliv na řezné síly. Odchyška polohy nástroje vedou k posunutí ostří z jejich teoretických poloh. Průhyb nástroje by mohl být integrován v modelu, jak byla prezentováno v mnoha výzkumných pracích [24, 20]. Tato studie se však netýká nějakého mikro-frézování, ale solidní karbidové frézy s velkým průměrem, takže průhyb nástroje je zanedbán. Proto se musí brát v úvahu pro frézovací trajektorii přesný model nástroje. Existují dva různé typy házivosti nástroje. První z nich je způsoben excentricitou upnutí mezi nástrojem, držákem nástroje a vřetena. Ve skutečnosti není shodná geometrická osa nástroje s osou otáčení vřetena. Druhý typ házivosti je dán samotným nástrojem. Pro nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami je hlavním problémem ustavování těchto destiček. Pro celokarbidové frézy by mohlo jednat o posun mezi naprogramovanou pozicí brusného kotouče a jeho skutečnou polohou (v důsledku chyby nastavení brousícího kotouče a jeho opotřebením). Tento druh odchylek je v této studii opomíjen a házivost z důvodu upínání je mnohdy hodně důležitější u frézy broušených s vysokou přesností. Házení z důvodu upnutí je dáno úhlem odklonu a jeho délkou.

Trajektorie 3-osých frézovacích operací Trajektorie 3osé frézování je dána posunutím souřadných systémů stroje na osu nástroje (které se mohou lišit od osy vřetena z důvodu házení) až na korekce jednotlivých zubů nástroje. Chceme-li vypočítat lokální polohy břitu, je nutno znát korekce jednotlivých břitů. Pro reálnou polohu je nutno vzít v úvahu polohu každého ostří, jeho úhel břitu, úhel sklonu zubu a úhel čela.

Používané nástroje, jejich roviny a úhly Jelikož je známá skutečná dráha nástroje, skutečné úhly nástroje lze určit pro každou pozici nástroje a v libovolném bodě ostří. Čelní plochy nástroje představují čelní plochy orientované pro pohyb v každé poloze a v každém časovém kroku. Vzhledem k tomu že vše je ovlivněno řeznou rychlostí a také rychlostí posuvu, efektivní rychlost je dána výslednicí těchto pohybů. Nástrojové úhly se pak počítají pomocí nástrojových rovin.

Modelování místních sil obecně frézovací operace

Vzhledem k tomu, že modelování sil při frézování je velmi časté téma, byly vyvinuto mnoho modelů v minulých letech. Tato studie je zaměřena na mechanistické modely s nejlepší shodou. Tyto modely jsou nejčastěji založené na řezné délce a tloušťce nedeformované třísky [15, 3]. Nicméně tyto modely jsou schopny s velkou přesností předvídat ortogonální řezání, ale neumí integrovat břity ve šroubovici úhly čela jako vstupní parametry. Proto musí být odchylky sil, respektující tyto variace úhlů, zahrnuty do dalších výpočtových koeficientů.

Model párování materiálu břitu a obrobku Model pro síly při frézování a šikmé řezání byl dříve stanoven [5]. Tento model bere v úvahu šroubovici a úhly čela a je platný pro daný břit, jeho úpravu a daný materiál. Řezná rychlost se nebere v úvahu, protože řezné síly jsou v toto používané pásmo a materiál téměř stejné i při jejich změnách [5, 2]. Výhody tohoto modelu v této studii spočívají v používání stejných koeficientů při různé optimalizaci a tím měnit geometrii nástroje podle požadovaného kritéria. Tímto způsobem by mohly být minimalizovány síly pro zabránění nadměrnému ohnutí při obrábění při použití robota, špičky sil by měly být eliminovány pro ochranu nástroje. Síly při frézování jsou dány vztahy pro:

- silovou komponentu, působící kolmo k čelní ploše,
- silovou komponentu, působící ve směru toku třísek.

Tyto dvě složky jsou uvedeny jako funkce úhly sklonu šroubovice a čela, řezné délky a tloušťky nedeformované třísky.

Modelování frézování do rohu

Modelování frézování do rohu musí být relativně přesné, protože to umožní inverzní identifikaci koeficientů.

Přesný výpočet nedeformované tloušťky třísky pro frézování do rohu/drážek Chcete-li určit vhodnou nedeformovanou tloušťku třísky, lze použít pro rychlé výpočty přibližnou analytickou metodu. Zde použitá metodika je metodologie vyvinutá Fromentinem a Poulachonem [14] pro případ frézování závitů, ale platí i v případě frézování do rohu. Nedeformovaná tloušťka třísky je tloušťka vrstvy materiálu kolmá k řezné rychlosti a hlavnímu ostří, v uvažovaném bodu ostří, před procesem obrábění, která je deformována obráběním v třísku. V případě frézování do rohu nebo drážek je to materiál, vymezený plochou obrobenou předchozím břitem a povrchem materiálu.

Metodika popsaná v této práci používá tuto definici nedeformované tloušťky třísky a geometrické řešení. Nicméně kvůli cykloidní trajektorii ostří, průnik mezi plochou generovanou předchozím zubem a dalším zubem frézy jednoduše nelze analyticky najít. Proto se musí použít numerický přístup. Výhody této metody je, že výpočet je celkem přesný a může brát v úvahu házivost nástroje. Nicméně spotřeba výpočtového času je velmi velká a to je skutečný problém při počítání s jemnou diskretizací oblasti pro každou pracovní pozici nástroje a obráběné místo.

Analytické tloušťka třísky zahrnující házivost nástroje

Analytický model nedeformované tloušťky třísky Chcete-li zkrátit dobu výpočtu, musí být použit analytický model. Model, který byl použit, je vysvětlen v [18]. Tento model umožňuje vzít v úvahu trochoidní dráhy i házivost nástroje. Tento model byl upraven pro model popsaný v této studii a umožňuje výpočet nedeformované tloušťky třísky i úhly nástroje odlišné od 90°. Pro uvážení úhlu břitu lze použít tzv. sinusový model. Tento model dává výborné výsledky na části ostří, které byly generovány jako lineární úseky obálky profilu frézy. Nicméně přesnost tohoto modelu je snížena díky zaoblení břitu. Na zaoblené břity je nutno tedy volit nějaký lepší model. Tento model je zjištěna zvažuje vzdálenost mezi dvěma kruhy, které představují zaoblení dané aktuálním a předchozím zubem.

Hodnocení sinusového modelu V případě tzv. sinusového modelu zůstává malá chyba, s maximální chybou dvou μm na boční části nástroje (při posuv na zub asi 200 μm) a 10 μm zaoblení. Nicméně tento sinusový model nebere v úvahu házivost nástroje. S ohledem na házivost nástroje (0,0104 mm) chyby na boční části nelze opomenout (20 μm). Tedy model nástroje musí být použit včetně znalosti jeho házivosti.

Vyhodnocení Kumanchika modifikovaného modelu [18] Model vyvinutý Kumanchikem [18] umožňuje vzít v úvahu nástroj házení a trochoidní trajektorie. Pomocí tohoto modelu, chyby na boční části nástroje jsou velmi malé ve srovnání s chybami na zaoblení. Je to způsobeno použitým sinusovým modelem $\sin(\kappa_r)$. Chyby na tloušťce třísky u přesného modelu jsou velmi malé, protože nejvyšší chyba je polovina mikrometru zaoblení a desetina mikrometru na boční části. Tento model umožňuje lepší přesnost během modelování frézování sil v drážce i frézování do rohu.

Měření: zpracování signálu S cílem zlepšit kvalitu signálu, bylo použito vyrovnání statistickou metodou klouzavého průměru na střed měření křivky. Naprogramované otáčky jsou známé, ale pro získání přesnějších hodnot skutečných otáček byl použit speciální algoritmus. Tento zahrnuje funkci pro optimalizaci, která je součtem absolutních rozdílů mezi hodnotami sil získaných pro různé okamžiky a různé polohy nástroje a pro dané otáčky (s ohledem na čas). Black-box algoritmy umožňují optimalizaci hodnot funkce s rychlostí otáčení vřetena jako vstupní hodnoty. Tato metoda předpokládá, že minimální rozdíly mezi křivkami teoretických a skutečných hodnot se získají, když je nastavena přesná rychlost rotace vřetena. Kromě toho se dále předpokládá, že rychlost otáčení vřetena je konstantní.

Metoda vynulování úhlů Pokud jde o úhlové nulování, metoda, která byla vybrána, patří do inverzní identifikace. Nicméně tento algoritmus nalezne většinou i lokální minim namísto globálního minima. Z tohoto důvodu je nejlepší způsob pro vnesení naměřených dat a simulovaných síly pomocí počátečních koeficientů. Od tohoto bodu je pak nutné sladit přibližně dvě sady dat, přičemž se zohlední i házivost. Zvláštní funkce lze použít i v algoritmu inverzní identifikace pro zachování parametrů související s úhlovým nulováním v daných mezích. Další metodou spočívá v automatickém vyrovnání špičkových sil. Nejdříve je to počítáno s počátečními hodnotami koeficientů a pak je proces vylepšen zpětnou vazbou s novými koeficienty. Nicméně tato metoda pro změny polohy maxim a odpovídajícími hodnotami koeficientů ne vždy konverguje, ale kolísá kolem určité hodnoty. Je to proto, že metoda vyrovnání pomocí klouzavého průměru filtru mění sklon křivky a pak dojde k chybám [9]. Používá-li se diskontinuální řezání, je nezbytné stanovit intervaly, pro které inverzní identifikace musí být vhodně provedena.

Orbitální vrtání

Přestože orbitální vrtání a frézování ve šroubovici mají podobnou šroubovicovou dráhu, nejsou stejné. Rozdíl se vysvětluje v [21]. Zatímco čelní frézování se provádí tím, že kombinuje pohyb v osách x a y , tak při orbitálním vrtání se používá konkrétní nástroj a šroubovicový pohyb je generovaný mechanickou excentricitou. Orbitální vrtání specifiká umožňuje vyšší rotační rychlosti, tedy nástroj lze také otáčet s vyšší rychlostí a axiální podávací rychlost se taky zvýší.

