



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INDUSTRIALIZATION AND DEVELOPMENT OF MACHINING IN NUCLEAR COMPONENTS MANUFACTURING

INDUSTRIALIZACE A VÝVOJ OBRÁBĚNÍ V OBLASTI VÝROBY JADERNÝCH KOMPONENT

MASTER'S THESIS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTHOR

AUTOR PRÁCE

Bc. Jan Kolmačka

SUPERVISOR

VEDOUCÍ PRÁCE

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

BRNO 2019

Master's Thesis Assignment

Institut: Institute of Manufacturing Technology
Student: **Bc. Jan Kolmačka**
Degree programm: Industrial Engineering
Branch: Industrial Engineering
Supervisor: **prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.**
Academic year: 2018/19

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:

Industrialization and Development of Machining in Nuclear Components Manufacturing

Brief description:

Analysis of state of industrialization and development of machining in the field of nuclear component production, selection of representative, design of machining technology, its verification and evaluation of results.

Master's Thesis goals:

- Analysis of the state of industrialization and development of machining in the field of nuclear component manufacturing.
- Selection of a representative for the application area.
- A proposal of the machining technology and its verification.
- Technological and economic evaluation of results.

Recommended bibliography:

OPLATEK, F., LUNER, M., OSOBA, J., SVOBODA, K., ŠMEJKAL, L. Automatizace a automatizační technika: automatické systémy. Praha. Computer Press, 2000. 1. vyd. 166 s. ISBN 80-7226-249-1.

KUBA, J. View of automated technological production preparation with aspect on forging process , Academic journal of manufacturing engineering, Volume 7, Issue 2/2009, Editura politehnica, Romania. 2009. ISSN 1897-2683.


HYER, N., WEMMERLOV, U. Reorganizing the Factory: Competing Through Cellular Manufacturing. Pub. Portland: Productivity Press, 2016. 874 p. ISBN 978-1-5632-7228-8.

BRUNNER, P., RECHBERGER, H. Practical Handbook of Material Flow Analysis, United Kingdom: CRC Press LLC, 2004. 333 p. ISBN 00-203-50720-7. [cit. 2018-08-19]. Dostupné z: www.https://web.archive.org/web/20131126152919/http://www-public.it-sudparis.eu:80/~gibson/Teaching/CS C7003/ReadingMaterial/Wilson03.pdf

MICHALÍČEK, M., Predikce pracovní přesnosti CNC obráběcích strojů. [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2013. [cit. 2018-08-19]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/28000>. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce: Jiří Marek.

Students are required to submit the thesis within the deadlines stated in the schedule of the academic year 2018/19.

In Brno, 25. 10. 2018



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





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

ABSTRAKT

Tato práce byla vytvořena ve spolupráci s francouzskou firmou Framatome, konkrétně v závodě Saint-Marcel, Francie a s laboratoří univerzity Arts et Métiers (ENSAM) ParisTech v Cluny (Laboratoire Bourguignon des Matériaux et Procédés, neboli LaBoMaP). Závod Saint-Marcel se specializuje na výrobu a montáž těžkých jaderných komponent. Specializací laboratoře LaBoMaP je obrábění, díky kterému je renomována po celé Francii v mnoha průmyslových odvětvích.

Tato práce se zabývá problematikou industrializace a vývojem obrábění ve výrobě jaderných komponent. Tyto komponenty jsou vysoce namáhány v primárním cyklu nukleárního reaktoru a jejich výroba je založena na nízkém počtu vyráběných kusů s velkou přidanou hodnotou. Je proto nutné obrábění efektivně industrializovat a zaručit produktivitu výroby a nulovou zmetkovitost.

Cílem této práce je rozbor industrializace a vývoje obrábění v oblasti jaderných komponent z hlediska samotného obrábění a také z hlediska CNC obráběcích strojů. Nejprve je vybrán představitel pro danou oblast, Framatome, a dále jsou představeny a analyzovány klíčové obráběcí operace. Následně je navržena obráběcí technologie, která je verifikována pomocí obráběcích testů a metody párování materiálu nástroje a obrobku a vytvořen model sil při obrábění.

ÚVOD

Framatome je přední světový výrobce a dodavatel nukleárních systémů, paliva a servisních služeb s nejvyšším stupněm kvality a bezpečnosti. Framatome je mezinárodní firma, s význačnou pozicí na trhu nukleární energie, známá a uznávaná pro svá inovativní řešení a technologie pro konstrukci, design, výrobu a údržbu světové nukleární flotily. Se 14000 zaměstnanci po celém světě, odborné znalosti společnosti Framatome pomáhají zákazníkům vylepšit a zvládnout výkonnost a bezpečnost nukleárních elektráren a dosáhnout předem stanovených ekonomických cílů. Framatome je vlastněn trojicí společností. Majoritním vlastníkem je EDF, se 75,5 % akcií, dále Mitsubishi Heavy Industries, s 19,5 %, a následně Assystem s 5 % z celkového množství akcií [1].

V současné chvíli, Framatome pracuje na 250 reaktorech po celém světě, generujících zisk ve výši 3,3 miliard euro [2].

Framatome je rozdělen na šest obchodních jednotek:

- 1) Large Projects
- 2) Installed Base
- 3) Fuel
- 4) Components
- 5) I&C
- 6) Engineering and Design Authority [1].

Závod v Saint-Marcel je specializovaný na výrobu a montáž těžkých jaderných komponent. Tento závod je velmi důležitý pro obchodní jednotku Components (česky komponenty), a jsou zde vyráběny a montovány reaktorové nádoby, parogenerátory, kompenzátory objemu a potrubí, tedy komponenty primárního okruhu jaderné elektrárny. V závodu Saint-Marcel, nacházejícím se ve francouzském regionu Saône-et-Loire, pracuje 850 pracovníků. V závodě je také mimo jiné lodní přístav pro přepravu hotových jaderných komponent. Saint-Marcel dodává více než 675 kusů začleněných do 106 nukleárních reaktorů v 11 zemích světa od roku 1975. Jsou zde montovány nejtěžší a nejvýkonnější reaktory francouzského nukleárního průmyslu, s kapacitou mezi 900 a 1600 MW [3].

Nukleární reaktor – Typické komponenty

Rozdělení a funkce nukleární elektrárny jsou znázorněny na obr. 3. Jak je již zmíněno dříve, Framatome Saint-Marcel se specializuje převážně na výrobu komponentů z primárního okruhu jaderné elektrárny. Primární okruh se skládá z:

- reaktorové nádoby;
- parogenerátorů;
- kompenzátoru objemu;
- primární pumpy.

Tyto části jsou znázorněny na obr. 4.

Ze zmíněných komponentů primárního okruhu, parogenerátor a reaktorová nádoba patří mezi ty nejkompexnější z hlediska obráběcích operací. Parogenerátor je detailně popsán na obr. 5, spolu s částí reaktorové nádoby v porovnání s člověkem. Tyto komponenty jsou nesmírně těžké a velké, s vysokými požadavky na obráběcí operace.

Níže je vyjmenováno několik částí parogenerátoru a reaktorové nádoby s odpovídajícími obráběcími operacemi, na které se tato práce zaměřuje (s výjimkou protahování) :

- podpůrné desky pro trubky (parogenerátory)
 - vrtání, protahování;
- kruhové otvory parogenerátoru a reaktorové nádoby
 - vyvrtávání, hluboké vrtání;
- spojovací plochy skořepin (parogenerátor, reaktorová nádoba)
 - čelní frézování, frézování s vysokými rychlostmi posuvu;
- horní část reaktorové nádoby
 - obrábění kapes: kapsy ve tvaru písmene „J“;
- více komponentů parogenerátoru a reaktorové nádoby
 - hluboké vrtání.

Industrializace a vývoj obrábění v oblasti výroby jaderných komponent

Industrializace

Industrializace je proces, který má za cíl začlenění produktu nebo procesu do produkce v průmyslovém měřítku. Industrializace je prováděna systematickým způsobem, v souladu s industrializační procedurou zejména v nejméně kompetitivních firmách jako Framatome [4].

V průběhu projektu je aplikována tato industrializační metoda. Před jejím samotným popisem je nutné dodat, že industrializace a vývoj obrábění je složen ze dvou důležitých částí:

- industrializace obráběcích operací;
- industrializace CNC obráběcích strojů.

Tyto dvě části jsou silně propojeny, především z toho důvodu, že industrializace obráběcích operací a industrializace obráběcích strojů probíhají v ten samý čas. Právě proto jsou v této práci popsány obě tyto části.

Obecně je možné rozdělit proces industrializace na šest fází:

- 1) zahájení
- 2) zhodnocení
- 3) předvývoj
- 4) vývoj
- 5) průmyslová verifikace
- 6) zaručení průmyslové aplikace [4].

Aplikace této procedury v této práci je znázorněna na obr. 6. Další obráběcí operace (hluboké vrtání, vyvrtávání, frézování s vysokými rychlostmi posuvu, obrábění kapes) jsou industrializovány totožným způsobem.

Velkorozměrové obrábění

Energetika, těžební průmysl, letectví, lodní průmysl a nukleární průmysl vyžadují obrábění rozměrných a těžkých obrobků. Tyto těžké kusy, často tvářené, musejí být obrobeny s velkou přesností v nelehkých výrobních podmínkách. K dosažení přijatelných výsledků po několika obráběcích operacích musí být přizpůsobeny:

- 1) obráběcí stroje
- 2) řezné nástroje
- 3) nosná kapacita jeřábu pro manipulaci velkých a těžkých kusů [5], [6].

Těžké obráběcí stroje

Těžké obráběcí stroje musejí být schopny provádět obráběcí operace s vysokou řeznou a posuvovou rychlostí, stejně jako řezat třísky velkého objemu. Je nutné, aby konstrukce stroje byla dostatečně tuhá a odolná proti statickým a dynamickým efektům řezných sil vzniklých během obráběcí operace. Komponenty jako motor, převodovka a ložiska musejí být také upraveny tak, aby vydržely dlouhé obráběcí časy a s těmi také související tepelná zatížení. Navíc, stroje je potřebné vybavit kompenzačními systémy pro tepelná zatížení a sledovacími systémy pro snížení těchto odchylek na minimum [5], [7].

Těžké obráběcí stroje jsou přizpůsobeny tvaru obráběných součástí. Pro rotační kusy, těžké horizontální a vertikální soustruhy jsou využívány. Pro součásti nerotační, nejčastější využití mají horizontální frézovací a vyvrtávací stroje. Tyto dva hlavní typy těžkých obráběcích strojů jsou znázorněny na obrázcích 7 a 8 [5].

Jeřáb pro manipulaci těžkých kusů

Jeřáby jsou nedílnou a nutnou součástí výroby pro obrábění velkých a těžkých kusů. Jsou klíčovým vybavením výroby. Bez nich by upínání kusů nebylo možné. Nicméně, jejich ovládání vyžaduje vyškolený a zkušený personál. Těžké jeřáby nejsou pouze využívány pro manipulaci obráběných kusů, ale také pro montáž jaderných komponentů a CNC obráběcích strojů [5], [8].

V Saint-Marcel jsou k dispozici jeřáby s celkovou nosnou kapacitou 1 000 000 kg, a nosná kapacita jednotlivých jeřábů dosahuje až 600 000 kg [3].

Příklad těžkého jeřábu ve výrobních podmínkách je vyobrazen na obr. 9.

Obráběcí operace

Hluboké vrtání

Hluboké vrtání je operace vrtání děr s poměrem délky a průměru větším než pět [9]. Hluboké vrtání má široké průmyslové využití, například v nukleárním průmyslu, letectví nebo v lodním průmyslu. Počátky této operace pocházejí však ze zbrojařského průmyslu, kde byly požadavky na hlavně zbraní zvyšovány, zejména co se týče přímosti a přesnosti. Po zbrojařském průmyslu se operace hluboké vrtání rozšířila i do výše zmíněných odvětví [10].