Hlavní otázky k výpočtu nedeformované tloušťky třísky Výpočet nedeformovaných tlouštěk třísky při orbitálním vrtání je mnohem těžší než při frézování do rohu/drážek. Skutečně, plochy jsou obráběné nejen po předchozím zubu, ale opracování je po celé předchozí orbitální rotaci nástroje. Popravdě řečeno hlavní rozdíl je způsoben axiálním posuvem. Vzhledem k tomu, nástroj musí neustále hlouběji do materiálu, vedlejší ostří již budou řezat materiál, a v některých případech je požadována i vedlejší ostří až do osy nástroje. Některé práce modelovat obrobek tento povrch již byly provedeny a podobně i tloušťky třísek [22]. Nicméně mnoho aproximací bylo provedeno na povrchu již opracovaném pomocí tzv. z -mapování, tj. pomocí nástroje obálky v několika pozicích a po celé délce obrábění až k povrchu. Kromě toho tato metoda umožnila se vyhnout použití úhlu šroubovice, takže břit odpovídal obálce profilu ostří.

Modelování tloušťky nedeformované třísky a obrobku povrchu Ačkoliv parametrické rovnice trajektorie každého segmentu ostří jsou známé, obrobek povrch nemůže být takto přímo odvozen. Proto byla vybrána diskrétní metoda. Ta spočívá v algoritmu „ z -mapování“. Zde jsou dílčí kroky, které popisují tento algoritmus:

- zpočátku je vytvořen soubor bodů, rovnoměrně rozložen v osách x a y . z -souřadnice je dána rovnicí povrchu materiálu před obráběním (například $z = 0$). Každý z řezných břitů se nachází ve své počáteční poloze;

- pro polohu břitu v následujícím okamžiku je možné propojit body špiče ostří s předchozí pozicí a vytvořit rovinný povrch mezi oběma polohami. Takto vznikají trojúhelníkové plochy, které jsou generovány mezi oběma polohami břitů přibližně obrobeného povrchu od poslední polohy ostří (s jistou chybou následkem použití lineární interpolace);
- jakmile je znám přibližný obrobeného povrchu mezi aktuální a předchozí pozicí, projekce každého bod z mapy je vypočítávána na vytvořený povrch. Každý bod z-mapy je spojen s povrchem pro oblast kolem každého trojúhelníku a je tím je dán algoritmus pro mnohoúhelník [12];
- konečně, pokud průmět tohoto bodu z-mapy uvnitř daného trojúhelníku, a je-li průmět bodu pod už opracovaným povrchem, pak to znamená, že fréza má řezat materiál v tomto bodě mezi předchozí a aktuální pozicí nástroje. Proto tento bod má souřadnice jeho projekce do trojúhelníku.

Výpočet tloušťky nedeformované třísky: výpočet tloušťky nedeformované třísky sám o sobě Obrobený povrch se vypočítává pro každou pracovní pozici ostří. Současně jsou vypočítávány i tloušťky nedeformované třísky. Tato metodika umožňuje modelovat tloušťku nedeformované třísky pro různé pootočení nástroje, modelovat nájezd do materiálu a mohl být dokonce využit k modelování výjezdu z materiálu. Pro každou pracovní pozici řezných břitů je tloušťka nedeformované třísky vypočítána pro každý jednotlivý prvek ostří. Zde jsou kroky, které popisují tento algoritmus:

- za prvé v každém časovém kroku, se mění obrobený povrch. Břit je polohován pro následující pozici;
- tloušťka nedeformované třísky je vzdálenost mezi tímto bodem a nejbližší průsečnicí s již obrobeným materiálem ve směru vektoru kolmém na obráběný povrch v uvažovaném bodě ostří, popsany v práci [13]. Tyto průsečíky musí být určeny. Vzhledem k tomu, směr tloušťky nedeformované třísky je známý, pak prvky, kde by mohlo dojít k průniku, jsou kvadratické prvky nad/pod čarou, kterou ta čára prochází. Při pohledu shora se jedná o rovinu x-y. Tyto prvky lze určit pomocí optimalizačního algoritmu, popsáném v práci [4];
- pak se vypočítá průnik s každým z trojúhelníkových povrchů, spojený s předchozími kvadratickými elementy. Dojde-li k průniku v tomto trojúhelníku, pak průnik je platný, což znamená, že sice existuje průsečík s rovinou (ale to ještě neznamená, že se vyskytuje ve správné oblasti).
- tloušťka nedeformované třísky je získána s přihlédnutím na nejbližší průsečík.

Tloušťka nedeformované třísky: analytický přístup pro orbitální vrtání

Diskrétní geometrický přístup umožňuje získat přesné výsledky ohledně tloušťky nedeformované třísky pro jakékoliv místo ostří. Nicméně čas výpočtu nedovoluje provádět rychlé simulace. Proto byl navržen jednoduchý model s využitím sil při frézování pro síly během orbitální vrtání s pravouhlou frézou, uvažující úhly nastavení hlavního a vedlejšího ostří, úhel stoupání šroubovice a čelní geometrii. Tento algoritmus umožňuje první přístup optimalizovat parametry operace a geometrie břitu. Další optimalizace lze provést ručně pomocí první algoritmu pro posouzení poloměr špičky, zkosení nebo změnu geometrie průsečíku mezi vedlejším ostřím a povrchem drážky nástroje. Tento model nemusí být velmi přesný, protože nebude použit k určení koeficientů, ale musí to být velmi rychlý. Hlavní výhodou analytického modelu je, že umožňuje hyper-maticový výpočet a aby se zabránilo dlouhým výpočtovým smyčkám.

Vstupní parametry Vstupní parametry modelu jsou pro obráběcí proces pevně určeny. Tyto parametry jsou:

- průměr otvoru,
- axiální rychlost posuvu,
- řezná rychlost.

Vypočtené hodnoty Z vstupních parametrů může být vypočteno několik hodnot. Rychlost vřeteníku je dána průměrem nástroje a řeznou rychlostí. Poloměr obvodu odpovídá oběžné excentricitě a je dán rozdílem mezi poloměrem díry a poloměrem nástroje. Axiální posuv na zub souvisí rychlostí vřetení. Radiální rychlost posuvu závisí na rychlosti obvodové rotace. Od radiální posuvové rychlosti může být vypočítán radiální posuv na zub. Je také možné vypočítat úhel popisující sestup nástroje do materiálu, tzn. úhel klesání šroubovice. Od této chvíle je možné propojit tyto globální místní hodnoty místní pro výpočet hodnot tloušťky nedeformované třísky. Prvním důležitou kontrolou je, že oblast výpočtu skutečně zahrnuje maximální hloubku řezu frézováním pro hlavní ostří břitů. Pak radiální posuv na zub odpovídá přibližně maximální nedeformované tloušťce třísky hlavního ostří, pokud se uvažuje dráha zubu jako kružnice a nikoli jako trochoida. Pro lepší pochopení, který z objemů materiálu je reálně odebrán, je vhodné se podívat se na záběr dvou po sobě jdoucích zubů, které tak tvoří přibližnou obálku ploch povrchů (pořád se uvažuje aproximace kružnicí, jak bylo vysvětleno výše). Jedním z hlavních postřehů je, že tloušťka třísky na vedlejším ostří závisí na hodnotách úhel nastavení tohoto ostří a může být větší než u hlavního ostří. Nicméně tloušťka třísky není konstantní během otáčení nástroje. Větší hodnoty je dosaženo, když zub je v pozici "zadní", tzn. když hlavního ostří vlastně řěže materiál jakoby z "přední" pozice. Jestliže je úhel sestupu (axiálního zahlubování) menší než úhel nastavení vedlejšího ostří, pak se objeví dva fenomény. Za prvé, tloušťka třísky na vedlejším ostří už není kontinuální během otáčky nástroje. Ve skutečnosti zub neřeže materiál na vedlejším ostří z této přední polohy. A pak v důsledku nižšího sklonu obráběnému materiálu ve srovnání s úhlem vedlejšího břitů břit nebude řezat jakýkoli materiál ve středu nástroje. Tyto maximální a minimální hodnoty tlouštěk třísek na vedlejším ostří jsou geometricky dány, pomocí výše uvedené aproximace.

Optimalizační algoritmy Výhody modelu vyvinutého pro orbitální vrtání je, že analytické formulace mohou být reverzibilně nastaveny, například pro minimální tloušťku třísky nedeformovaného materiálu na hlavním ostří jako vstupní parametr. Nicméně pokud jsou tyto vstupní parametry jsou nízké, tak není možné uspokojit všechny požadované hodnoty, protože to není geometricky možné. Proto byl zaveden nový přístup. Ačkoli průměr otvoru musí mít přesnou hodnotu, ostatní hodnoty už nejsou fixní a mohou být zvoleny v určitých mezích:

- axiálním posuv má minimální hodnotu pro zajištění daného čas cyklu,
- průměr nástroje musí být větší než poloměr otvoru a menší než průměr díry,
- počet zubů může být omezený, aby drážky měly dostatečnou velikost,
- orbitální otáčky jsou omezeny rozsah otáček vřetení,
- úhel nastavení ostří lze zvolit v požadovaném rozsahu,
- řezná rychlost se může lišit v rozmezí hodnot definovaných pro materiál nástroje tzv. párovací metodologií a může být omezena počet otáček,
- maximální nebo tloušťka minimální tloušťky třísky na hlavním a vedlejším ostří jsou omezeny v požadovaném rozsahu hodnot,
- totéž platí pro maximální hloubku řezu.

Použití algoritmu vícekritériální optimalizace je možné najít řešení, které odpovídá nejlepšímu očekávanému výsledku. Také bylo možné propojit tuto metodu s výpočty síly, které lze například použít ke snížení síly frézování při orbitálním vrtání při použití např. robota.