Technologie hlubokého vrtání je rozdělena podle dodávky řezné kapaliny do místa řezu a podle systému odvodu třísky. V těžkém průmyslu, 3 hlavní technologie mohou být identifikovány:

1) hluboké vrtání s využitím dělového vrtáku

- řezná kapalina o vysokém tlaku je dodávána středem nástroje;
- třísky jsou odváděny drážkou na vnější části nástroje;
- méně produktivní než BTA vrtání [10], [9];

2) hluboké vrtání s využitím BTA-DTS vrtáku

- řezná kapalina je dodávána do místa řezu dvojitou stěnou nástroje;
- tříška je odváděna středem nástroje [9];

3) hluboké vrtání s využitím BTA-STS vrtáku

- tříška je odváděna středem nástroje;
- pouzdro vrtáku – řezná kapalina je dodávána po obvodu nástroje a poté je přivedena do místa řezu;
- tato technologie je vhodná pro vrtání velmi hlubokých děr [9].

Při industrializaci obrábění ve výrobě jaderných komponent je dobré zmínit důležité parametry pro vyhodnocení operace hlubokého vrtání. Během testů jsou pozorovanými parametry jako průměr vyvrtané díry a geometrická tolerance kolmosti. Tyto parametry jsou měřeny pomocí laserového přístroje.

Vyvrtávání

Vyvrtávání je obráběcí operace, která obvykle následuje po předcházejícím vyvrtání díry [11].

Obecně vzato, vyvrtávání pomáhá dosáhnout několika stanovených kritérií:

- zvětšení díry na požadovaný průměr;
- opravení úchylek tvaru díry;
- zlepšení kvality povrchu díry [12].

Vyvrtávání je prováděno ve dvou krocích, hrubování a dokončování. Hrubování má za cíl odstranění největšího možného objemu materiálu za co nejkratší čas a také připravit předem vyvrtanou díru pro dokončovací operaci. Dokončování se soustředí na kvalitu povrchu a toleranci díry. Tyto operace jsou zobrazeny na obr. 12. Ve většině průmyslových případech se používá nástroj se dvěma řeznými destičkami pro hrubovací operaci. Na druhou stranu, pro dokončování se používá nástroj s pouze jednou řeznou destičkou [13].

Industrializace tohoto procesu do výroby nukleárních komponentů vyžaduje speciální testy pro ověření technologie z hlediska řezných nástrojů, řezných podmínek a CNC obráběcího stroje. Výsledky naměřené během tohoto projektu jsou prezentovány na obr. 13. Jedná se o porovnání vyvrtané díry pomocí hlubokého vrtání a díry, která byla následně vyvrtávaná (hrubování a dokončování). Vyvrtaná díra je následně změřena 3D scannerem pro získání hodnot požadovaného průměru a hodnoty kolmosti. Tento způsob měření je velmi rychlý a slouží výborně pro účely výrobních podmínek firmy Framatome.

Vyvrátání je také používáno jako vnitřní soustružení děr o velkém průměru nebo pro obrábění trubek (obr. 15). Pro použití tohoto procesu, je nutné využít speciální vyvrátací stroj nebo speciální soustružící hlava, kterou je možné namontovat na frézovací a vyvrátací stroj. Tato hlava je zobrazena na obr. 16, a je to jedno z velmi rozšířených obráběcích příslušenství, které zvyšuje variabilitu obráběcího stroje a pomáhá stroji obrobít součásti komplikovanějších tvarů.

Čelní frézování s vysokými rychlostmi posuvu

Čelní frézování s vysokými rychlostmi posuvu je velmi efektivní hrubovací technologie. Cílem je odebrání největšího možného objemu materiálu za co nejkratší čas. Tento proces nabízí vysokou produktivitu a zvýšení odběru materiálu oproti klasickému čelnímu frézování. Nicméně, tato technologie vyžaduje adekvátní optimalizaci pro snížení negativních efektů a nežádoucích výsledků [14].

V rámci tohoto projektu je uskutečněna optimalizace této obráběcí operace pro dosažení požadovaných výsledků při dlouhých obráběcích časech. Tato operace je zobrazena na obr. 17 spolu s typickými nástroji vhodnými pro čelní frézování s vysokými rychlostmi posuvu. Ve výrobě Saint-Marcel Framatome, technologie pomáhá nahradit klasické těžké čelní frézování s využitím nástrojů s velkým průměrem, ale nižším posuvem.

Pro industrializaci procesu, je vhodné jej optimalizovat. Pro optimalizaci je použita tzv. metoda párování materiálu nástroje a obrobku. Tato metoda je detailně popsána v kapitole 4.3 a je normalizována normou NF E66 520.

Nicméně, nejdůležitější části metody jsou popsány níže:

- 1) určení rozsahu použitelných rychlostí v_c
- 2) určení rozsahu posuvů na zub f_z nebo středních tloušťek třísky h_m
- 3) testy opotřebení řezných břitů [15].

Bližší specifikace této operace ve výrobě Framatome:

- materiál 16MND5;
- obrábění bez použití řezné kapaliny;
- $a_p = 1,5$ mm;
- a_e není konstantní v průběhu obrábění, výkon je měřen v úsecích se stejnými řeznými podmínkami pro dosažení věrohodných výsledků;
- hodnoty výkonu vřetene jsou obdrženy pomocí obrazovky CNC systému.

Řezný nástroj má nízký úhel κ_r . Jeho geometrické charakteristiky jsou popsány na obr. 18 a v tabulce 2.1. Nízký úhel κ_r je nutný pro tuto technologii z důvodu usměrnění vysokých řezných sil do axiálního směru (do vřetene). Tento směr je požadovaný, protože dovoluje dosažení větší stability během frézování. Tímto řešením je primární zdroj vibrací, radiální řezná síla, omezen [14].

Výsledky provedených testů jsou detailně popsány v kapitole 2.3.3. Určení řezných parametrů bylo dosaženo.

Cílem testů opotřebení řezných břitů je dosažení rovnováhy mezi řeznými podmínkami a trvanlivostí nástroje pro dosažení maximální produktivity operace. Testy byly provedeny, výsledná trvanlivost nástroje je 50 min, což je akceptovatelný výsledek pro výrobní účely. Podrobnosti k testům a výsledkům jsou v kapitole 2.3.3.

Testy prokázaly reálný potenciál čelního frézování s vysokými rychlostmi posuvu. Před aplikací této metody, řezný nástroj o průměru 315 mm byl používán pro obrábění nejmenované části nukleárního reaktoru. Čistý čas řezu s tímto nástrojem byl 5 h 13 min. S využitím strategie čelního frézování s vysokými rychlostmi posuvu s využitím optimalizovaných parametrů je dosaženo čistého řezného času 3 h 13 min.

Dnes tato strategie šetří 38% řezného času na jednom ze strategických kusů firmy Framatome a je aplikována na mnohých dalších obráběných komponentech.

Obrábění kapes

V moderním průmyslu slouží obrábění kapes zejména k odstranění přebytečné váhy na kritických součástech [12]. V nukleárním průmyslu, cíl obrábění kapes je jiný: napomáhá dosáhnout požadovaných tvarů velkých vodících drážek pro montáž komponentů (např. skořepin), nebo pro obrábění speciálních drážek, nebo kapes, ve tvaru písmene „J“. Tyto speciální kapsy ve tvaru písmene „J“ jsou zobrazeny na obr. 24. Jedná se o velmi specifickou operaci pro firmu Framatome, jejíž industrializace je velmi komplikovaná z hlediska CNC programování, volby řezného nástroje a řezných podmínek. Tvar kapsy ve tvaru písmene „J“ vyžaduje hrubovací operaci tvořící několik stupňů (schodů) v obráběném materiálu. Tyto schody jsou následně obrobena během dokončování. Vhodným řezným nástrojem je například kulová fréza, obvykle používána pro obrábění lisovacích forem.

Industrializace CNC obráběcích strojů pro výrobu nukleárních komponent

Testování CNC obráběcích strojů – Testy během přejímky stroje

Testování CNC obráběcích strojů tvoří zvláštní odvětví metrologie. Je specifické v metrologických procedurách a managementem s měřícími nástroji. Testování CNC obráběcích strojů se dělí do několika částí, schematicky znázorněných na obr. 26 [5].

První skupina se nazývá přejímkové testy. Tyto testy jsou smluvně dohodnuty mezi zákazníkem a prodejcem stroje. Přejímkové testy jsou prováděny u výrobce a poté také po smontování u zákazníka. Cílem těchto testů je ověření parametrů stroje, které jsou udávány výrobcem [5], [16].

Prototypové testy rozšiřují přejímkové testy, zejména pro odhalení nečekaných vlastností stroje, které nejsou viditelné během výroby stroje. Tyto testy také pomáhají k určení limitů v chování stroje ve výrobních podmínkách [5].

Kapitola 3.1 se soustředí na přejímkové testy. Ty lze následně dělit na:

- technické charakteristiky a specifikace;
- testy geometrické přesnosti;
- normy;
- testy při zatížení stroje;
- testy přesnosti a opakovatelnosti pozice;
- testy vibrací a teplotních deformací;
- testy kruhových interpolací.

Testy geometrické přesnosti

Testy geometrické přesnosti mají za cíl popsat geometrickou strukturu obráběcího stroje, z hlediska pohybu funkčních částí a přesnosti tvarů majících vliv na pracovní přesnost [5], [16].

Geometrické tolerance měřené během přejímkových testů jsou následující [16]:

- přímost
 - přímost je měřena hlavně na vodících plochách s využitím tradičních metod nebo pomocí laserového interferometru [5], [16];
- sklon
 - sklon je měřen pomocí vodováhy nebo optických přístrojů [17];

- kolmost
 - kolmost je měřena s využitím měřících úhelníků, indikátorů nebo laserových interferometrů [5], [16];
- rovnoběžnost
 - rovnoběžnost je měřena vodováhou nebo vnitřními mikrometry [5], [16];
- souosost
 - souosost se měří měřícími trny nebo laserovým interferometrem [5], [16];
- rovinnost
 - rovinnost je učena pomocí pravítek, vodovah, nebo laserového interferometru, toto měření je nutné zejména na stolech obráběcího stroje [5], [16];
- házení
 - obvodové a čelní se měří kontrolními trny a měrkami [17].

Normy

Nejčastěji používané normy pro vyhodnocení obráběcích strojů jsou:

- ISO 230;
- ISO 10791;
- VDI/DGI 3441;
- ANSI B5:54;
- JIS B 6330-1980 [5].

Testy při zatížení (při obrábění) stroje

Testy při zatížení stroje se skládají ze dvou částí:

- 1) testy výkonu vřetene
- 2) testy výrobní přesnosti.

Testy výkonu ověřují, že stroj je schopný vydržet těžké zatížení z hlediska obrábění na elektromotory během krátkého času, a také zda elektrické a mechanické součásti jsou schopny obrábět při vysokých obráběcích silách během krátkých přechodových fází [5].

Testy výrobní přesnosti jsou prováděny v teplotně stabilních podmínkách. Přesnost je testována na testovacích kusech, které se liší podle typu obráběcího stroje. Tyto kusy jsou definovány buď normou, například ISO 10791-7, nebo výrobcem stroje. Testovací kusy (např. obr. 33 a 34) jsou součástí kontraktu mezi zákazníkem a výrobcem. Přijatelný tvar, odchylky pozice, technologické podmínky a podmínky měření jsou definovány na daném kusu [5], [16].

Testy přesnosti a opakovatelnosti pozice

Přesnost a opakovatelnost ustavení se stroje na danou pozici jsou důležitými charakteristikami nutné ověřit pro přijetí obráběcího stroje. Prověřují, zda obráběcí stroj je schopný najet na danou pozici přesně a opakovatelně [5], [16].

Testy musejí být provedeny pro každou osu stroje při nezatíženém stavu, velmi často podle normy VDI/DGI 3441 [5], [18].

Testy vibrací a teplotních deformací

Vibrační analýza pomáhá definovat kvalitu vřetene a jeho součástí. Tato metoda je aplikována během přejímky nového obráběcího stroje a pravidelně během životnosti stroje za účelem preventivní údržby [19], [20].

Pro diagnostiku CNC obráběcího stroje, vibrační spektra musejí být získány. S využitím těchto spekter a kinematiky stroje je možné nalézt případné nedostatky [20], [21].

Pro získání vibračních spekter je nutné provést měření, jako například na obr. 35 a 36. Měřicí aparatura se skládá z:

- akcelerometrů ustavených do více směrů;
- karta pro uložení naměřených dat;
- počítač s adaptovaným softwarem.

Teplotní senzory (obr. 35 a 36) mohou být přidány pro doplnění vibrační analýzy, zejména pro vysoce zatížené součásti (např. ložiska).

Vibrace stroje jsou vyhodnoceny pomocí normy ISO 10816-3:2009.

Detailní dynamická analýza stroje je nutná také pro modelování a simulace vibrací, vznikajících v důsledku obráběcích operací. Tato analýza je tudíž velmi důležitá pro další vědecký výzkum na konkrétním stroji [22].

Testy teplotních deformací jsou normalizovány normou ISO 10791-10 a skládají se ze tří částí:

- 1) test vlivu okolní teploty (ETVE)
- 2) test teplotních deformací vzniklých rotací vřetene
- 3) test teplotních deformací vzniklých lineárními pohyby stroje [23].

Obecně jsou teplotní deformace měřeny pomocí senzorů [23].

Měření je zobrazeno na obr. 38 a 39.

Testy kruhových interpolací

V dnešním průmyslu, test Ballbar je jedno z nejrozšířenějších kontrolních zařízení pro kontrolu kruhových interpolací. Je to velmi rychlý a jednoduchý způsob kontroly interpolací pro danou osu CNC obráběcího stroje, podle mezinárodních standardů [24].

Ballbar se skládá z lineárního teleskopického senzoru o vysoké přesnosti s kuličkou na každém konci, a ze dvou magnetických stojanů zafixovaných do stolu a vřetene obráběcího stroje. Tato sestava je znázorněna na obr. 40.

Teoreticky, když je CNC obráběcí stroj naprogramován, kruhové trajektorie, které stroj opisuje, by měly odpovídat trajektoriím naprogramovaným. Ve skutečnosti se však spousta faktorů, jako geometrie stroje nebo jeho opotřebení, podílí na vzniku odchylek mezi skutečnými a naprogramovanými kruhovými interpolacemi [25].

Ballbar měří malé odchylky poloměru, který stroj opisuje během naprogramovaného kruhového pohybu okolo magnetického stojanu zafixovaného ve stole stroje [24]. Toto měření pomáhá inženýrům vyhodnotit přesnost CNC obráběcího stroje [25].

Návrh obráběcí technologie a její verifikace

Nové obráběcí stroje otevírají nové možnosti pro obráběcí technologie, zejména nahrazení nástrojů o velkých průměrech nástroji o průměru menším s větší posuvovou rychlostí, pro technologii čelní frézování - hrubování. Tato technologie musí být důkladně prozkoumána a otestována, pro zaručení úspěšné industrializace.

Materiál 16MND5

Francouzské reaktorové nádoby a parogenerátory jsou vyráběny z nízkolegované oceli 16MND5 (nebo také 16MnNiMo5) [26]. Je to také nejčastěji používaný materiál pro obrábění ve Framatome Saint-Marcel, proto právě tato ocel byla zvolena jako testovací obráběný materiál.

Hlavními charakteristikami oceli 16MND5 jsou:

- dobrá tepelná vodivost;
- výborná svařitelnost;
- dobré chování při radiaci;
- nízká cena;
- R_m okolo 800 MPa;
- tvrdost 20 HRC [27].

Chemické složení této nízkolegované oceli je specifikováno v tabulce 4.1.

Geometrická analýza řezných nástrojů

V tomto projektu jsou zkoumány 3 typy řezných destiček pro technologii čelní frézování:

- kruhová;
- trojúhelníková;
- tangenciální.

Řezné destičky jsou navrženy pro hrubování a polo-dokončování při čelním frézování. Jsou povlakovány vrstvou TiAlN / TiN.

Řezné nástroje (frézy) použité pro testy mají průměr 50 mm a jsou upnuty pomocí upínače HSK A63 s přívodem řezné kapaliny středem nástroje.

Geometrické specifikace nástrojů a destiček jsou na obr. 42.

Postup měření geometrie řezných nástrojů

Zvolený materiál pro měření je přístroj Alicona a mikroskop Keyence. Pozorovací metoda a měření jsou provedeny v souladu s normou ISO 3002.

Z důvodu limitovaných možností upnutí destiček na přístroj Alicona, není možné změřit pracovní úhly nástroje a pouze několik rozměrových charakteristik nástroje je změřeno:

- r : poloměr zaoblení břitu;
- β : ortogonální a zadní úhel břitu;
- $b\gamma$: délka zesílení řezné hrany.

Výsledky geometrické analýzy řezných nástrojů jsou detailně popsány v kapitole 4.2.2.

Rozsah řezných podmínek řezných nástrojů: metoda párování materiálu nástroje a obrobku

Tato metoda je detailně popsána v kapitole 4.3 a je normalizována normou NF E66 520. Jedná se o metodu pro dosažení nejvhodnějších řezných podmínek pro daný nástroj.

Metoda se skládá z následujících kroků:

- 1) určení rozsahu použitelných rychlostí v_c
- 2) určení rozsahu posuvů na zub f_z nebo středních tloušťek třísky h_m
- 3) testy opotřebení řezných břitů [15].

Obráběcí testy jsou složeny ze tří částí:

1) kvalifikační test

- Cílem tohoto testu je zaručit kompatibilitu mezi nástrojem a obráběným materiálem a najít akceptovatelné a stabilní řezné podmínky pro započítání testů. Tyto podmínky jsou často dány dodavatelem řezných nástrojů [15].

2) pracovní zóny (rozsah řezných podmínek)

- Po absolvování obráběcích testů, rozsah řezných podmínek je určen pro spolehlivé užívání nástroje, pro daný obráběný materiál a dané podmínky [15].

3) omezení

- Tato poslední fáze specifikuje omezení pro pracovní prostředí během obráběcích testů. Jedná se zejména o funkční charakteristiky obráběcího stroje (výkon, krouticí moment, síly, vibrace, tuhost), rozhraní stroj-nástroj, tuhost obráběné části, upnutí obrobku, délka řezného nástroje apod.

➔ Tato omezení zmenšují pracovní zóny.

Obecné specifikace technologie pro metodu párování materiálu nástroje a obrobku

- a_e je rovno jedné třetině průměru nástroje;
- sousledné frézování;
- řezná kapalina přiváděna středem nástroje;
- pouze jedna řezná destička na nástroji během obrábění, pro obdržení čitelného signálu obráběcích sil;
- stroj DMG DMC 65V použit pro testování.

Měřící aparatura

Během obráběcích testů je provedeno měření obráběcích sil a výkonu:

- měření sil:
 - piezoelektrický dynamometr firmy KISTLER model 9255A;
 - měření sil v rozsahu 40 kN ve směru osy Z;
- měření výkonu:
 - výkon je měřen pomocí wattmetru mezi variátorem vřetene obráběcího stroje a motorem vřetene.

Průměrná střední tloušťka třísky h_m

V kapitole 4.3.4 jsou představeny komplexní způsoby jak vypočítat průměrnou tloušťku třísky pro danou geometrii řezné destičky.

Výsledky metody párování materiálu nástroje a obrobku – Rozsah řezných podmínek

Výsledky párování materiálu nástroje a obrobku jsou detailně popsány v kapitolách 4.3.5 a 4.3.6.

Kruhová destička má největší pracovní rozsah, jak řezné rychlosti, tak posuvu na zub. Je to tedy nejvíce variabilní destička a také potenciálně nejekonomičtější destička, jelikož umožňuje nejvyšší možný posuv na zub ze všech tří testovaných geometrií.

Testy opotřebení řezných břitů

Pro testy opotřebení byly použity řezné podmínky experimentálně zjištěné během testů párování materiálu nástroje a obrobku (tabulka 4.5). Jedná se o testy při sousledném frézování, s řeznou kapalinou vedenou středem nástroje a vždy pouze jednou destičkou na řezném nástroji.

Opotřebení je měřeno v intervalech 5 minut obrábění, pomocí mikroskopu Keyence. Mikroskop je znázorněn na obr. 58.

Pro kontrolu testů je měřen výkon pomocí wattmetru FLUKE. Výkon slouží jako kontrolní indikátor.

Během testů opotřebení destiček byly pozorovány dva mechanismy opotřebení ve dvou zkoumaných zónách:

- 1) opotřebení na hřbetu
- 2) vylamování břitu.

Testy opotřebení řezných břitů - Výsledky

Kruhová destička je nejvíce stabilní, co se týče opotřebení. Vývoj opotřebení v obou pozorovaných zónách je velmi stabilní, křivka opotřebení roste velmi kontrolovaně řezná hrana kruhové destičky má potenciál obrábět zhruba 60 minut bez výměny destičky. Podle výsledků testů je to tedy nejlepší destička ze tří zkoumaných geometrií z hlediska opotřebení.

Navíc, W_c (kontrolní parametr, vypočten z naměřeného výkonu) kruhové destičky je nejstabilnější. Pro kruhovou destičku, jako jediná ze zkoumaných geometrií, křivka W_c klesá.

Trojúhelníková destička je stabilní z hlediska opotřebení, ale méně stabilní než destička kruhová.

Tangenciální destička je stabilní během prvních 30 minut obrábění, avšak v následujících 5 minutách se objeví kritický nárůst opotřebení. Toto opotřebení je mnohonásobně vyšší než u destiček kruhové a trojúhelníkové.

Během testů je také měřena drsnost povrchu. Trojúhelníková a tangenciální destička dosahují velmi dobrých výsledků. Kruhová destička vytváří povrch o drsnost $R_a 2,85 \mu\text{m}$. Tato hodnota je sedmkrát vyšší než u destiček trojúhelníkové a tangenciální.

Kritérium firmy Framatome pro drsnost povrchu pro hrubovací operace povoluje drsnost povrchu $R_a 2,85 \mu\text{m}$. Kruhová destička je tedy nejvhodnější volbou z důvodu výborného chování v řezu, stability a odolnosti proti opotřebení.

Analýza a modelování sil při obrábění

Analýza sil při obrábění

Souřadnicový systém dynamometru a souřadnicový systém nástroje nejsou totožné. Pro převod aktivní síly F_a ze souřadnicového systému do rotačního souřadnicového systému nástroje, používá software DasyLab rovnice 5.1 a 5.2. Aktivní síla se nachází v pracovní rovině definované vektory v_c a v_f .

Pro účely této studie jsou dostačující síly F_a a F_z . Převod specifických sil F_x , F_y , F_z (souřadnicový systém dynamometru, síly měřené během obrábění) do rotačního souřadnicového systému nástroje se silami F_c , F_{cN} , F_z je vysvětlen na obr. 70.

Testy dokázaly, že řezné síly pro trojúhelníkovou a tangenciální destičku se nacházejí pouze v rovině XY. Jedná se tedy o problém 2D. Pro kruhovou destičku však síla F_z dosahuje vyšších, nezanedbatelných, hodnot. Pro kruhovou destičku se tedy jedná o 3D problém. Tento efekt je způsoben geometrií destiček. Díky geometriím trojúhelníkové a tangenciální destičky je síla F_z zanedbatelná, pro destičku kruhovou, ale dosahuje hodnot okolo 500 N. Silové signály pro všechny zkoumané geometrie jsou zobrazeny na obr. 71, 72 a 73.

Při nájezdu zubu do materiálu během obrábění, křivka silového signálu není konstantní a signál se mění způsobem znázorněným na obr. 74. Tato změna je dána rychlým zvýšením h_m při nájezdu zubu do řezu v kombinaci se šokem při nájezdu do řezu a rychlým snížením h_m při výjezdu z řezu [28].

Modelování sil při obrábění

V rámci tohoto projektu je vytvořen silový model pro dimenzování upínání a vřetene. Jedná se o jednoduchý model založený na řezných podmínkách, použití grafu W_c jako funkce h_m a na matematických vztazích mezi silami F_c , F_a a F_z .