Závěr

Modelování frézovacích sil bylo rozděleno do dvou částí a úspěšně ověřeno. Nejprve byly koeficienty modelu řezných sil stanoveny pro jednoduché frézovací operace za použití velmi přesného modelu pro výpočet nedeformovaných tlouštěk třísek. Za druhé, koeficienty byly použity pro simulaci tříosých frézovacích operací s použitím nového geometrického algoritmu pro výpočet těchto třísek při tříosých frézovacích operacích. Tato studie poskytla rovnice, které umožňují popsat globální geometrii stopkové frézy, vypočítat souřadnice polohy ostří, zohlednit nástrojovou geometrii a vypočítat hodnoty vztahující se k místní geometrii řezu. Práce také poskytuje způsob, jak určit vliv házivosti nástroje a popsat tříosé frézovací trajektorie, které dávají vazbu mezi každým referenčním souřadným systémem. Pro ještě lepší přesnost modelu byly využity úhly pro optimalizované obrábění. Různé kroky používané v tomto geometrickém algoritmu pro výpočet pomocí tlouštěk třísek v tříosém frézování byly vysvětleny krok za

krokem.

Dále byl implementován přibližný analytický model pro orbitální vrtání s jednodušší geometrií, než je komplexní, vyvinutý v této práci. Tento umožňuje rychlejší výpočet za účelem určení přibližné oblasti, pro kterou operace orbitálního vrtání má požadované vlastnosti, týkající se nedeformované tloušťky třísek a frézovacích sil. Společnost HAM France tak může využít tyto výsledky pro zlepšení vybraných frézovacích operací s pomocí robota například pro letecký průmysl. V tomto konkrétním případě je důležité použít výsledky diplomové práce ke snížení frézovacích sil, jelikož tento typ struktur trpí nízkou strukturální pevností, a proto dochází k průhybům nástroje či obrobku. Optimalizační algoritmus obrábění se plně osvědčil.

V této studii nebyly vibrace zohledněny. Nicméně algoritmus použitý pro výpočet tlouštěk třísek při tříosém frézování umožňuje explicitní formulaci polohy nástroje v každém časovém kroku s využitím znalosti funkce frézovacích sil, vypočítaných algoritmem v předchozím časovém kroku. Proto by zavedení vibrací do modelu bylo možné provést v dalších studiích. Tato studie se aplikuje na tříosé frézování, ale způsob jeho rozšíření na 5-osé frézování lze rozšířit v dalších návazných pracích.

RÉSUMÉ

Introduction

L'entreprises et ses produits HAM France Andreas Maier est un fabricant d'outillage standard et spécial : outils de perçage, fraisage, alésage et plus récemment des outils spécialement conçus pour le perçage orbital. Créée en 1982, l'entreprise est associée au groupe allemand HAM ANDREAS MAIER GmbH. Basée en Haute-Savoie, HAM France est située à proximité de la vallée de l'Arve, où plus d'un millier de petites et moyennes entreprises produisent près de 60 % du décolletage français. En 2016, l'entreprise a généré un chiffre d'affaires de 6 576 200 €, en employant 47 personnes. HAM France distribue des outils de production de la société mère sur le marché Français, mais produit aussi dans ses ateliers des outils PCD ainsi que des outils en carbure de deux types :

- outils standard pour la mécanique de précision, l'électronique et le médical
- outils spéciaux notamment pour l'automobile et l'aéronautique

L'entreprise propose également un service de réaffûtage. Elle est certifiée ISO 9001 (version 2008) par l'AFAQ, ce qui garantit le savoir-faire industriel de haute qualité et lui permet d'accéder aux secteurs de l'automobile et de l'aéronautique. La société est partenaire avec des grands groupes de l'aéronautique tels que Airbus ou ASCO Industries, avec des groupes automobiles tels que PSA et de nombreux sous-traitants de grandes marques. Ces partenariats sont importants puisqu'ils assurent une grande charge de travail. Le défi consiste à développer des outils qui répondent aux spécifications toujours plus complexes des clients : usinage des superalliages, de matériaux composites, mais aussi de structures sandwichs, avec souvent de faibles tolérances à respecter.

Un rapide historique

- 1982 : Création de l'entreprise
- 1995 : focalisation sur la production d'outils spéciaux avec création d'un atelier dédié, employant 19 salariés
- 2000 : l'entreprise reçoit la certification ISO 9001 par l'AFAQ
- 2016 : Le centre d'essai s'ouvre à la recherche avec l'embauche de Dr. Floran BARELLI

Groupe PRACARTIS HAM France a réduit la concurrence locale en choisissant de s'associer à HAM France Medical, Précise France SAS, Carbilly SA, Concept diamant SARL, sous le nom PRACARTIS, groupe créé en 2016. Les 5 bannières travaillent en collaboration, tout en gardant leurs spécificités :

- Precise France SAS diffuse en exclusivité sur la France des broches à haute vitesse et de haute précision pour perçage, la rectification et le fraisage. Les broches sont de marques FISCHER, PRECISE, SYCOTEC et HSD. La maintenance des broches est aussi une de leurs activités.
- Carbilly fabrique des outils en carbure monobloc. Que ce soit de l'outillage standard ou spécifique, sa large gamme d'outils est destinée à l'usinage de matériaux difficiles et de matériaux ductiles.
- Concept Diamant est spécialiste dans l'application industrielle du diamant PCD et du CBN. L'entreprise réalise également des outils pour le décolletage.
- HAM France MEDICAL est spécialisée dans la fabrication d'instruments médicaux utilisés en implantologie, chirurgie orthopédique et maxillo-faciale, Odontologie, ainsi que pour l'usinage de prothèses dentaires de coupe. Elle commercialise une gamme complète d'instruments rotatifs pour les dentistes et les prothésistes (fraises à fileter, CAD / CAM fraises fraises, disques, etc..).

Présentation du département recherche & développement Le département recherche et développement a pour but de développer des outils et des solutions qui répondent aux besoins des clients. Les problématiques peuvent être liées aux vibrations, à l'usure de l'outil ou encore à l'état de surface. Le rôle de la recherche chez HAM France est d'accroître la compréhension des procédés d'usinage au sein de l'entreprise. Le département recherche et développement se trouve dans le laboratoire d'essai auquel il est étroitement lié. Les rapports sont écrits pour chaque recherche de solution, et les données sont collectées dans une base de données. Cette base de données permet d'utiliser les résultats des tests précédents pour la recherche de solutions pour l'avenir. Tout le travail de recherche est effectué en collaboration : les réflexions théoriques du chercheur sont discutées avec des personnes ayant une formation technique et plus d'expérience dans la fabrication d'outils de coupe. HAM France utilise le développement expérimental pour aller de l'avant.

Contexte industriel de l'étude Pour améliorer les géométries d'outil, le procédé de fabrication doit être compris et maîtrisé, en particulier au cours d'opérations complexes. L'épaisseur coupée dans le processus de fraisage hélicoïdal est beaucoup plus difficile à modéliser qu'en épaulement. Cela est dû au fait que la surface déjà usinée n'est pas seulement générée par la dent précédente : c'est une surface complexe générée par plusieurs passages des dents précédentes. En outre, les géométries complexes d'outils doivent être prises en compte afin d'optimiser le procédé. Par conséquent, il est nécessaire d'utiliser un modèle d'efforts de coupe qui ne dépende pas de la géométrie de l'outil globale mais seulement de la géométrie locale de l'arête. Le but de cette étude est de modéliser les efforts de coupe pour la plupart des opérations de fraisage 3 axes avec des géométries d'outil et des trajectoires complexes et d'appliquer cela au cas du perçage orbital.

Situation initiale Un algorithme simple basé sur les recherches de Pierre-André REY [22] avait déjà été développé dans l'entreprise. Néanmoins, ce modèle utilise un modèle d'outil simple, sans tenir compte de la géométrie locale ni même de l'angle d'hélice dans la géométrie de l'outil. Par conséquent, ce modèle n'était pas adapté à la modélisation des forces en fraisage.

Paramétrisation de l'outil de fraisage

Une large gamme de géométries d'outils est utilisée pour le fraisage 3 axes. Le paramétrage de l'outil est un élément clé pour une modélisation précise des forces en fraisage. Dans certains cas, chaque dent de la fraise peut même avoir une géométrie différente avec, par exemple, un angle de coupe différent. La géométrie de l'arête de coupe est donnée par l'intersection de l'enveloppe outil et de la face de coupe [13]. En exprimant les équations de l'enveloppe outil et des faces de coupe, les coordonnées des points de l'arête de coupe sont exprimées mathématiquement. L'utilisation de modèles empiriques pour la prédiction d'efforts exige également le calcul d'angles locaux le long de l'arête de coupe, ce qui peut être calculé de façon géométrique [13].