Jako výsledek tohoto modelu, následující je obdrženo:

- Síla F_c je používána k výpočtu krouticího momentu pro dimenzování vřetene obráběcího stroje a příslušenství na něj namontované pro obrábění. Jedná se například o nástrojové držáky, velká rozhraní mezi vřetenem a obráběcím nástrojem nebo frézovací hlavy.
- Síly F_a a F_z se používají k dimenzování upnutí obrobku.

Tento výsledek je žádoucí pro výrobní podmínky firmy Framatome.

Model obráběcích sil je detailně popsán v kapitole 5.2.

Diskuze

Z teoretického studia i praktických experimentů v rámci projektu jsou dosaženy závěry popsané níže.

Výsledky industrializace obráběcích operací a CNC obráběcích strojů jsou:

- 1) Industrializace čelního frézování s vysokými rychlostmi posuvu šetří 38% řezného času na jednom ze strategických kusů firmy Framatome. Tato technologie je díky této práci aplikována i na mnoha dalších obráběných komponentech s optimalizovanými řeznými podmínkami (řezná rychlost je rovna 230 m/min a posuv na zub je roven 1,6 mm).
- 2) Výsledkem industrializace dalších obráběcích operací (hluboké vrtání, vyvrtávání a obrábění kapes) představených v této práci je úspěšné zavedení těchto operací do výroby firmy Framatome na novém těžkém obráběcím stroji.
- 3) Teoretické a praktické informace získané během tohoto projektu jsou velmi důležitou součástí investičního projektu pro zavedení nových těžkých obráběcích strojů do výroby. Představené testy a metody jsou aplikovány a přispívají k úspěšné verifikaci a industrializaci několika strojů, s výsledkem ovlivnění časového plánu projektu a finančních výsledků investice.

Z analýzy čelního frézování při hrubování vyplývá, že:

- 1) Výsledky geometrické analýzy ukazují, že řezná hrana kruhové a tangenciální destičky není zesílena v oblasti špičky. Naopak řezná hrana špičky destičky trojúhelníkové je vyztužena zesílením ($b_y = 265 \mu\text{m}$).
- 2) Z geometrické analýzy také vyplývá, že řezná hrana vedlejšího ostří nástroje kruhové destičky není zesílena. Řezná hrana vedlejšího ostří trojúhelníkové ($b_y = 168 \mu\text{m}$) a tangenciální ($b_y = 195 \mu\text{m}$) destičky je vyztužena zesílením.

- 3) Kruhová destička má největší rozsah řezných podmínek, tedy jak řezné rychlosti (50 – 300 m/min) tak posuvu na zub (0,17 – 0,6 mm). Horní limit posuvu na zub u destiček trojúhelníkové a tangenciální je 0,35 mm, což je hodnota významně nižší než hodnota dosažená při testech s destičkou kruhovou (0,6 mm). Jedná se tedy o destičku s největším ekonomickým potenciálem, protože dovoluje obrábět s nejvyšším posuvem na zub.
- 4) Hodnoty VB v zóně kontaktu s obráběným materiálem jsou vyšší u kruhové destičky (140 μm) než hodnoty pro trojúhelníkovou (125 μm) a tangenciální (50 μm) destičku.
Na druhou stranu, hodnoty VB na vedlejším ostří nástroje jsou nižší v případě kruhové destičky (75 μm), než u destiček trojúhelníkové (125 μm) a tangenciální (330 μm).
- 5) Řezná hrana kruhové destičky má potenciál obrábět zhruba 60 min řezného času bez výměny řezné hrany. Jedná se tedy o nejlepší destičku ze tří zkoumaných geometrií z hlediska opotřebení.
- 6) Výsledky testů opotřebení řezných břitů jsou propojeny s geometrickou analýzou břitových destiček. Břitové destičky bez zesílení (kruhové) mají lepší řezné vlastnosti a jsou odolnější proti opotřebení než břitové destičky se zesílením (trojúhelníkové, tangenciální). Toto tvrzení je potvrzeno během testů opotřebení řezných břitů výsledky kruhové destičky.
- 7) Ačkoliv je drsnost povrchu po obrábění kruhovou destičkou zhruba sedmkrát vyšší než po obrábění destičkou trojúhelníkovou a tangenciální, obdržená drsnost povrchu s $R_a = 2,85 \mu\text{m}$ je akceptovatelná pro hrubovací operace ve výrobě Framatome.

Z analýzy a modelu sil při obrábění vyplývá, že:

- 1) Výsledek tohoto modelu je obdržení řezné síly F_c , která je používána k výpočtu krouticího momentu pro dimenzování vřeteně obráběcího stroje a příslušenství na něj namontované pro obrábění (např. nástrojové držáky, velká rozhraní mezi vřetenem a obráběcím nástrojem nebo frézovací hlavy). Dále jsou také obdrženy síly F_a a F_z , které se používají k dimenzování upnutí obrobku.
- 2) Vztahy mezi silami při obrábění jsou zjištěny během této práce. Aktivní síla F_a je 1,2 krát vyšší než řezná síla F_c . Síla F_z je dvakrát nižší než řezná síla F_c .

Modernizace a zlepšování výrobních procesů jsou velmi důležité faktory pro udržení kvality a konkurenceschopnosti výroby. Je proto nutné dále pokračovat ve vývoji obráběcích operací v návaznosti na tento projekt. Metodologie představená v této práci je čím dál více využívána a napomáhá zvyšování produktivity a bezpečnosti obráběcích operací, a využívání potenciálu nových obráběcích strojů firmy Framatome na maximum. Je tedy nutné ve výzkumu pokračovat o pro další řezné nástroje a operace, v kombinaci například s moderními metodami sledování obrábění.

ABSTRACT

Ce projet a été créé en coopération avec la société française Framatome, plus précisément dans l'usine de Saint-Marcel, en France, et avec le laboratoire de l'école nationale supérieure d'arts et métiers (ENSAM) ParisTech de Cluny (Laboratoire Bourguignon des Matériaux et Procédés, ou LaBoMaP). L'usine de Saint-Marcel est spécialisée dans la production et l'assemblage de composants nucléaires lourds. LaBoMaP est spécialisé dans l'usinage, ce qui lui confère une renommée internationale dans de nombreux secteurs industriels.

Ce rapport traite de la question de l'industrialisation et du développement de l'usinage dans la production de composants nucléaires. Ces composants sont soumis à de fortes contraintes lors du cycle primaire d'un réacteur nucléaire et leur production repose sur un faible nombre de pièces produites à haute valeur ajoutée. Il est donc nécessaire d'industrialiser efficacement l'usinage et de garantir une productivité de production et de faire «bien du premier coup».

L'objectif de ce projet est l'analyse de l'industrialisation et du développement de l'usinage dans le domaine des composants nucléaires, en termes d'usinage lui-même et également en termes de machines-outils à commande numérique. Tout d'abord, un représentant du secteur industriel, Framatome, est sélectionné et les opérations d'usinage clés sont présentées et analysées. La stratégie d'usinage est ensuite conçue et vérifiée par des tests d'usinage et la méthode couple outil-matière.

Introduction

Framatome est le fabricant et fournisseur mondial de systèmes nucléaires, de combustibles et de services de maintenance offrant les plus hauts niveaux de qualité et de sécurité. Framatome est un acteur international majeur sur le marché nucléaire, connue et reconnue pour ses solutions et technologies innovantes pour la conception, la production et la maintenance du parc nucléaire mondial. Avec ses 14 000 employés dans le monde entier, l'expertise de Framatome aide les clients à améliorer et à gérer les performances et la sécurité des centrales nucléaires et à atteindre des objectifs économiques prédéterminés. Framatome appartient à trois sociétés. Le propriétaire majoritaire est EDF (75,5%), suivi de Mitsubishi Heavy Industries (19,5%) et d'Assystem (5%) [1].

Framatome travaille actuellement sur 250 réacteurs dans le monde entier, générant un bénéfice de 3,3 milliards d'euros [2].

Framatome est divisé en six business units:

- 1) Large Projects
- 2) Installed Base
- 3) Fuel
- 4) Components
- 5) I&C
- 6) Engineering and Design Authority [1].

L'usine de Saint-Marcel est spécialisée dans la fabrication et l'assemblage de composants nucléaires lourds. Cette usine est très importante pour le business unit Composants. Elle comprend des cuves de réacteurs, des générateurs de vapeur, des pressuriseurs et des pipelines fabriqués et assemblés, c'est-à-dire des composants provenant du circuit primaire de la centrale nucléaire. L'usine de Saint-Marcel, située en Saône-et-Loire, compte 850 employés. L'usine comprend également un port d'expédition pour le transport de composants nucléaires finis. Saint-Marcel a fourni plus de 675 unités incorporées dans 106 réacteurs nucléaires dans 11 pays à travers le monde depuis 1975. Les réacteurs les plus lourds et les plus puissants de l'industrie nucléaire française, d'une capacité de 900 à 1600 MW, sont assemblés ici [3].

Réacteur nucléaire – les composants principaux

La répartition et la fonction de la centrale nucléaire sont illustrées à la figure 3. Comme indiqué précédemment, Framatome Saint-Marcel est spécialisé principalement dans la production de composants issus du circuit primaire d'une centrale nucléaire. Le circuit primaire comprend:

- cuves du réacteur ;
- générateurs de vapeur ;
- pressuriseurs ;
- pompe primaire.

Ces pièces sont illustrées à la Fig. 4.

Parmi les composants du circuit primaire mentionnés ci-dessus, le générateur de vapeur et la cuve du réacteur sont parmi les plus complexes en termes d'opérations d'usinage. Le générateur de vapeur est décrit en détail sur la figure 5, ainsi qu'une partie de la cuve du réacteur par rapport à l'homme. Ces composants sont extrêmement lourds et volumineux, avec des exigences élevées aux opérations d'usinage. Plusieurs parties du générateur de vapeur et de la cuve du réacteur avec les opérations d'usinage correspondantes sont énumérées ci-dessous:

- Plaques de support pour tubes (générateurs de vapeur)
 - perçage, brochage;
- ouvertures circulaires du générateur de vapeur et de la cuve du réacteur
 - alésage, forage profond ;
- plans de joints (générateur de vapeur, cuve du réacteur)
 - surfacage, fraisage à grande avance;

- partie supérieure de la cuve du réacteur
 - usinage de poches: lamage en forme de "J";
- plusieurs composants de générateur de vapeur et de cuve de réacteur
 - forage profond.

Ce projet porte sur l'industrialisation de ces opérations d'usinage clés (sauf brochage car cette opération est réalisée sur une brocheuse).

Industrialisation et développement d'usinage dans le domaine de la production de composants nucléaires

Industrialisation

L'industrialisation est un processus qui vise à intégrer un produit ou un processus à la production à l'échelle industrielle. L'industrialisation est effectuée de manière systématique, en suivant la procédure d'industrialisation, en particulier dans les entreprises les plus compétitives comme Framatome [4].

Pendant le projet, cette méthode d'industrialisation est appliquée. Avant de le décrire, il est nécessaire d'ajouter que le développement de l'industrialisation et de l'usinage comprend deux parties importantes:

- industrialisation des opérations d'usinage;
- industrialisation des machines-outils à commande numérique.

Ces deux parties sont fortement interconnectées, principalement parce que l'industrialisation des opérations d'usinage et celle des machines-outils ont lieu simultanément. C'est pourquoi les deux parties sont décrites dans ce projet.

En général, le processus d'industrialisation peut être divisé en six phases:

- 1) initiation
- 2) évaluation
- 3) pré-développement
- 4) développement
- 5) vérification industrielle
- 6) garantir l'application industrielle [4].

La figure 6 illustre l'application de cette procédure dans ce projet. Les autres opérations d'usinage (forage profond, alésage, fraisage à grande avance, usinage de poches) sont industrialisées de la même manière.

Usinage en grandes dimensions

L'énergie, les mines, l'aérospatiale, la construction navale et le nucléaire nécessitent l'usinage de pièces lourdes et volumineuses. Ces pièces lourdes, souvent forgées, doivent être usinées avec une grande précision dans des conditions de production difficiles. Pour obtenir des résultats acceptables après plusieurs opérations d'usinage, les éléments suivants doivent être adaptés:

- 1) machines-outils
- 2) outils de coupe
- 3) capacité de charge du pont roulant pour la manutention des pièces lourdes et volumineuses [5], [6].

Machines-outils lourdes

Les machines-outils lourdes doivent être capables d'effectuer des opérations d'usinage à des vitesses de coupe et d'avance élevées, ainsi que de couper de gros volumes de copeaux. Il est nécessaire que la construction de la machine soit suffisamment rigide et résistante aux effets statiques et dynamiques des efforts de coupe générés au cours de l'opération d'usinage. Des composants tels que le moteur, la boîte de vitesses et les roulements doivent également être modifiés pour résister aux longs temps d'usinage et aux charges thermiques associées. De plus, les machines doivent être équipées de systèmes de compensation de charge thermique et de systèmes surveillance afin de minimiser ces écarts [5], [7].

Les machines-outils lourdes sont adaptées à la forme des pièces usinées. Pour les pièces rotatives, on utilise des tours lourdes horizontales et verticales. Pour les pièces non rotatives, les machines de fraisage et d'alésage horizontales ont l'usage le plus courant. Ces deux principaux types de machines-outils lourdes sont illustrés aux figures 7 et 8 [5].

Ponts roulants pour la manutention des pièces lourdes

Les ponts roulants font partie intégrante de la production et sont indispensables à l'usinage de pièces volumineuses et lourdes. Ils sont l'équipement clé de la production. Sans eux, le montage des pièces ne serait pas possible. Cependant, leur fonctionnement nécessite un personnel formé et expérimenté. Les ponts roulants sont utilisés non seulement pour la manutention des pièces, mais également pour l'assemblage de composants nucléaires et de machines-outils à commande numérique [5], [8].

À Saint-Marcel, des ponts roulants d'une capacité de charge totale de 1 000 000 kg sont disponibles, la capacité de charge du pont individuel est 600 000 kg [3].

Un exemple de pont roulant dans des conditions de production est présenté à la figure 9.

Opérations d'usinage

Forage profond

Le forage profond est une opération de forage pour les trous dont le rapport longueur / diamètre est supérieur à cinq [9].

Le forage profond a une large application industrielle, par exemple dans les industries nucléaire, aérospatiale et naval. L'origine de cette opération vient toutefois de l'industrie de l'armement, où les besoins en armes principalement ont été augmentés, notamment en termes de rectitude et de précision. Après l'industrie de l'armement, l'opération de forage profond s'est étendue aux secteurs susmentionnés [10].

La technologie de forage profond est divisée en fonction de l'alimentation en liquide de refroidissement du point de coupe et du système d'évacuation des copeaux.

Dans l'industrie lourde, 3 technologies majeures peuvent être identifiées:

1) forage profond à l'aide d'un foret Gundrill

- le fluide de coupe haute pression est fourni par le centre de l'outil;
- copeaux sont évacués par une goujure située à l'extérieur de l'outil;
- Moins productif que le forage BTA [9], [10];

2) forage profond à l'aide d'un foret BTA-DTS

- le fluide de coupe est fourni au point de coupe par la double paroi de l'outil;
- copeaux sont évacués par le centre de l'outil [9];

3) forage en profond à l'aide d'un foret BTA-STS

- copeaux sont évacués par le centre de l'outil;
- capsule de forage - le fluide de coupe est alimenté autour du périmètre de l'outil, puis guidé jusqu'au point de coupe;
- Cette technologie est adaptée au forage de trous très profonds [9].

Dans l'industrialisation de l'usinage dans la production de composants nucléaires, il convient de mentionner des paramètres importants pour l'évaluation des opérations de forage en profondeur. Lors des essais d'usinage, les paramètres observés sont le diamètre du trou foré et la tolérance géométrique de la perpendicularité. Ces paramètres ont été mesurés à l'aide d'un laser tracker.

Alésage

L'alésage est une opération d'usinage qui suit généralement le forage ou le perçage précédent [11].

De manière générale, l'alésage aide à atteindre plusieurs critères:

- élargir le trou au diamètre requis;
- correction des écarts de forme des trous;
- amélioration de la qualité de la surface du trou [12].

L'alésage est effectué en deux étapes, les opérations d'ébauche et de finition. L'ébauche est destinée à enlever le plus de matériau possible dans les meilleurs délais et à préparer un trou pré-percé pour l'opération de finition. La finition est axée sur la qualité de la surface et la tolérance des trous. Ces opérations sont illustrées à la figure 12. Dans la plupart des cas industriels, un outil à plaquette de coupe double est utilisé pour l'opération d'ébauche. D'autre part, un outil avec une seule plaquette de coupe est utilisé pour la finition [13].

L'industrialisation de ce processus dans la production de composants nucléaires nécessite des tests spéciaux pour vérifier la technologie en termes d'outils de coupe, de conditions de coupe et de machines-outils à commande numérique. Les résultats mesurés au cours de ce projet sont présentés à la figure 13. Il s'agit d'une comparaison d'un trou foré utilisant un forage profond et d'un trou alésé par la suite (ébauche et finition). Le trou alésé est ensuite mesuré avec un scanner 3D pour obtenir le diamètre souhaité et les valeurs de perpendicularité. Cette méthode de mesure est très rapide et convient parfaitement aux conditions de production Framatome.

L'alésage est également utilisé pour le tournage intérieur de trous de grand diamètre ou pour l'usinage de tubulures (Fig. 15). Pour utiliser ce procédé, il est nécessaire d'utiliser une aléreuse spéciale ou un plateau d'alésage spécial qui peut être montée sur la fraiseuse et l'aléreuse. Le plateau est illustrée à la figure 16 et fait partie des accessoires d'usinage largement utilisés qui augmentent la variabilité de la machine-outil et aident la machine à usiner des pièces de formes plus complexes.

Fraisage avec les grandes vitesses d'avance

Le fraisage à grande vitesse d'avance est une technologie d'ébauche très efficace. L'objectif est d'enlever le plus grand volume possible de matériel dans les meilleurs délais. Ce processus offre une productivité élevée et un enlèvement de matière accru par rapport au fraisage conventionnel. Cependant, cette technologie nécessite une optimisation adéquate pour réduire les effets négatifs et les résultats indésirables [14].

Ce projet optimise cette opération d'usinage pour obtenir les résultats souhaités dans des temps d'usinage longs. Cette opération est illustrée à la figure 17 avec des outils typiques adaptés au fraisage à des vitesses d'avance élevées. Dans la production de Saint-Marcel Framatome, la technologie permet de remplacer le surfacage lourd conventionnel avec des outils de grand diamètre mais des vitesses d'avance plus faibles.

Pour industrialiser le procédé, il convient de l'optimiser. La méthode couple outil-matière est utilisée pour l'optimisation. Cette méthode est décrite en détail à la section 4.3 et est normalisée par la norme NF E66 520. Cependant, les parties les plus importantes de la méthode sont décrites ci-dessous:

- 1) détermination de la plage de vitesses v_c
- 2) détermination de la plage d'avance par dent f_z ou des épaisseurs moyennes de copeaux h_m
- 3) essais d'usure [15].

Spécifications détaillées de cette opération dans la production Framatome:

- matériel 16MND5;
- usinage à sec;
- $a_p = 1,5$ mm;
- a_e n'est pas constant pendant l'usinage, la puissance est mesurée en sections avec les mêmes conditions de coupe pour des résultats fiables.
- les valeurs de puissance de la broche sont relevées de l'écran du système NC.

L'outil de coupe a un faible angle κ_r . Ses caractéristiques géométriques sont décrites à la Fig. 18 et au tableau 2.1. Le faible angle κ_r est requis pour cette technologie afin de diriger des forces de coupe élevées dans la direction axiale (dans la broche). Cette direction est souhaitable car elle permet une plus grande stabilité lors du fraisage. Avec cette solution, la principale source de vibration, l'effort radial, est limitée [14].

Les résultats des tests sont décrits en détail au chapitre 2.3.3. La détermination des paramètres de coupe a été réalisée.

L'objectif des essais d'usure est de parvenir à un équilibre entre les conditions de coupe et la durée de vie de l'outil pour une productivité maximale. Des tests ont été effectués. La durée de vie de l'outil obtenue est de 50 min, ce qui est un résultat acceptable pour la fabrication. Pour plus de détails sur les tests et les résultats, voir le chapitre 2.3.3.

Des tests ont montré le potentiel réel du fraisage à grande vitesse d'avance. Avant d'appliquer ce procédé, un outil de coupe d'un diamètre de 315 mm était utilisé pour l'usinage d'une partie non nommée du réacteur nucléaire. Le temps de coupe net avec cet outil était de 5 h 13 min. En utilisant la stratégie de fraisage à grande vitesse avec des paramètres optimisés, un temps de coupe net de 3 h 13 min est obtenu.

Aujourd'hui, cette stratégie permet d'économiser 38% de temps de coupe sur l'une des pièces stratégiques de Framatome et est appliquée à de nombreux autres composants usinés.

Usinage des poches

Dans l'industrie moderne, l'usinage de poche est principalement utilisé pour éliminer les excès de poids sur les pièces critiques [12]. Dans l'industrie nucléaire, l'usinage de poches a un objectif différent: il permet d'obtenir les formes de grandes rainures de guidage souhaitées pour le montage de composants (par exemple, des cuves) ou pour l'usinage de rainures ou de poches spéciales, les lamages en forme de "J". Ces poches spéciales en forme de "J" sont illustrées à la figure 24. Il s'agit d'une opération très spécifique pour Framatome, dont l'industrialisation est très complexe en termes de programmation CNC, de sélection des outils de coupe et de conditions de coupe. La forme de la poche en "J" nécessite une opération d'ébauche en plusieurs étages (les escaliers) dans le matériau à usiner. Ces escaliers sont ensuite usinés lors de la finition. Un outil de coupe approprié est, par exemple, une fraise sphérique, habituellement utilisée pour l'usinage de moules.

Industrialisation de machines-outils à commande numérique pour la production de composants nucléaires

Essai des machines-outils à commande numérique - Essais lors de la réception de la machine

Les essais des machines-outils à commande numérique est une branche spéciale de la métrologie. Il est spécifique aux procédures de métrologie et à la gestion des outils de mesure. Les essais des machines-outils à commande numérique sont divisés en plusieurs parties, illustrées schématiquement à la Fig. 26 [5].

Le premier groupe s'appelle les essais de réception. Ces tests sont convenus contractuellement entre le client et le vendeur de la machine. Les tests de réception sont effectués chez le fabricant, puis après assemblage chez le client. Le but de ces tests est de vérifier les paramètres de la machine spécifiés par le fabricant [5], [16].

Les essais prototypes étendent les tests d'acceptation, notamment pour détecter les caractéristiques inattendues de la machine qui ne sont pas visibles pendant la production de la machine. Ces tests permettent également de déterminer les limites de performances de la machine dans des conditions de production [5].

Le chapitre 3.1 est consacré aux essais de réception. Ceux-ci peuvent ensuite être divisés en:

- caractéristiques et spécifications techniques ;
- essais de précision géométrique;
- les normes;
- essais de charge (en usinage) de la machine;
- essais de précision de positionnement et de répétabilité;
- essais de vibration et de déformation thermique;
- essais d'interpolation circulaire.

Essais de précision géométrique

Les essais de précision géométrique visent à décrire la structure géométrique d'une machine-outil en termes de mouvement des pièces fonctionnelles et de précision des formes affectant la précision de travail [5], [16].

Les tolérances géométriques mesurées lors des essais de réception sont les suivantes [16]:

- rectitude
 - la rectitude est mesurée principalement sur les surfaces de guidage à l'aide de méthodes traditionnelles ou à l'aide d'un interféromètre laser [5], [16];
- inclinaison
 - l'inclinaison est mesurée à l'aide d'un niveau ou d'instruments optiques [17];
- perpendicularité
 - la perpendicularité est mesurée à l'aide d'équerres de précision, d'indicateurs ou d'interféromètres laser [5], [16];
- parallélisme
 - le parallélisme est mesuré au niveau ou en micromètres internes [5], [16];
- coaxialité
 - la coaxialité est mesurée avec des mandrins de contrôle ou un interféromètre laser [5], [16];

- planéité
 - la planéité est mesuré à l'aide de règles, de niveau ou d'un interféromètre laser; cette mesure est particulièrement nécessaire sur les tables de machines-outils [5], [16];
- battement
 - le battement radial et axial est mesuré à l'aide de mandrins de contrôle et de calibres [17].