Paramétrage du profil de l'outil La paramétrisation du profil de l'outil développée ici est basée sur le modèle généralisé développé par Engin et al., [11]. Le problème de ce modèle est l'utilisation du paramètre z , coordonnée axiale dans le repère de la dent. En effet, cette méthode ne permet pas d'avoir plusieurs points du profil avec la même coordonnée axiale. Si l'on considère un outil purement cylindrique, un nombre infini de points de l'arête de coupe frontale ont la même coordonnée axiale. L'utilisation du paramètre z n'est pas un problème pour des outils tels que des forets, mais les fraises ont, dans la majorité des cas, un angle de direction d'arête négatif ou nul sur la partie frontale, et donc au moins deux points auront la même coordonnée z . Dans les opérations de fraisage 2 axes, cela n'est pas un problème car l'arête de coupe frontale n'est utilisée qu'à l'extrémité de la dent. Dans les opérations de fraisage 3 axes tels que fraisage hélicoïdal, toutefois, l'arête de coupe frontale a une importance beaucoup plus grande. Cette différence est due à l'avance axiale. Pour toutes ces raisons, le modèle a été adapté pour une utilisation avec des opérations de fraisage 3 axes. De plus, l'utilisation du paramètre r , définie comme la coordonnée radiale dans le repère de la dent subirait les mêmes limitations avec un angle de cône sur l'outil par exemple. De plus, les paramètres géométriques d'entrée ont eux aussi changé aussi par rapport au modèle d'Engin. La coordonnée du centre du filet de la dent, n'est plus un des paramètres géométriques d'entrée, mais est calculée afin d'obtenir une tangence entre le filet et la face de coupe frontale d'une part et entre le filet et l'arête de coupe latérale d'autre part. Le nouveau modèle permet également de modéliser des fraises coniques, avec rayon ou chanfrein. Enfin, un nouveau segment a été ajouté pour décrire les outils avec ou sans coupe au centre puisque parfois, dans les opérations de fraisage hélicoïdal, l'arête de coupe frontale coupe jusqu'au centre [25]. Dans le modèle développé

dans cette étude, le profil de l'outil est donné par le diamètre de chaque dent, la longueur de l'outil que nous voulons modéliser, les angles et longueurs des segments de l'arête frontale, le rayon du congé, l'angle et la longueur du chanfrein. C'est à partir de ces paramètres que les coordonnées des points principaux du profil outil sont calculées. Pour paramétrer le profil de l'outil, des interpolations linéaires et circulaires sont utilisées pour interpoler les segments entre les points principaux. Néanmoins, le choix du paramètre à utiliser n'est pas facile. Plusieurs points ont la même coordonnée radiale ou axiale. Si l'angle de direction d'arête de l'arête de coupe frontale est égal à zéro, ou si l'angle de direction d'arête de l'arête latérale est égal à 90°, un nombre infini de points ont une coordonnée commune et il n'est pas possible de donner une fonction bijective : paramétrer le profil en utilisant les paramètres r et z . Pour résoudre ce problème, une solution consiste à utiliser l'abscisse curviligne. Chaque point du profil a une abscisse curviligne et une abscisse curviligne correspond à un point unique. Par conséquent, il est possible de définir une fonction bijective qui donne les coordonnées de n'importe quel point du profil à l'aide de l'abscisse curviligne en tant que paramètre. Cette méthode permet de décrire des profils complexes, et la taille des éléments du profil discrétisé est presque constante le long du profil, car il n'est pas lié à l'angle de direction d'arête comme ce fut le cas avec l'utilisation des paramètres r et z .

Paramétrisation des faces de coupe La paramétrisation des faces de coupe est basée sur les travaux de Fromentin, G. et Poulachon, G. [13]. Cette méthode a été initialement développée pour le taraudage, mais elle peut être également utilisée avec des outils de fraisage. Les deux principales différences avec notre modèle sont :

1. L'utilisation de l'abscisse curviligne comme une variable pour la paramétrisation de profil de l'outil
2. La nécessité de modéliser l'arête de coupe frontale pour les opérations de fraisage hélicoïdal, ou plus généralement opérations de fraisage 3 axes

Certains outils de fraisage ont une surface plane sur l'arête de coupe frontale, qui est obtenue au cours de la taille de l'outil. Selon la taille de cette surface, elle peut être considérée comme une face de coupe, ou comme un chanfrein. Si l'épaisseur coupée dans cette zone est beaucoup plus petite que la longueur du plan, elle est considérée comme une face de coupe. Dans certains cas, l'inclinaison de la face de coupe latérale et la géométrie de la goujure ont un impact sur la géométrie de l'arête de coupe frontale. Pour une meilleure précision du modèle, ces facteurs doivent être pris en compte. Par conséquent, la face de coupe finale est obtenue par une combinaison des deux faces de coupes frontale et latérale associées respectivement aux arêtes de coupes frontale et latérale. Le terme « face de coupe latérale » comprendra la face de coupe latérale plane, ainsi que la surface générée par l'arc de la goujure.

Paramétrisation de la face de coupe frontale La face de coupe frontale est modélisée comme un plan orienté par son vecteur normal, avec une distance de décalage pour donner sa position par rapport à au bout théorique de la dent sans cette surface.

Paramétrisation de la courbe génératrice de la face de coupe latérale La face de coupe latérale est une surface paramétrique définie à l'aide d'une courbe génératrice (profil de face de coupe latérale) et une courbe de directrice (l'hélice). Ce profil est généré par la meule lors de la génération des goujures. Certains modèles donnent le profil de la goujure en fonction des paramètres du profil de la meule et des paramètres de l'opération de rectification. Ces modèles sont basés sur des approches analytiques et géométriques (opérations booléennes) [10, 23]. Dans le cadre de la présente étude, ces modèles sont inutilisables car la géométrie de la meule n'est pas connue lors de la conception de l'outil. Néanmoins, des algorithmes permettant de calculer les paramètres de l'opération ainsi que la géométrie de la meule pour obtenir un profil de goujure donné existent [19]. Dans notre cas, le profil de la goujure est conçu pour être très proches de celui donné dans les fichiers CAO des outils HAM France. Le profil de la face de coupe latérale est défini dans le repère de la dent, dans le plan d'équation $Z = 0$. L'angle de coupe utilisé dans le profil de la courbe est l'angle programmé pendant le processus de rectification de l'outil. Cet angle correspond à l'angle de coupe orthogonal d'un élément ayant un angle de direction d'arête égal à 90°. Cet angle est utilisé pour créer la géométrie de l'outil, mais sa valeur ne correspond pas à l'angle de coupe local. Le profil de la goujure est considéré comme circulaire et défini par son rayon. Enfin, certains outils ont une face de coupe qui est décalée d'une certaine distance par rapport au bout de la dent. Toutes les valeurs concernant le profil de la face de coupe frontale sont données dans les fichiers CAO puisque le modèle utilisé ici est vraiment proche de la méthodologie utilisée pour la conception d'outils de la société HAM France en CAO. Les coordonnées des principaux points de la courbe génératrice sont calculées à partir de ces paramètres. L'équation de la courbe génératrice liée au profil de la face de coupe est obtenue par interpolations linéaire et circulaires entre ces points.

Paramétrisation de la face de coupe latérale La courbe directrice (l'hélice) doit être modélisée. Le pas de la goujure est donné par l'angle de l'hélice. La face de coupe latérale s'exprime grâce à la courbe génératrice et de l'hélice à l'aide d'une équation paramétrique. La face de coupe latérale est exprimé à l'aide des coordonnées radiales et frontales.

Paramétrisation de la surface obtenue par combinaison des faces de coupe frontales et latérales Dans cette étude, l'outil de fraisage est généré à l'aide d'une modélisation paramétrique avec deux approches complémentaires : une approche structurelle et une approche technologique [23]. L'approche structurelle est utilisée pour générer la goujure du profil face de coupe latérale alors que l'approche technologique est utilisée pour générer la face de coupe frontale, en modélisant la matière retirée par la meule. Par conséquent, la surface de l'outil est composée de parties des faces de coupe latérale et frontale. Pour paramétriser la surface finale, il est nécessaire d'associer ces deux surfaces. Tout d'abord, la projection du point de coordonnées r et z est calculée sur la face de coupe latérale en utilisant la paramétrisation mise en place. Ce point est ensuite projeté dans la direction tangentielle du repère de la dent sur la face de coupe frontale. Le signe du paramètre utilisé pour la projection donne la position relative des deux surfaces à cet endroit. Si la face de coupe frontale se trouve derrière la face de coupe latérale, il est alors possible de déduire que la matière sur la face latérale à ce point sera retirée lors de la rectification de la face de coupe frontale. Par conséquent, le point lié aux paramètres r et z se trouve en réalité sur la face de coupe frontale et non pas sur la face de coupe latérale. Ce raisonnement fonctionne aussi dans l'autre sens, dans le cas où la face latérale se trouve « derrière » la face de coupe frontale au point considéré. De plus, la face de coupe frontale a une hauteur limitée, donc la projection n'est pas calculée pour les points au-dessus de cette limite.

Paramétrisation de l'arête de coupe L'arête de coupe apparaît après la rectification des faces de coupes et du profil enveloppe. Par conséquent, l'arête de coupe est définie comme l'intersection entre la surface d'enveloppe de l'outil et la face de coupe [13].

Trajectoires de l'outil pour les opérations de fraisage 3 axes incluant l'effet du faux-ronde

Coordonnées homogènes donnent la possibilité de décrire des rotations et des translations entre repères géométriques [6, 8]. Les changements de repères sont obtenus par des multiplications de matrices homogènes. Les avantages de cette méthode par rapport aux changements de bases classiques est l'unification des calculs de translations et de rotation au sein d'un même outil. Pour cette raison, les coordonnées homogènes sont utilisées dans cette étude.

Modèle de faux-ronde Le faux-ronde de l'outil a une influence significative sur les efforts de coupe. Le faux-ronde de l'outil conduit à un déplacement des arêtes de coupes par rapport à leur position théorique. Le faux-ronde n'est cependant pas le seul phénomène menant à des différences par rapport à la position théorique des arêtes de coupes : la flexion de peut également avoir un impact [24, 20]. Cependant, cette étude ne concerne pas le micro-fraisage, mais des outils en carbure monobloc de grand diamètre, c'est pourquoi la flexion de l'outil est négligée. Le faux-ronde doit être pris en compte dans les trajectoires de l'outil afin d'avoir un modèle précis. Il existe deux différents types de faux-ronde affectant la trajectoire. La première est due à l'excentricité des liaisons entre l'outil, le porte-outil et la broche. L'axe de rotation de broche n'est pas parfaitement coïncidant avec l'axe géométrique de l'outil. Le deuxième type de faux-ronde se trouve dans la géométrie de l'outil. Pour des outils à plaquettes, le principal problème est le positionnement radial de la plaquette. Pour outils en carbure monobloc, il pourrait y avoir un décalage entre la position programmée de la meule et sa réelle position (en raison d'erreurs de positionnement et d'usure de la meule de rectification), toutefois ce type de faux-ronde est négligé dans cette étude, étant donné que le faux-ronde de montage dans le porte-outil et dans la broche est largement plus important que l'imprécision de fabrication. Le faux-ronde de montage est défini par une longueur de faux-ronde, que l'on oriente grâce à un angle donné dans le repère outil.