Normes

Les normes très souvent utilise pour l'inspection des machines-outils sont:

- ISO 230;
- ISO 10791;
- VDI/DGI 3441;
- ANSI B5:54;
- JIS B 6330-1980 [5].

Essais sous charge en usinage

Les essais de charge de la machine se composent de deux parties:

- 1) tests de puissance de la broche
- 2) tests de précision d'usinage.

Les tests de puissance vérifient que la machine est capable de supporter de charges importantes lors de l'usinage, ainsi que la compatibilité des composants électriques et mécaniques avec des efforts d'usinage élevés sur des phases transitoires courtes [5].

Les tests de précision d'usinage sont effectués dans des conditions de température stable. La précision est testée sur des pièces d'essais qui varient selon le type de machine-outil. Ces pièces sont définies soit par une norme telle que ISO 10791-7, soit par le fabricant de la machine. Les pièces d'essais font partie du contrat entre le client et le fabricant. La forme, les écarts de position, les conditions technologiques et les conditions de mesure acceptables sont définis sur la pièce [5], [16].

Des exemples des pièces sont illustrés aux figures 33 et 34.

Essais de précision et de répétabilité du positionnement

La précision et la répétabilité du positionnement de la machine sur une position donnée sont des caractéristiques importantes à vérifier pour l'acceptation de la machine-outil. Ils vérifient si la machine-outil est capable de se positionner de manière précise et répétable [5].

Les tests doivent être effectués pour chaque axe de la machine sans charge, très souvent selon VDI / DGI 3441 [5], [18].

Essais de vibrations et de déformations thermiques

L'analyse des vibrations permet de définir la qualité de la broche et de ses composants. Cette méthode est appliquée lors de la réception d'une nouvelle machine-outil et régulièrement pendant la durée de vie de la machine à des fins de maintenance préventive [19], [20].

Pour diagnostiquer une machine-outil à commande numérique, il faut obtenir des spectres de vibration. En utilisant ces spectres et la cinématique de la machine, il est possible de détecter d'éventuels défauts [21], [20].

Pour obtenir les spectres de vibration, il est nécessaire d'effectuer des mesures, comme sur les figures 35 et 36. L'appareil de mesure comprend:

- accéléromètres montés dans plusieurs directions;
- carte d'acquisition;
- ordinateur avec un logiciel adapté.

Des capteurs de température (Fig. 35 et 36) peuvent être ajoutés pour compléter l'analyse des vibrations, en particulier pour les composants très chargés (comme les roulements).

Les vibrations de la machine sont évaluées selon ISO 10816-3: 2009.

Une analyse dynamique détaillée de la machine est également nécessaire pour la modélisation et la simulation des vibrations résultant des opérations d'usinage. Cette analyse est donc très importante pour la poursuite des recherches scientifiques sur une machine particulière [22].

Les essais de déformation thermique sont normalisés à la norme ISO 10791-10 et se composent de trois parties:

- 1) test de température ambiante (ETVE)
- 2) test de déformation thermique provoquée par la rotation de la broche
- 3) test de déformation thermique provoquée par des mouvements linéaires de la machine [23].

En général, les déformations de température sont mesurées à l'aide de capteurs [23]. La mesure est illustrée aux figures 38 et 39.

Essais d'interpolation circulaire

Dans l'industrie actuelle, le test Ballbar est l'un des dispositifs de contrôle les plus répandus pour contrôler les interpolations circulaires. C'est un moyen très simple et rapide de contrôler l'interpolation pour un axe donné de machine-outil à commande numérique, conformément aux normes internationales [24].

Le Ballbar est composé d'un capteur télescopique linéaire de haute précision avec une sphère à chaque extrémité et de deux supports magnétiques fixés à la table et à la broche de la machine-outil. Cet ensemble est illustré à la Fig. 40.

En théorie, lors de la programmation d'une machine-outil à commande numérique, les trajectoires circulaires décrites par la machine doivent correspondre à celles programmées. En réalité, de nombreux facteurs, tels que la géométrie ou l'usure de la machine, contribuent aux écarts entre les interpolations circulaires réelles et programmées [25].

Le Ballbar mesure les petits écarts de rayon décrits par la machine lors d'un mouvement circulaire programmé autour d'un support magnétique fixé à la table de la machine [24]. Cette mesure aide les ingénieurs à évaluer la précision d'une machine-outil à commande numérique [25].

Développement de la technologie d'usinage et sa vérification

Les nouvelles machines-outils ouvrent de nouvelles possibilités pour les technologies d'usinage, notamment le remplacement des outils de gros diamètre par des outils de plus petit diamètre avec une vitesse d'avance plus élevée, pour la technologie de surfacage - ébauche. Cette technologie doit faire l'objet de recherches et de tests approfondis pour assurer le succès de l'industrialisation.

Matériau 16MND5

Les cuves des réacteurs et les générateurs de vapeur français sont en acier faiblement allié 16MND5 (ou 16MnNiMo5) [26]. C'est également le matériau d'usinage le plus couramment utilisé chez Framatome Saint-Marcel, c'est pourquoi cet acier a été choisi comme matériau les essais.

Les principales caractéristiques de 16MND5 sont:

- bonne conductivité thermique;
- excellente soudabilité;
- bon comportement sous radiation;
- prix bas;
- R_m environ 800 MPa;
- dureté 20 HRC [27].

La composition chimique de cet acier faiblement allié est spécifiée dans le tableau 4.1.

Analyse géométrique des outils coupants

Dans ce projet, 3 types de plaquettes de coupe pour la technologie de surfacage sont étudiés:

- ronde;
- triangulaire;
- tangentielle.

Les plaquettes de coupe sont conçues pour l'ébauche et la semi-finition en surfacage. Ils ont un revêtement de TiAlN / TiN.

Les outils coupants (fraises) utilisés pour les tests ont un diamètre de 50 mm et sont serrés à l'aide du HSK A63 avec l'arrosage au centre de l'outil.

Les spécifications géométriques des outils et des plaquettes sont illustrées à la figure 42.

Mesure de la géométrie des outils coupants

L'équipement de mesure est l'instrument Alicona et le microscope Keyence. La méthode d'observation et les mesures sont effectuées conformément à la norme ISO 3002.

En raison de la possibilité limitée de monter les plaquettes sur l'Alicona, il n'est pas possible de mesurer les angles de travail de l'outil et seules quelques caractéristiques dimensionnelles de l'outil sont mesurées:

- r : rayon d'arête moyen;
- β : angle de taillant;
- b_y : longueur de listel.

Les résultats de l'analyse géométrique des outils de coupe sont décrits en détail au chapitre 4.2.2.

Méthode Couple outil-matière

Cette méthode est décrite en détail au chapitre 4.3 et est normalisée par la norme NF E66 520. Il s'agit d'une méthode permettant d'obtenir les conditions de coupe les mieux adaptées à un outil donné.

La méthode comprend les étapes suivantes:

- 1) détermination de la plage de vitesses de coupe utilisables v_c
- 2) détermination de la plage des avances par dent f_z ou des épaisseurs moyennes de copeaux h_m
- 3) essais d'usure [15].

Les tests d'usinage sont composés de trois parties:

1) essais de qualification

- Le but de cet essai est d'assurer la compatibilité entre l'outil et le matériau à usiner et de trouver des conditions de coupe acceptables et stables pour le démarrage des essais. Ces conditions sont souvent données par le fournisseur des outils coupants [15].

2) domaine d'application (plage de conditions de coupe)

- Une fois les essais d'usinage terminés, la plage de conditions de coupe est conçue pour une utilisation fiable de l'outil, du matériau à usiner et des conditions données [15].

3) restrictions

- Cette dernière phase spécifie des restrictions pour l'environnement de travail lors des essais d'usinage. Ce sont principalement les caractéristiques fonctionnelles de la machine-outil (puissance, couple, forces, vibrations, rigidité), l'interface machine-outil et outil, la rigidité de la pièce usinée, le bridage de la pièce, la longueur de l'outil coupant, etc.

➔ Ces restrictions réduisent les zones de travail.

La spécification générale d'usinage pour la méthode couple outil-matière

- a_e est égal au un tiers du diamètre de l'outil;
- le fraisage en avalant;
- l'arrosage par le centre de l'outil;
- une seule plaquette sur la fraise est montée pendant les essais pour obtenir l'évolution d'un signal d'efforts en fonction du temps pendant la phase de contact de la dent avec la matière;
- la machine DMG DMC 65V utilisé pour les essais.

L'équipement de mesure

Les forces et la puissance d'usinage sont mesurées lors des essais d'usinage :

- mesure de force:
 - le dynamomètre piézoélectrique de KISTLER, modèle 9255A;
 - Mesure des efforts dans l'intervalle de 40 kN dans la direction Z;
- mesure de puissance:
 - la puissance est mesurée à l'aide d'un wattmètre entre le variateur de broche de la machine-outil et le moteur de broche.

Épaisseur moyenne de copeaux h_m

Le chapitre 4.3.4 présente des méthodes complexes pour calculer l'épaisseur de copeau moyenne pour une géométrie de plaquette de coupe donnée.

Résultats de la méthode Couple outil-matière

Les résultats de la méthode couple outil-matière sont décrits en détail aux chapitres 4.3.5 et 4.3.6.

La plaquette ronde a la plus grande plage de travail, à la fois la vitesse de coupe et l'avance par dent. Il s'agit donc de la plaquette la plus variable et potentiellement la plaquette la plus économique, car elle permet d'utiliser l'avance par dent la plus élevée possible des trois géométries testées.

Les essais d'usure

Pour les essais d'usure, les conditions de coupe déterminées expérimentalement lors des essais de couple outil-matière ont été utilisées (tableau 4.5). Ce sont des tests de fraisage successif, avec l'arrosage au centre de l'outil et une seule plaquette par l'outil coupant.

L'usure est mesurée à des intervalles d'usinage de 5 minutes à l'aide d'un microscope Keyence. Le microscope est montré à la Fig. 58.

Pendant les essais, la puissance est mesurée à l'aide d'un wattmètre FLUKE. La puissance est un indicateur de contrôle.

Lors des essais d'usure des plaquettes, deux mécanismes d'usure ont été observés dans les deux zones examinées:

- 1) usure en dépouille;
- 2) écaillage de l'arête.

Essais d'usure - Résultats

La plaquette ronde est la plus stable en termes d'usure. Le développement de l'usure dans les deux zones observées est très stable, la courbe d'usure augmente de manière très contrôlée. D'après les résultats du test, il s'agit de la meilleure plaquette des trois géométries étudiées pour l'usure.

De plus, le W_c (paramètre de contrôle, calculé à partir de la puissance mesurée) de la plaquette ronde est le plus stable. Pour une plaquette ronde, comme seule des géométries examinées, la courbe W_c diminue.

La plaquette triangulaire est stable en termes d'usure, mais moins stable que la plaquette ronde.

La plaquette tangentielle est stable pendant les 30 premières minutes d'usinage, mais une augmentation critique de l'usure se produit au cours des 5 minutes suivantes. Cette usure est plusieurs fois supérieure à celle des plaquettes rondes et triangulaires.

La rugosité de surface est également mesurée lors des essais. Les plaquettes triangulaires et tangentielles donnent de très bons résultats. La plaquette ronde produit une rugosité de surface R_a de $2,85 \mu\text{m}$. Cette valeur est sept fois plus élevée que pour les plaquettes triangulaires et tangentielles.

Le critère de rugosité de surface de Framatome pour les opérations d'ébauche permet une rugosité de surface R_a de $2,85 \mu\text{m}$. Ainsi, une plaquette ronde est le meilleur choix pour un comportement dans la coupe, une stabilité et une résistance à l'usure excellents.