Évaluation du faux-ronde de l'outil Dans cette étude, le faux-ronde de l'outil est déterminé en utilisant des mesures à l'extrémité de la dent tel que cela est proposé par [27]. D'autres approches existent en utilisant, par exemple, les efforts de coupe pour déterminer le faux-ronde [17]. Néanmoins, cette méthode nécessite d'avoir un modèle de forces déjà établi, ce qui n'est pas possible ici, puisque nous cherchons à le déterminer. À l'aide d'un comparateur, il n'est pas possible de mesurer le rayon absolu de chaque dent, mais il est possible de mesurer la différence de

rayon entre deux dents consécutives. En utilisant la différence de rayon entre plusieurs couples de dents, il est possible de résoudre un système créé à partir de l'équation du modèle faux-rond avec des valeurs différentes (chaque différence mesurée pour les différents couples de dents) pour obtenir la longueur du faux-rond et l'angle d'orientation. Néanmoins, cette méthode nécessite un outil ayant moins 3 dents, afin de pouvoir écrire au moins deux équations.

Trajectoires des opérations de fraisage 3 axes Les trajectoires des opérations de fraisage 3 axes sont données à l'aide de changements de repères afin de passer des repères associés à la machine, à l'axe de la broche, à l'outil (qui est différent de l'axe de la broche à cause du faux-rond), à chaque dent de l'outil. Pour calculer la géométrie locale de l'arête de coupe, il est nécessaire de donner les repères liés à chacun des segments de l'arête de coupe. Les changements de repères sont donnés pour tenir compte de la position et orientation de chaque arête de coupe dans le repère de la dent, avec prise en compte des angles de direction d'arête, d'hélice, et de coupe pour orienter les efforts de coupe locaux.

Plans et angles d'outil-en-travail Puisque la trajectoire réelle de l'outil est connue, les angles de l'outil en travail [16] peuvent être déterminées à n'importe quel point de l'arête de coupe et pour n'importe quelle position de l'outil. Les plans de l'outil en travail représentent les plans orientés en tenant compte de la direction de déplacement réelle de chaque segment à chaque pas de temps. Puisqu'il y a une vitesse de coupe, mais également une vitesse d'avance, la vitesse réelle à ce point est appelée vitesse effective et la direction réelle en ce point est donnée par la combinaison des deux mouvements. Enfin, les angles de l'outil en travail sont calculés à l'aide des plans d'outils en travail.

Modélisation des efforts locaux en fraisage

La modélisation des forces de fraisage est un sujet qui revient fréquemment, et plusieurs modèles ont été développés au cours du temps. Dans cette étude, on se concentrera sur les modèles mécanistiques présentant d'excellents résultats. Ces modèles reposent, la plupart du temps, sur l'observation d'un lien direct entre les efforts, la longueur de coupe et l'épaisseur coupée [15, 3]. Néanmoins, si ces modèles permettent de prédire le comportement en coupe orthogonale, ils ne permettent le plus souvent pas de décrire la coupe oblique avec la prise en compte de l'angle de coupe et d'hélice comme paramètre d'entrée.

Modèle du couple Arête-matière Un modèle d'efforts pour le fraisage en coupe oblique a été précédemment établi [5]. Ce modèle prend en compte les angles d'hélice et de coupe et les coefficients associés sont alors valable pour une préparation d'arête donnée, et une matière. La vitesse de coupe n'est pas prise en considération, étant donné que les efforts de coupe sont considérés quasi-constants dans le domaine défini par le couple outil-matière [5, 2]. Les avantages de ce modèle dans notre étude sont qu'il nous permet d'évaluer l'effet des changements de géométrie d'outil sur les efforts en ne déterminant qu'une fois les coefficients si l'on considère une même matière et une même préparation d'arête. De cette façon, les forces pourraient être réduites pour éviter une flexion excessive en utilisant un robot d'usinage, les piques des forces pourraient être évités afin de protéger l'outil. Les forces de fraisage sont données par :

- Une composante perpendiculaire à la face de coupe
- Une composante dans le sens d'écoulement du copeau

Ces deux composantes sont données en fonction des angles d'hélice et de coupe, de la longueur de coupe et de l'épaisseur coupée.

Modélisation de l'opération de rainurage/épaulement

La modélisation de l'opération d'épaulement doit être extrêmement précise car elle permettra l'identification inverse des coefficients de fraisage.

Méthode de calcul exact de l'épaisseur coupée dans le cas de fraisage en épaulement et rainurage Pour calculer l'épaisseur coupée, des modèles analytiques approchés peuvent être développés pour permettre un calcul rapide. Toutefois, pour être en mesure d'évaluer un modèle, une méthode de calcul exact est requise. La méthode utilisée ici est la méthodologie développée par Fromentin, G. et Poulachon, G. [14] dans le cas du taraudage, mais cela est aussi valable dans le cas d'opérations de fraisage en épaulement ou rainurage. Géométriquement, l'épaisseur coupée est la longueur dans la direction perpendiculaire au vecteur de vitesse de coupe et orienté par l'angle de direction d'arête, entre le point considéré de l'arête de coupe et la surface déjà usinée de la matière. Dans le cas du fraisage en ligne droite dont il est question ici, les frontières du copeau non déformé peuvent être entièrement décrites par la surface balayée par la dent considérée, la surface balayée par la dent précédente, et la surface supérieure du matériau. En raison des trajectoires cycloïdales des arêtes de coupes, les intersections entre les trajectoires de la dent considérées et celles de la dent précédente ne peuvent pas être calculées mathématiquement. Par conséquent, une approche numérique doit être utilisée pour résoudre l'équation. Les avantages de cette méthode sont que le calcul est exact, et il peut prendre en compte le faux-rond sans aucun problème étant donné que la définition des trajectoires n'affecte pas le reste du calcul, puisqu'il est numérique et ne requiert pas de solution analytique. Néanmoins, le temps de calcul est très long, et il s'agit là d'un réel problème lors du calcul avec un pas de discrétisation fin puisque la solution numérique doit être trouvée pour chaque segment et pour chaque position angulaire de l'outil.

Modèle analytique de l'épaisseur coupée incluant le faux-rond en épaulement

Pour réduire le temps de calcul, un modèle analytique doit être utilisé. Ici, le modèle qui a été utilisé permet de prendre en compte les trajectoires cycloïdales et le faux-rond de l'outil [18]. Ce modèle a été modifié pour utiliser le modèle de faux-rond décrit dans cette étude et afin de permettre le calcul d'épaisseur coupée de segments ayant des angles de direction d'arête différents de 90°. Pour tenir compte de l'angle de direction d'arête, le modèle en sinus peut être utilisé. Néanmoins, la précision du modèle sinus est réduite sur le rayon des outils rayonnés. Pour cette raison, un meilleur modèle doit être utilisé sur le rayon. Un modèle a été établi en utilisant une approche géométrique.

Différences entre les modèles analytiques et la solution géométrique exacte Comme mentionné plus haut, avoir un modèle exact permet d'évaluer l'exactitude des modèles analytiques. Les modèles sont évalués à l'aide de la différence entre les valeurs du modèle exact et les valeurs des modèles analytiques.

Évaluation du modèle sinus Dans le cas du modèle sinus, les erreurs demeurent faibles, avec une erreur maximale de 2 μ m sur la partie latérale de l'outil (l'avance par dent étant de 200 μ m) et 10 μ m sur le rayon. Néanmoins, le modèle sinus ne prend pas en considération le faux-rond de l'outil. En tenant compte du faux-rond de l'outil (avec une longueur de faux-rond de 0,0104), les erreurs sur la partie latérale ne peuvent pas être négligées (20 μ m). Par conséquent, un modèle prenant en compte le faux-rond de l'outil doit être utilisé.

Évaluation du modèle de Kumanchik [18] Le modèle développé par Kumanchik [18] permet de prendre en compte le faux-rond de l'outil et les trajectoires cycloïdales. En utilisant ce modèle, les erreurs sur la partie latérale de l'outil sont très faibles par rapport aux erreurs sur le rayon. Cela est en réalité dû à l'utilisation du modèle en sinus. Les erreurs sur l'épaisseur coupée avec le modèle exact sont très petites, la plus grande erreur étant un demi micron sur le rayon et un dixième de micron sur la partie latérale. Ce modèle va permettre une meilleure précision lors de la modélisation des forces en fraisage en ligne droite.

Bornes de calcul Afin de rendre le calcul encore plus rapide, il est important d'utiliser des bornes de calcul. Le calcul peut être restreint aux volumes où l'outil coupe réellement la matière. Les premières limites de calcul sont données par la position angulaire de l'outil correspondant à l'intersection entre la surface balayée par la dent et celle balayée par la dent antérieure, c'est à dire l'entrée et la sortie de la matière. Pour ce calcul, puisqu'il y a une infinité de solutions, la position angulaire étant la moins restrictive est prise en compte. Les points d'intersection sont calculés en utilisant une approche numérique. Ici, la valeur initiale donnée à l'algorithme est crucial puisqu'il y a plusieurs intersections entre ces surfaces pour différentes valeurs de la position angulaire de l'outil (il est tout de même possible de négliger l'effet des trajectoires cycloïdales et en soustrayant simplement l'angle relatif entre la dent considérée et la dent antérieure pour obtenir cette valeur). Le sens d'avance étant X_+ , cette limite de calcul est sous la forme : $X = cst$ pour les Y positifs pour l'entrée en matière, et de même pour Y négatifs pour la sortie de la

matière. Il y a aussi des limites de calcul liés à la surface du matériau. Ces limites sont non seulement les limites de calcul, mais aussi les limites permettant de décrire la position du matériau à usiner. La surface supérieure, liée à la profondeur de coupe, est donnée sous la forme : $Z = \text{cst}$. Il y a aussi deux limites sous la forme : $Y = \text{cst}$ qui permettent de décrire l'engagement radial la position de la matière par rapport à l'outil. Enfin, l'outil fraisage ne coupe pas au centre en fraisage en ligne droite. Par conséquent, l'abscisse curviligne minimale sur laquelle le matériau est coupé est calculée en utilisant une nouvelle fois, une approche numérique.