Analyse et modélisation des efforts d'usinage

Analyse des efforts d'usinage

Le système de coordonnées du dynamomètre et le système de coordonnées de l'outil ne sont pas identiques. Pour convertir la force active F_a du système de coordonnées en système de coordonnées rotatif de l'outil, le logiciel DasyLab utilise les équations 5.1 et 5.2. La force active est dans le plan de travail défini par les vecteurs v_c et v_f .

F_a et F_z suffisent aux objectifs de cette étude. La conversion des forces spécifiques F_x , F_y , F_z (système de coordonnées de dynamomètre, forces mesurées lors de l'usinage) en système de coordonnées rotatif de l'outil avec les forces F_c , F_{cN} , F_z est expliquée à la Fig. 70. Des tests ont montré que les forces de coupe pour les plaquettes triangulaires et tangentielles sont uniquement dans le plan XY. Ceci est un problème 2D. Cependant, pour une plaquette ronde, la force F_z atteint des valeurs plus élevées, non négligeables. Ceci est un problème 3D pour la plaquette ronde. Cet effet est dû à la géométrie de la plaquette. En raison des géométries des plaquettes triangulaires et tangentielles, la force F_z est négligeable mais pour une plaquette ronde atteint des valeurs d'environ 500 N. Les signaux des efforts pour toutes les géométries examinées sont illustrés aux figures 71, 72 et 73.

Lorsque l'entrée de dent dans le matériau pendant l'usinage, la courbe du signal des efforts n'est pas constante et le signal change comme indiqué sur la Fig. 74. Ce changement est dû à l'augmentation rapide de h_m pendant l'entrée de dent dans la coupe en combinaison avec le choc d'entrée dans la matière et à la chute rapide de h_m à la sortie de dent de la coupe [28].

Modélisation des efforts d'usinage

Dans ce projet, un modèle de force est créé pour dimensionner le bridage et la puissance consommée par la broche. C'est un modèle simple basé sur les conditions de coupe, utilisant le graphe W_c en fonction de h_m et sur les relations mathématiques entre les forces F_c , F_a et F_z .

À la suite de ce modèle, les éléments suivants sont reçus:

- La force F_c sert à calculer le couple nécessaire au dimensionnement d'une broche de machine-outil et des accessoires qui y sont montés pendant l'usinage. Ceux-ci comprennent les porte-outils, les grandes interfaces entre la broche et l'outil de coupe, ou les têtes de fraisage.
- Les forces F_a et F_z sont utilisées pour dimensionner le serrage de la pièce.

Ce résultat est souhaitable pour les conditions de fabrication de la société Framatome.

Le modèle des efforts de coupe est décrit en détail au chapitre 5.2.

Conclusions

L'étude théorique et les expériences pratiques du projet permettent de tirer les conclusions décrites ci-dessous.

Les résultats de l'industrialisation des opérations d'usinage et des machines-outils à commande numérique sont:

- 1) L'industrialisation du fraisage à grande avance permet d'économiser 38% du temps de coupe sur l'une des pièces stratégiques de Framatome. Grâce à ce projet, cette technologie s'applique également à de nombreux autres composants usinés, avec les conditions de coupe optimisées (vitesse de coupe est égale à 230 m/min et l'avance par dent est égale à 1,6 mm).
- 2) Du fait de l'industrialisation d'autres opérations d'usinage (forage profond, alésage et usinage des poches) présentées dans ce travail, ces opérations ont été introduites avec succès dans la production de Framatome sur une nouvelle machine-outil.

- 3) Les informations théoriques et pratiques obtenues au cours de ce projet constituent une partie très importante du projet d'investissement pour l'industrialisation de nouvelles machines-outils lourdes dans la production de Framatome. Les tests et méthodes présentés sont appliqués et contribuent au succès de la vérification et de l'industrialisation de plusieurs machines, ce qui a des conséquences positives sur le planning du projet et les résultats financiers de l'investissement.

L'analyse du surfaçage lors de l'ébauche montre que:

- 1) Les résultats de l'analyse géométrique montrent que l'arête des plaquettes rondes et tangentielles n'est pas renforcée dans le rayon bec. D'autre part, l'arête de la plaquette triangulaire est renforcée par un listel ($b\gamma = 265 \mu\text{m}$).
- 2) L'analyse géométrique montre également que l'arête latérale de la plaquette ronde n'est pas renforcée. L'arête latérale des plaquettes triangulaires ($b\gamma = 168 \mu\text{m}$) et tangentielles ($b\gamma = 195 \mu\text{m}$) est renforcé
- 3) La plaquette ronde présente la plus grande zone de conditions de coupe, concernant la vitesse de coupe (50 - 300 m / min) et l'avance par dent (0,17 - 0,6 mm). La limite supérieure d'avance par dent des plaquettes triangulaires et tangentielles est 0,35 mm. Cette valeur est inférieure à la valeur obtenue pendant les essais avec la plaquette ronde (0,6 mm). Il s'agit donc de la plaquette qui présente le plus grand potentiel économique, car elle permet l'usinage avec l'avance par dent la plus élevée.
- 4) Pour une plaquette ronde (140 μm), les valeurs de VB dans la zone de contact avec la matière usinée sont supérieures aux valeurs obtenues avec des plaquettes triangulaires (125 μm) et tangentielles (50 μm).
En revanche, les valeurs de VB sur l'arête latérale sont plus faibles pour les plaquettes rondes (75 μm) que pour les plaquettes triangulaires (125 μm) et tangentielles (330 μm).
- 5) L'arête de la plaquette ronde peut usiner environ 60 minutes sans changer l'arête. C'est donc la meilleure plaquette des trois géométries étudiées en termes d'usure.
- 6) Les résultats des essais d'usure sont liés à l'analyse géométrique des plaquettes. Les plaquettes sans listel (ronde) ont de meilleures propriétés de coupe et sont plus résistantes à l'usure que les plaquettes avec un listel (triangulaire, tangentiel). Cette affirmation est confirmée lors des résultats des essais d'usure de la plaquette ronde.

- 7) Bien que la rugosité de surface après l'usinage avec les plaquettes rondes soit environ sept fois supérieure à celle obtenue après l'usinage avec les plaquettes triangulaire et tangentielle, la rugosité de surface obtenue avec $R_a = 2,85 \mu\text{m}$ est acceptable pour les opérations d'ébauche dans la production Framatome.

L'analyse et le modèle des efforts d'usinage montrent que:

- 1) Le résultat de ce modèle est d'obtenir la force de coupe F_c , utilisée pour calculer le couple nécessaire au dimensionnement de la broche de machine-outil et d'accessoires montés dessus pour l'usinage (par exemple, porte-outils, grandes interfaces entre la broche et l'outil ou les têtes de fraisage). De plus, les efforts F_a et F_z sont également utilisées pour dimensionner le bridage des pièces.
- 2) Les relations entre les efforts d'usinage sont déterminées au cours de ce projet. L'effort actif correspond à 1,2 fois effort de coupe F_c . L'effort F_z est deux fois inférieur que l'effort de coupe F_c .

La modernisation et l'amélioration des processus de production sont des facteurs très importants pour le maintien de la qualité et de la compétitivité de la production. Il est donc nécessaire de poursuivre le développement des opérations d'usinage liées à ce projet. La méthodologie introduite dans ce travail est de plus en plus utilisée pour augmenter la productivité et la sécurité des opérations d'usinage et pour maximiser le potentiel des nouvelles machines-outils de la société Framatome. Il est donc nécessaire de poursuivre les recherches sur d'autres outils et opérations d'usinage, en combinaison, par exemple, avec les méthodes modernes de surveillance d'usinage.

ABSTRACT

The aim of this work is the analysis of industrialization and development of machining in the field of nuclear components in terms of machining itself and also in terms of CNC machine tools. First, a representative for the area, Framatome, is selected and key machining operations are presented and analysed. Subsequently, the machining technology is designed, and it is verified by machining tests and the method of Couple tool-material. Model of machining forces is developed.

Key words

Industrialization, machining, couple tool-material, nuclear components

BIBLIOGRAPHIC CITATION

KOLMAČKA, Jan. *Industrializace a vývoj obrábění v oblasti výroby jaderných komponent*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/121563>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Miroslav Píška.

DECLARATION

I declare that this master's thesis **Industrialization and Development of Machining in Nuclear Components Manufacturing** is a presentation of my original research work and that I wrote it with the use of sources mentioned in the Bibliography section of this thesis.

Date

Bc. Jan Kolmačka

ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to express my sincere gratitude to prof. Ing. Miroslav Píška, CSc. for his continuous support, insightful comments, his guidance throughout my studies and the opportunity to participate in the Industrial Engineering double degree programme.

I would also like to thank Ing. David Prat, Ph.D. for his valuable comments and advices.

My sincere thanks also goes to Jean-Baptiste Sabre and Cédric Bonnet, Ph.D for the opportunity to participate on such an interesting project and to join their team in Framatome Saint-Marcel.

I would like to thank my whole family and my fiancée for their infinite support.

CONTENT

ABSTRAKT	3
ABSTRACT	20
ABSTRACT	39
DECLARATION.....	40
ACKNOWLEDGEMENTS	41
CONTENT	42
INTRODUCTION.....	44
1 Choice of the representant for a given application – Framatome.....	45
1.1 Company introduction	45
1.2 Nuclear reactors – typical parts.....	46
2 Industrialization and development of machining in nuclear components manufacturing	49
2.1 Industrialization	49
2.2 Large dimensions machining	50
2.2.1 Heavy machine tools	50
2.2.2 Crane for handling of heavy parts.....	52
2.3 Machining operations	52
2.3.1 Deep hole drilling.....	52
2.3.2 Boring	54
2.3.3 Face milling – High Feed Machining.....	57
2.3.4 Pocket machining	61
3 Industrialization of CNC machine tools for nuclear components manufacturing.	63
3.1 Testing of CNC machine tools – Acceptance tests	63
3.1.1 Geometric accuracy.....	64
3.1.2 Standards	67
3.1.3 Testing at machine loading.....	67
3.1.4 Accuracy and repeatability at position setting.....	69
3.1.5 Auxiliary tests – Thermal distortions and vibrations.....	70
3.1.6 Auxiliary tests – Circular interpolations.....	73
4 Development of machining strategy	74
4.1 Introduction	74
4.1.1 Material 16MND5.....	74
4.2 Geometrical analysis of cutting tools.....	75
4.2.1 Measurement methodology	76
4.2.2 Results of geometrical analysis	78

4.3	Working zones of cutting tools: Couple tool-material	81
4.3.1	Definition of Couple tool-material.....	81
4.3.2	Material restrictions of Couple tool-material	81
4.3.3	Acquisition chain.....	82
4.3.4	Average chip thickness h_m	82
4.3.5	Results Couple tool-material	85
4.3.6	Working zones of cutting inserts.....	87
4.4	Wear tests.....	88
4.4.1	Wear tests context.....	88
4.4.2	Surveillance of a power	89
4.4.3	Observed wear mechanisms	89
4.4.4	Round insert – Wear after tests.....	90
4.4.5	Triangular insert – Wear after tests	90
4.4.6	Tangential insert – Wear after tests.....	91
4.4.7	Wear tests results.....	91
4.4.8	Wear tests – Conclusions.....	93
5	Analysis and modelling of machining forces	95
5.1	Machining forces analysis	95
5.2	Modelling of machining forces.....	99
5.2.1	Application of the model	100
6	CONCLUSIONS.....	107
	BIBLIOGRAPHY	109
	LIST OF USED SYMBOLS AND ABBREVIATIONS	113

INTRODUCTION

This work was elaborated in a cooperation with the French company Framatome, more precisely in the Saint-Marcel plant, in France, and with the laboratory of the university of Arts et Métiers (ENSAM) ParisTech in Cluny (Laboratoire Bourguignon des Matériaux et Procédés, or LaBoMaP). The Saint-Marcel plant specializes in the production and the assembly of heavy nuclear components, while LaBoMaP is recognized in machining research center appreciated by industry.