Les angles d'outil en travail : une méthode rapide pour le fraisage en épaulement Un des principaux problèmes concernant le calcul des angles en travail est le temps de calcul. Puisque que les angles en travail changent avec la position de l'outil, les angles doivent être calculés pour chaque segment de chaque arête de coupe, mais aussi pour chaque position angulaire de l'outil. Dans le cas du fraisage en ligne droite, puisque le mouvement est assez simple, il est possible d'utiliser les formules de conversion donnés par [1]. Les angles en travail sont alors exprimés en fonction des angles d'outil dans la main. La différence entre le vecteur de vitesse de coupe et le vecteur vitesse de coupe effectif est plus petite sur la périphérie de l'outil et augmente pour les arêtes de coupe situées plus près du centre de l'outil. Un exemple a été créé pour évaluer les différences. L'outil utilisé dans cet exemple a un angle de coupe orthogonal de 12° pour l'arête de coupe latérale et 0° pour l'arête de coupe frontale. Sur l'arête de coupe latérale, cet exemple montre que la différence relative entre l'angle de coupe et l'angle de coupe effectif peut atteindre plusieurs pourcents. Ici, la différence relative est de près de 3 %.

Mesures : traitement du signal Afin d'améliorer la qualité du signal d'efforts mesuré, une moyenne glissante centrée a été appliquée à la courbe de mesure. Un algorithme permet de calculer la vitesse exacte de la broche (considérées constante). Enfin, une moyenne sur plusieurs périodes de rotation est effectuée.

Méthode recalage angulaire En ce qui concerne le recalage angulaire, la méthode qui a été choisie consiste à l'inclure comme paramètres dans l'identification inverse. Néanmoins, l'algorithme trouve, la plupart du temps, un minimum local au lieu du minimum global. Pour cette raison, la meilleure façon est de tracer les courbes d'efforts mesurées et les forces simulées en utilisant les coefficients initiaux. Il est ensuite nécessaire d'aligner approximativement les deux ensembles de données manuellement, en tenant compte du faux-rond. Enfin, le paramètre correspondant au recalage angulaire peut être borné pour l'identification inverse, afin de ne pas décaler les dents entre elles à cause de trop fortes valeurs de corrections. Une autre méthode consiste à alignement automatiquement des maximums d'efforts. Tout d'abord, les maximums sont détectés avec les valeurs initiales des coefficients de la loi de coupe, les courbes sont recalées par rapport à ces maximums, un nouveau lot de coefficients émane de l'identification inverse, et ensuite, le processus est effectué en boucle avec les nouveaux coefficients. Néanmoins, la position des piques d'efforts change avec la valeur des coefficients et cette méthode ne converge pas toujours, mais oscille autour d'une valeur donnée. Puisqu'un filtre de moyenne glissante a été appliqué, il est déconseillé d'utiliser le front montant en coupe discontinu pour le recalage angulaire puisque le filtre modifie la pente et produira des erreurs [9]. S'il s'agit d'une opération de coupe discontinue, il est donc nécessaire de définir des intervalles de positions angulaires de l'outil pour lesquels l'identification inverse doit être effectuée.

Perçage orbital

Bien que le perçage orbital et le fraisage hélicoïdal aient tous les deux des trajectoires hélicoïdales, les deux procédés peuvent tout de même être différenciés. Tandis que fraisage hélicoïdale est réalisé en combinant le mouvement des axes X et Y de la machine, le perçage orbital, pour sa part, utilise un mouvement hélicoïdal généré par une excentricité mécanique [21]. Les spécificités du perçage orbital permettent des vitesses de rotation orbitale plus élevées. Ainsi, les vitesses d'avance axiales peuvent être elles aussi augmentées et le temps de cycle est réduit.

Difficultés rencontrées pour modéliser les épaisseurs coupées Les épaisseurs coupées en perçage orbital sont beaucoup plus difficiles à modéliser qu'en fraisage 2 axes. En effet, la surface déjà usinée n'a pas été usinée uniquement par la dent précédente, mais a été usinée progressivement durant toute la rotation orbitale précédente. Cette différence est due à l'avance axiale. Étant donné que l'outil plonge constamment plus profondément dans la matière, l'arête de coupe frontale sera sollicitée, et, dans certains cas, elle peut être sollicitée jusqu'au centre de l'outil. Certains travaux ont déjà été menés pour modéliser la surface usinée et calculer l'épaisseur coupée en perçage orbital [22]. Néanmoins, beaucoup d'approximations ont été faites puisque la surface déjà usinée est obtenue avec une méthodologie Z-mapping, en utilisant l'enveloppe de l'outil dans plusieurs positions, laissant chaque fois

que sa « trace » sur surface, ce qui ne représente pas les véritables trajectoires des dents. De plus, cette méthodologie ne permet pas de modéliser des outils avec un angle d'hélice non nul, ce qui peut mener à des approximations non négligeables. Enfin, cette méthode ne peut pas être couplée au système de paramétrage du profil enveloppe par l'abscisse curviligne, et la géométrie de l'outil reste alors limitée.

Modélisation de l'épaisseur coupée : la surface usinée Bien que l'équation paramétrique de la trajectoire de chaque segment d'arête de coupe est connue, la surface usinée ne peut pas être déduite directement. Une méthode discrète a été choisie. Cette méthode, écrite de toute pièce pour cette étude est basée sur un algorithme de construction de surface par Z-mapping. Voici les étapes qui décrivent l'algorithme :

- Au départ, un ensemble de points représentant la surface de la matière avant usinage est créé. Les points sont répartis de manière homogène sur la surface, et la coordonnée sur Z est donnée par l'équation de la surface du matériau avant usinage (par exemple, $Z = 0$). La position des arêtes de coupes dans leur position initiale est calculée.
- En calculant la position des arêtes de coupes dans leur position suivante, il est possible de les relier aux points des arêtes dans la position précédente afin de créer des surfaces planes entre les deux positions. Les surfaces triangulaires générés entre ces deux positions représentent approximativement la surface balayée entre les deux positions par les arêtes de coupes (l'erreur est due à l'interpolation linéaire).
- Ensuite, un algorithme permet de déterminer les points de la Z-map qui auraient pu être usinés entre les deux positions successives de l'arête de coupe. Les points de la Z-map susceptibles d'avoir été usinés sont ceux qui se trouvent au-dessus ou au-dessous des triangles plans vus en projection dans le plan (XY), c'est-à-dire les régions dans lesquelles les arêtes de coupes se sont déplacées. Pour ce faire, la zone de recherche est réduite autour de chaque surface triangulaire et un algorithme de « point-in-polygon » est utilisé [12].
- Enfin, si la projection de ces point est sous la surface déjà usinées, alors cela signifie que l'arête de coupe a usiné la matière à cet endroit durant l'intervalle séparant les deux dernières positions successives. Par conséquent, la coordonnée z de ces points est mise à jour avec la valeur de l'altitude de la projection sur la surface triangulaire.
- Cet algorithme est effectué en boucle sur les positions successives, la position actuelle devenant la position précédente

Calcul de l'épaisseur coupée La surface usinée est calculée pour chaque position successive de l'arête de coupe. En parallèle, l'épaisseur coupée est calculée. Cette méthodologie permet de modéliser l'entrée dans la matière et pourrait même être utilisée pour modéliser la sortie de la matière. L'épaisseur coupée peut être calculée pour chaque élément de l'arête de coupe, et pour chaque position de l'outil. Pour rendre le calcul plus rapide, il est cependant possible de ne calculer l'épaisseur coupée que d'une arête de coupe, et pour seulement certains éléments de cette arête de coupe. Il est cependant nécessaire de calculer la surface usinée à chaque instant. Voici les étapes qui décrivent l'algorithme :

- Tout d'abord, pour chaque pas de temps, la surface déjà usinée évolue. Pour chaque pas de temps, l'arête de coupe est placée dans sa position suivante afin de calculer les épaisseurs coupées.
- La valeur d'épaisseur coupée est la distance entre le point considéré et l'intersection la plus proche avec la matière déjà usinée dans la direction décrite par [13] (le vecteur normal à la surface balayée par l'arête au point considéré). Par conséquent, les intersections doivent être calculées. Étant donné que la direction de l'épaisseur coupée est connue, les seuls éléments où une intersection pourrait se produire sont les quadrilatères au-dessus au-dessous desquels passe la ligne de direction de l'épaisseur coupée, si l'on regarde l'ensemble en projection dans le plan (XY). Ces éléments peuvent être déterminés à l'aide de l'algorithme optimisé par [4].
- L'intersection avec chacune des faces triangulaires 3d associés aux quadrilatères précédents sont calculés. Si l'intersection se trouve dans le triangle, alors intersection est valide, sinon, que cela signifie que l'intersection avec le plan existe mais il ne se produit pas dans la bonne zone.
- L'épaisseur coupée est obtenue en prenant en compte l'intersection la plus proche du point considéré
- Cet algorithme est effectué en boucle sur les positions successives

Épaisseur coupée : une approche analytique pour le perçage Orbital

L'approche géométrique discrète permet d'obtenir des résultats précis concernant les épaisseurs coupées pour toute géométrie de l'outil. Néanmoins, le temps de calcul ne permet pas de réaliser des simulations rapides. Par conséquent, un modèle simple a été créé pour donner les efforts au cours de l'opération de perçage orbitale avec un outil simple sans chanfrein ni rayon, en prenant cependant en compte l'angle d'inclinaison d'arête des arêtes de coupe frontales, l'angle d'hélice, et l'angle de coupe. Cet algorithme permet une première approche pour optimiser les paramètres de l'opération et de la géométrie de l'outil. Une optimisation supplémentaire peut être faite manuellement en utilisant l'algorithme en géométrie discrète étant plus précis pour évaluer, par exemple, l'effet d'un rayon, d'un chanfrein ou de toute autre modification plus fine de l'outil. Ce modèle n'est pas conçu pour être extrêmement précis, car il ne servira pas pour l'identification des coefficients, mais il doit être extrêmement rapide. L'avantage d'un modèle analytique est qu'il permet d'éviter de longues boucles de calcul en permettant le calcul hypermatriciel.

Paramètres d'entrée Les paramètres d'entrée du modèle sont fixés par le procédé. Ces paramètres sont :

- Le diamètre du trou
- La vitesse d'avance axiale (lié au temps de cycle souhaité)
- La vitesse de coupe (lié au matériau usiné et au matériau usinant)

Valeurs calculées Dans les paramètres d'entrée, plusieurs valeurs peuvent être calculées. La vitesse de rotation de l'outil est donnée par le diamètre de l'outil et la vitesse de coupe. Le rayon orbital, qui correspond à l'excentricité orbitale, est donné par la différence entre le rayon du trou et le rayon de l'outil. La vitesse d'avance radiale dépend de la vitesse de rotation orbitale. Il est également possible de calculer l'angle de plongée de l'outil dans le matériau et le pas de l'hélice. L'objectif est de relier ces valeurs globales à des valeurs locales de l'épaisseur coupée. La première observation est que le pas correspond à la profondeur de passe maximale de l'arête de coupe latérale. L'avance par dent radiale correspond approximativement à l'épaisseur coupée maximale sur l'arête de coupe latérale, si l'on approxime la trajectoire de la dent comme un cercle et non comme une trochoïde. Les épaisseurs coupées par l'arête de coupe frontale dépendent des valeurs de l'angle de direction d'arête de l'arête de coupe frontale et de l'angle de plongée de l'outil dans la matière. Si l'angle de plongée est supérieur à l'angle de direction d'arête de l'arête frontale, alors cette dernière coupe en permanence, et elle coupe même jusqu'au centre. Néanmoins, l'épaisseur coupée n'est pas constante au cours de la révolution de l'outil. La plus grande valeur de l'épaisseur coupée sur l'arête frontale est atteinte lorsque la dent est en position « arrière », c'est-à-dire en position opposée à celle pour laquelle l'épaisseur coupée est maximale sur l'arête latérale. Si l'angle de plongée est plus petit que l'angle de direction d'arête de l'arête frontale, deux phénomènes apparaissent. Tout d'abord, les épaisseurs coupées par l'arête de coupe frontale ne sont plus continues au cours de la révolution de l'outil. La dent ne coupe pas de matière avec l'arête de coupe frontale en position « avant ». De plus, l'arête de coupe en coupera pas jusqu'au centre.

Algorithmes d'optimisation Un des avantages du modèle développé pour le perçage orbital est que des formules analytiques peuvent être inversées pour définir, par exemple, l'épaisseur coupée en latéral ou en frontal comme paramètre d'entrée. Néanmoins, le nombre de paramètres d'entrée reste faible, et il n'est géométriquement pas possible de satisfaire toutes les valeurs souhaitées en même temps. C'est pour pallier à ce problème qu'une nouvelle approche a été introduite. Bien que le diamètre du trou doit avoir un diamètre précis, les autres valeurs ne sont pas fixes et peuvent être choisies dans des intervalles :

- La vitesse d'avance axiale n'a qu'une valeur minimale pour assurer un temps de cycle donné
- Le diamètre de l'outil doit être plus grand que le rayon du trou et plus petit que le diamètre du trou
- Le nombre de dents peut être limité pour que les goujures aient une taille suffisante afin de permettre l'extraction des copeaux
- La vitesse de rotation orbitale est limitée par la gamme de vitesses de la broche
- L'angle de direction d'arête peut varier dans un intervalle choisi
- La vitesse de coupe peut varier dans la fourchette de valeurs définies par la méthode du couple outil-matière et est limitée par la vitesse de broche

- L'épaisseur maximale ou minimale d'épaisseurs coupées en latéral et en frontal, et la profondeur de passe maximale en latéral peuvent être choisies comme valeurs cibles dans des intervalles, une fois encore

En utilisant un algorithme d'optimisation à objectifs multiples, il est possible de trouver la solution qui correspond au mieux à toutes les attentes. Il a également été possible d'associer cette méthode avec un modèle d'efforts, qui peut être utilisé pour réduire les forces de perçage orbital lorsqu'il est utilisé sur un robot par exemple.

Conclusion

La modélisation des efforts en fraisage a été divisée en deux parties. Tout d'abord, les coefficients du modèle de la loi de coupe sont déterminés durant une simple opération de fraisage (rainurage ou épaulement) en utilisant un modèle d'épaisseurs de coupes très précis et spécifique à cette opération. Ensuite, les coefficients sont utilisés pour simuler les opérations de fraisage 3 axes, en utilisant un nouvel algorithme géométrique pour un calcul générique des épaisseurs coupées. Cette étude fournit les équations qui permettent de décrire la géométrie globale d'une fraise, de calculer les coordonnées de l'arête de coupe, pour tenir compte l'arête de coupe frontale et de calculer les valeurs relatives à par à la géométrie locale de l'arête en chaque point. Cette étude fournit également un moyen de déterminer le faux-rond de l'outil et permet de décrire les trajectoires de fraisage 3 axes, en donnant le lien entre chaque référentiel utilisé. Les angles d'outil en travail sont utilisés pour une meilleure précision du modèle et un modèle optimisé permet de calculer les épaisseurs coupées en épaulement/rainurage avec une grande précision. L'algorithme géométrique utilisé pour calculer les épaisseurs coupées en fraisage 3 axes a été expliqué étape par étape.

Étant donné que l'outil de modélisation doit être utilisé au cours du processus de conception, il doit être facile et rapide à utiliser. De cette manière, afin d'éviter un système lourd à mettre en place pour l'identification des coefficients en fraisage, la méthode choisie pour le recalage angulaire entre les efforts mesurés et modélisés est une méthode numérique. Ainsi, l'opérateur qui effectue les mesures n'a pas à s'inquiéter cette partie de l'identification des coefficients. Dans un laboratoire, la déviation du signal provenant du codeur de broche serait plus efficace, mais l'outil de modélisation doit être adapté au contexte industriel. Il en va de même pour la modélisation de la géométrie de l'outil, qui doit être très proche des valeurs indiquées dans le CAD afin d'assurer une intégration aisée de l'outil de modélisation au processus de conception.

Un modèle analytique approximatif a été mis en place pour le perçage orbital, avec une géométrie plus simple que le modèle complexe développée dans cet article, afin de permettre un calcul beaucoup plus rapide. Cet algorithme n'a pas la prétention d'être extrêmement précis, mais il permet de déterminer les paramètres approximatifs de l'outil permettant de tendre vers le but recherché en terme d'épaisseurs coupées, d'efforts, ou autre. HAM France innove également en développant des opérations de fraisage effectuées à l'aide d'un robot pour l'industrie aéronautique. Pour ce cas particulier, il est extrêmement important de réduire les efforts étant donné que ce type de structures souffre d'une faible résistance structurelle, et donc d'une grande souplesse. Un algorithme d'optimisation a été mis en place pour permettre d'optimiser le processus. Cet algorithme d'optimisation a deux modes de fonctionnement différents. Le premier est de réduire automatiquement les efforts tout en gardant la géométrie de l'outil dans les plages de valeurs acceptables définies en amont. Le deuxième mode de fonctionnement est d'optimiser le processus (trajectoire et outil) pour obtenir des valeurs dans les plages cibles en terme d'épaisseur coupée maximale/minimale, de pourcentage de l'arête frontale ne prise dans la matière, de la profondeur maximale de coupe, etc..

Cette étude apporte également des moyens de calcul à haute vitesse à l'aide d'hypermatrices. Chaque partie de ce projet et du code est modulaire, afin de permettre des évolutions à différents niveaux en fonction de la direction que prend le projet.

Dans cette étude, les vibrations n'ont pas été prises en compte. Néanmoins, l'algorithme utilisé pour calculer les épaisseurs coupées en fraisage 3 axes permet une formulation explicite de la position de l'outil à chaque pas de temps en fonction des efforts calculés au pas de temps précédent. Introduire des vibrations dans ce modèle serait donc possible dans de nouvelles études. De plus, cette étude est appliquée au fraisage 3 axes, mais la manière de l'étendre à fraisage 5 axes est évoquée.

Abstract

This internship's objective is to implement modeling of uncut chip thicknesses and milling forces in 3-axis milling, and apply it to orbital drilling. The goal is to understand deeper the process, and develop a tool which permits to model a wide range of end-mill tool geometries, and most of 3-axis milling operations. In this report, the following axis will be developed : • The modeling of the complex tool geometry • The modeling of uncut chip thicknesses in slot milling, and for any 3-axis milling operation • The strategy which has been chosen to identify cutting forces coefficients, and their use. • The obtained results and prospects for development.

Key words :

Machining, 3-axis milling, modeling, cutting forces, uncut chip thicknesses, edge-material pair

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SAILLET, A. Implementace a aplikace metody párování obráběných materiálů a břitů při orbitálním vrtání. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. 100 s. Leader diplomové práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc; Assoc. Prof. Guillaume Fromentin.

DECLARATION

Prehlasujem, že som diplomovú prácu na tému "Implementace a aplikace metody párování obráběných materiálů a břitů při orbitálním vrtání" vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov, uvedených na zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

Date

Bc. Alan SAILLET

AKNOWLEDGMENTS

I would first like to thank my thesis advisors prof. Ing. Miroslav Píška, CSc. of the institute of manufacturing technology at Brno University of Technology, and Prof. Guillaume Fromentin at Arts et Métiers Paristech (ENSAM). They were always open whenever I had doubts, they kindly shared their experience, and offered their help to me.

I would like to thank my internship director, Dr. Floran BARELLI, for his precious advices, his proximity throughout the project, for sharing with me the passion for research, but also for his understanding of my choices.

I would like to express my gratitude to Mr. Christophe CHAMBET, president of HAM France ANDREAS MAIER, for allowing me to do this extremely interesting thesis within his company.

Finally, I want to express my very profound gratitude to my parents and to my partner, for providing me with unconditional support throughout my years of study and during this thesis. Nothing would not have been possible without them. Thank you.

Contents

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introduction | 32 |
| 1.1 | The company | 32 |
| 1.1.1 | Business and products of the company | 32 |
| 1.1.2 | PRACARTIS group | 32 |
| 1.1.3 | Presentation of the Research & Development Department | 33 |
| 1.1.4 | Industrial context of the study | 33 |
| 1.1.5 | Initial situation | 33 |
| 2 | Generalized end-mill parametrisation | 34 |
| 2.1 | Tooth and Tool reference frames | 34 |
| 2.1.1 | Tooth reference frame | 34 |
| 2.1.2 | Tool reference frame | 34 |
| 2.2 | Mill profile parametrisation | 35 |
| 2.2.1 | Geometric coordinates of the control points | 35 |
| 2.2.2 | parametrisation using the curvilinear abscissa | 37 |
| 2.3 | Rake face parametrisation | 38 |
| 2.3.1 | Minor rake face parametrisation | 39 |
| 2.3.2 | Major rake face generating curve parametrisation | 40 |
| 2.3.3 | Major rake face parametrisation | 42 |
| 2.3.4 | Parametrisation of the actual rake face obtained after the grinding of the major and minor rake face | 42 |
| 2.4 | Cutting edge parametrisation | 43 |
| 3 | General mill trajectories for 3-axis milling operations including tool runout | 44 |
| 3.1 | Homogeneous coordinates: introduction | 44 |
| 3.2 | Tool runout | 44 |
| 3.2.1 | Modeling of the different types of tool runout | 45 |
| 3.2.1.1 | Modeling of the tool runout due to mounting eccentricity | 45 |
| 3.2.1.2 | Modeling of the tool runout due to tool manufacture | 45 |
| 3.2.2 | Evaluation of the tool runout | 46 |
| 3.2.2.1 | Measurements of the runout due to the grinding process | 46 |
| 3.2.2.2 | Evaluation and measurement of the total tool runout | 46 |
| 3.3 | Trajectories of 3-axis milling operations | 47 |
| 3.3.1 | Reference frame linked to the machine | 47 |
| 3.3.2 | Reference frame linked to the spindle axis | 47 |
| 3.3.3 | Reference frame linked to the tool axis | 48 |
| 3.3.4 | Reference frames linked to each tooth of the tool | 48 |
| 3.3.5 | Reference frames linked to each segment of the cutting edge | 48 |
| 3.4 | Tool-in-use planes | 51 |
| 3.5 | Tool-in-use angles | 54 |
| 4 | Modeling of local forces in general milling operation | 55 |
| 4.1 | Introduction | 55 |
| 4.2 | Edge-material pair model | 55 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5 | Modeling of shoulder milling operation | 56 |
| 5.1 | Cutting conditions | 56 |
| 5.2 | Trajectories | 56 |
| 5.3 | Chip thickness model and computation bounds | 57 |
| 5.3.1 | Exact computation method of the uncut chip thickness in the case of shoulder/slot milling | 57 |
| 5.3.2 | Analytical chip thickness model including runout | 58 |
| 5.3.2.1 | Uncut chip thickness model | 58 |
| 5.3.2.2 | Consideration of the cutting edge angle κ_r | 59 |
| 5.3.3 | Differences between analytical models and the exact geometric solution | 61 |
| 5.3.3.1 | Evaluation of the sinus model | 61 |
| 5.3.3.2 | Evaluation of Kumanchik's model [18] | 62 |
| 5.3.4 | Computation bounds | 63 |
| 5.4 | Tool working angles: a fast methodology | 64 |
| 5.5 | Measurements and signal treatment | 66 |
| 5.5.1 | Measurements | 66 |
| 5.5.2 | Signal treatment | 67 |
| 5.6 | Inverse identification of the coefficients of the edge-material pair | 68 |
| 6 | Modeling of 3-axis milling: application to Orbital Drilling | 70 |
| 6.1 | Definition | 70 |
| 6.2 | Trajectory | 70 |
| 6.3 | Main issues to compute the uncut chip thickness | 70 |
| 6.4 | Uncut chip thickness: A discrete approach | 71 |
| 6.4.1 | Modeling of the machined surface | 71 |
| 6.4.2 | Uncut chip thickness computation | 71 |
| 6.4.3 | First results | 72 |
| 6.5 | Uncut chip thickness: An analytical approach for Orbital drilling | 73 |
| 6.6 | Optimization algorithms | 78 |
| 7 | Extension of the algorithm to 5-axis milling | 83 |
| 8 | Conclusion | 85 |
| | Appendix A Figure List | 86 |
| | Appendix B Matrix computation | 90 |
| | Appendix C Global architecture of the modeling tool | 92 |
| | Appendix D Drawing of the tool used for the inverse identification | 94 |
| | Appendix E Graphical user interface of the tool builder | 96 |

Bibliography

- [1] AFNOR. ISO 3002-2 Basic quantities in cutting and grinding. Part 2 : geometry of the active part of cutting tools. General conversion formulae to relate tool and working angles., 1982.
- [2] AFNOR. Domaine de fonctionnement de outils coupants. Couple outil-matière. (3):1–15, 1997.
- [3] Yusuf Altintas and P. Lee. Mechanics and Dynamics of Ball End Milling. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 120(4):684, 1998.
- [4] John Amanatides and A Woo. A Fast Voxel Traversal Algorithm for Ray Tracing. *Eurographics*, 87(3):3–10, 1987.
- [5] Stéphanie Bissey-Breton. Développement d'un modèle d'efforts de coupe applicable à des familles d'outils : cas du fraisage des aciers traités thermiquement. 2005.
- [6] Jules Bloomenthal and Jon Rokne. Homogeneous coordinates. *The Visual Computer*, 11(1):15–26, 1994.
- [7] E. Brinksmeier, Sascha Fangmann, and I. Meyer. Orbital drilling kinematics. *Production Engineering*, 2(3):277–283, 2008.
- [8] Sébastien Campocasso. Développement d'un modèle d'efforts de coupe multi-opérations et multi-matériaux Application au tournage du cuivre pur dans différents états métallurgiques. 2013.
- [9] Théo Dorlin. Développement d'un modèle généralisé d'efforts de coupe pour l'usinage de l'alliage de titane Ti6Al4V - Application aux techniques de tournage et de fraisage. page 180, 2016.
- [10] K. F. Ehmann and M. F. DeVries. Grinding Wheel Profile Definition for the Manufacture of Drill Flutes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 39(1):153–156, 1990.
- [11] Serafettin Engin and Yusuf Altintas. Generalized modeling of milling mechanics and dynamics: part i - helical end mills. *American Society of Mechanical Engineers Manufacturing Engineering Division MED*, 10(1997):345–352, 1998.
- [12] Christer Ericson. *Real-Time Collision Detection*. 2004.
- [13] Guillaume Fromentin and Gérard Poulachon. Geometrical analysis of thread milling-part 1: Evaluation of tool angles. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49(1-4):73–80, 2010.
- [14] Guillaume Fromentin and Gérard Poulachon. Geometrical analysis of thread milling-part 2: Calculation of uncut chip thickness. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49(1-4):81–87, 2010.
- [15] Dimitri Germain, Guillaume Fromentin, Gérard Poulachon, and Stéphanie Bissey-Breton. From large-scale to micromachining: A review of force prediction models. *Journal of Manufacturing Processes*, 15(3):389–401, 2013.
- [16] International standard ISO 3002/1. Basic quantities in cutting and grinding – Part 1: Geometry of the active part of cutting tools – General terms, reference systems, tool and working angles, chip breakers. *Tool and Working Angles, Chip Breakers*, 1982.
- [17] M Krüger and B Denkena. Model-based identification of tool runout in end milling and estimation of surface roughness from measured cutting forces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65(5-8):1067–1080, 2012.

- [18] Lee M. Kumanchik and Tony L. Schmitz. Improved analytical chip thickness model for milling. *Precision Engineering*, 31(3):317–324, 2007.
- [19] Guochao Li. A new algorithm to solve the grinding wheel profile for end mill groove machining. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90(1-4):775–784, 2017.
- [20] Ali Mamedov, S. Ehsan Layegh K., and Ismail Lazoglu. Machining forces and tool deflections in micro milling. *Procedia CIRP*, 8:147–151, 2013.
- [21] Robson Bruno Dutra Pereira, Lincoln Cardoso Brandão, Anderson Paulo de Paiva, João Roberto Ferreira, and J. Paulo Davim. A review of helical milling process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 120(April):27–48, 2017.
- [22] Pierre-A Rey. Caractérisation et optimisation du perçage orbital du Ti6Al4V. 2016.
- [23] E. A. Ryabov, S. Yu. Yurasov, and O. I. Yurasova. Parametric modeling of ball end mills. *Russian Engineering Research*, 36(9):784–785, 2016.
- [24] Shi Hyoung Ryu. An analytical expression for end milling forces and tool deflection using Fourier series. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59(1-4):37–46, 2012.
- [25] Yanling Tian, Yunpeng Liu, Fujun Wang, Xiubing Jing, Dawei Zhang, and Xianping Liu. Modeling and analyses of helical milling process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90(1-4):1003–1022, 2017.
- [26] V. V. Vasin and G. Ya. Perestoronina. The Levenberg-Marquardt method and its modified versions for solving nonlinear equations with application to the inverse gravimetry problem. *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics*, 280(2):174–182, 2013.
- [27] Xiang Zhang, Xudong Pan, Guanglin Wang, and Dong Zhou. Tool runout and single-edge cutting in micro-milling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96(1-4):821–832, 2018.