This work deals with the issue of industrialization and development of machining in the manufacturing of nuclear components. These components of reactor primary cycle are subjected to very high stresses and high thermal conditions. The manufacturing process must be though, adapted to the production of the high quality products, according to highly restricted norms and standards. The production is therefore focused on the manufacturing of a low number of high value-added pieces. Hence, it is necessary to efficiently industrialize the machining and guarantee productivity by decrease of the failure parts.

The aim of this work is the analysis of industrialization and development of machining in the field of nuclear components manufacturing in terms of machining itself and also in terms of CNC machine tools. First, a representative for the area, Framatome, is selected and key machining operations are presented and analysed. Subsequently, the machining technology is designed, and it is verified by machining tests and the method of Couple tool-material.

1 CHOICE OF THE REPRESENTANT FOR A GIVEN APPLICATION – FRAMATOME

This project is created in cooperation with French company Framatome. This chapter introduces the company itself with its characteristic parts.

1.1 Company introduction

Framatome is a supplier and a designer of nuclear steam supply systems and nuclear equipment, fuel and services with high levels of performance and security. Framatome is an international company, with significant position in the nuclear energy market well known and recognized for innovative solutions and technologies for building, designing, improving and maintaining the global nuclear fleet. Company has 14000 employees worldwide and Framatome's expertise helps its customers to master and improve the performance and the safety of nuclear power plants as well as to achieve their economic goals. Framatome is owned by a trio of companies. Majority of its stock is owned by EDF (75,5 %), then Mitsubishi Heavy Industries (19,5 %) and Assystem (5 %) [1].

Framatome works on more than 250 reactors worldwide generating a turnover of 3.3 billion euros [2].

Framatome is divided into six business units presented in Fig. 1:

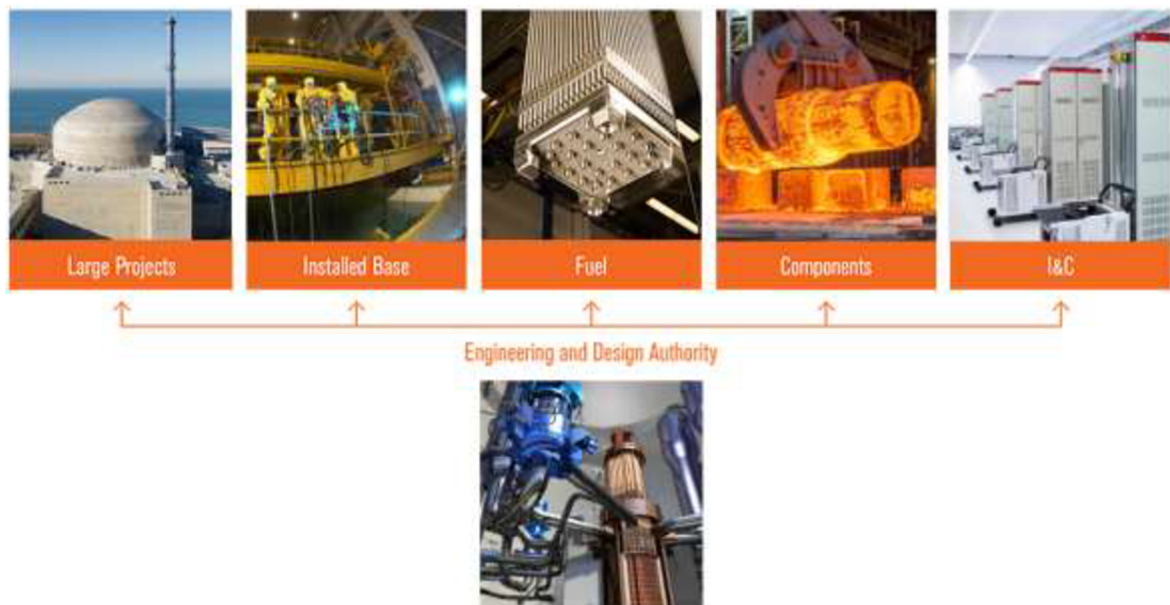


Fig. 1 Framatome business units [1].

This project is carried out in Framatome's plant Saint-Marcel (Fig. 2), a plant which is dedicated to heavy equipment fabrication and assembly. It is an important site of Components Business Unit, where are produced and assembled vessels, steam generators, pressurizers and piping, comprising the primary loop of nuclear reactors. Saint-Marcel site, located in a region Saône-et-Loire in France, has 850 employees, multimodal shipping platform and is supplying more than 675 components integrated into 106 nuclear reactors in 11 countries since 1975. In the Saint-Marcel plant, the majority of heavy equipment for the French nuclear reactors between 900 MW and 1600 MW capacity is assembled [3].



Fig. 2 Framatome Saint-Marcel plant [31].

1.2 Nuclear reactors – typical parts

Components and operation of a nuclear power plant are illustrated in Fig. 3.

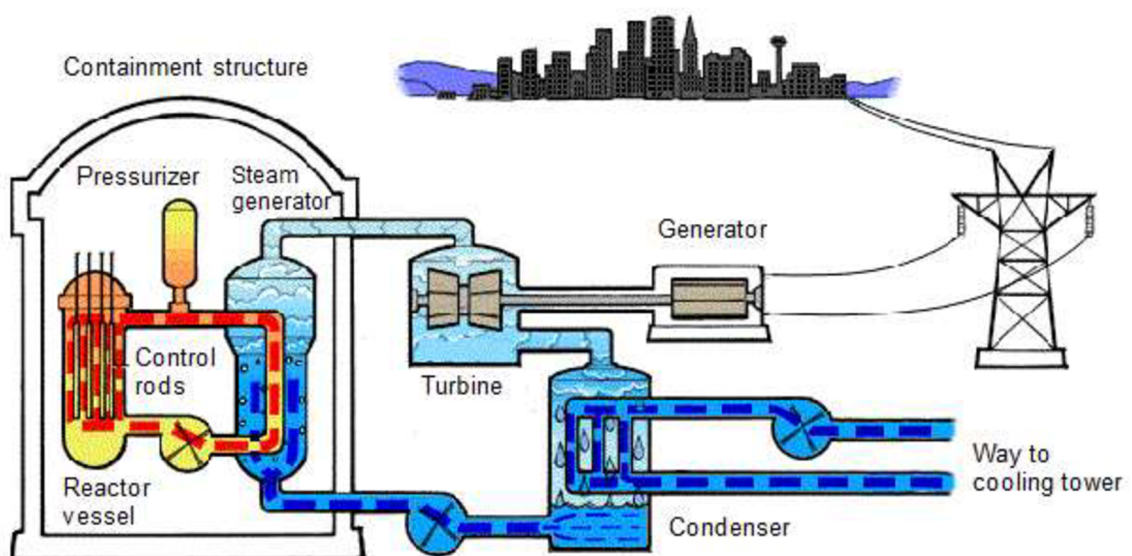


Fig. 3 Nuclear power plant [29].

Framatome is specialized mainly in a fabrication of components of primary loop of a power plant. This primary loop is composed of following parts and is illustrated in Fig. 4:

- steam generator;
- reactor vessel;
- pressurizer;
- primary pump.

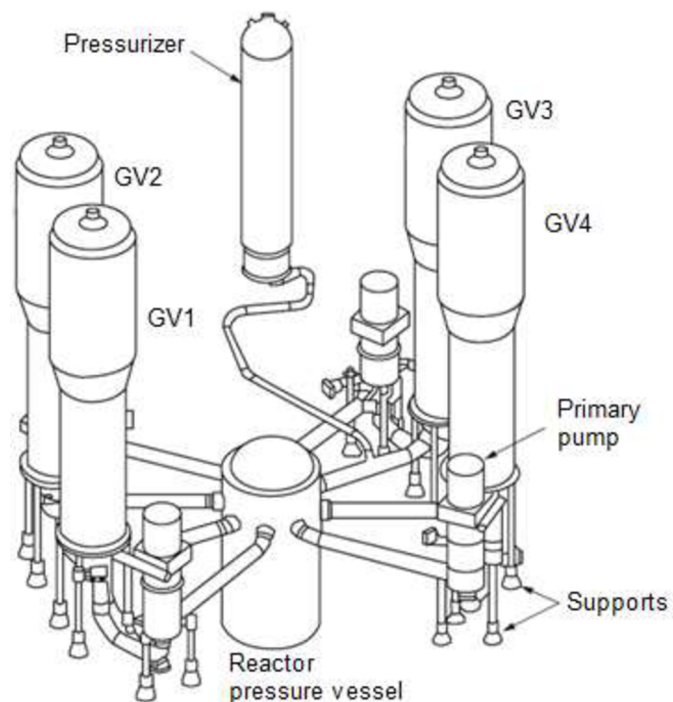


Fig. 4 Primary loop [32].

From mentioned primary loop components, steam generator and reactor vessel are one of the most complex parts concerning machining operations. Steam generator is detailed in Fig. 5 and in the same figure, part of a reactor vessel is compared to a human scale. These parts are enormous and heavy with high demands on machining operations.

Below are listed multiple components and corresponding typical machining operation:

- tube support plates (steam generator)
 - drilling, broaching;
- all circular entrances in steam generator and reactor vessel
 - boring, deep hole drilling;

- shells joining surfaces (steam generator, reactor vessel)
 - face milling, high feed machining;
- superior part of a reactor vessel
 - pocket machining: J-grooves;
- multiple components of a steam generator and reactor vessel
 - deep hole drilling.

In this project, industrialization of these crucial machining operations is investigated (except broaching since it is performed on a special broaching machine).

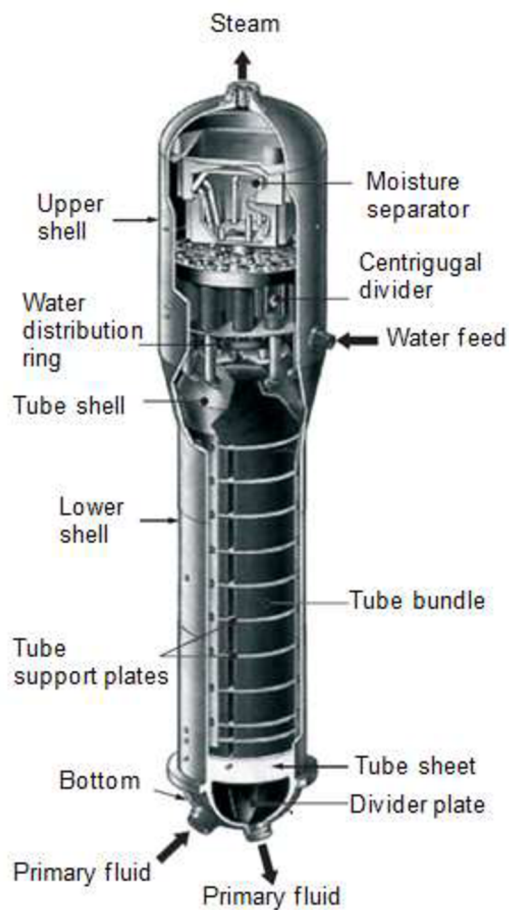


Fig. 5 Steam generator and reactor pressure vessel (central part) [32], [33].

2 INDUSTRIALIZATION AND DEVELOPMENT OF MACHINING IN NUCLEAR COMPONENTS MANUFACTURING

In this chapter, industrialization and development of machining are analysed. The most important machining operations of Framatome's production are described and their industrialization investigated.

2.1 Industrialization

Industrialization is a process that has for an objective to integrate into a production a product or a process on industrial scale. Industrialization is performed in a systematic manner, following an industrialization procedure especially in the most competitive companies, such as Framatome [4].

This procedure is applied in this project. Before its description, it is necessary to precise that industrialization and development of machining consist of two major parts:

- industrialization of machining operations;
- industrialization of CNC machine tools.

These two parts are strongly connected, since industrialization of machining operations and of CNC machine tools are conducted in the same time. That's why they are described in this and the following chapter.

General industrialization procedure is composed of six phases:

- 1) initiation
- 2) evaluation
- 3) pre-development
- 4) development
- 5) industrial validation
- 6) ensure industrial application [4].

Application of this procedure in the project on the face milling machining operation is demonstrated in Fig. 6. Other machining operations (deep hole drilling, boring, high feed machining, pocket machining) are industrialized in the same way.

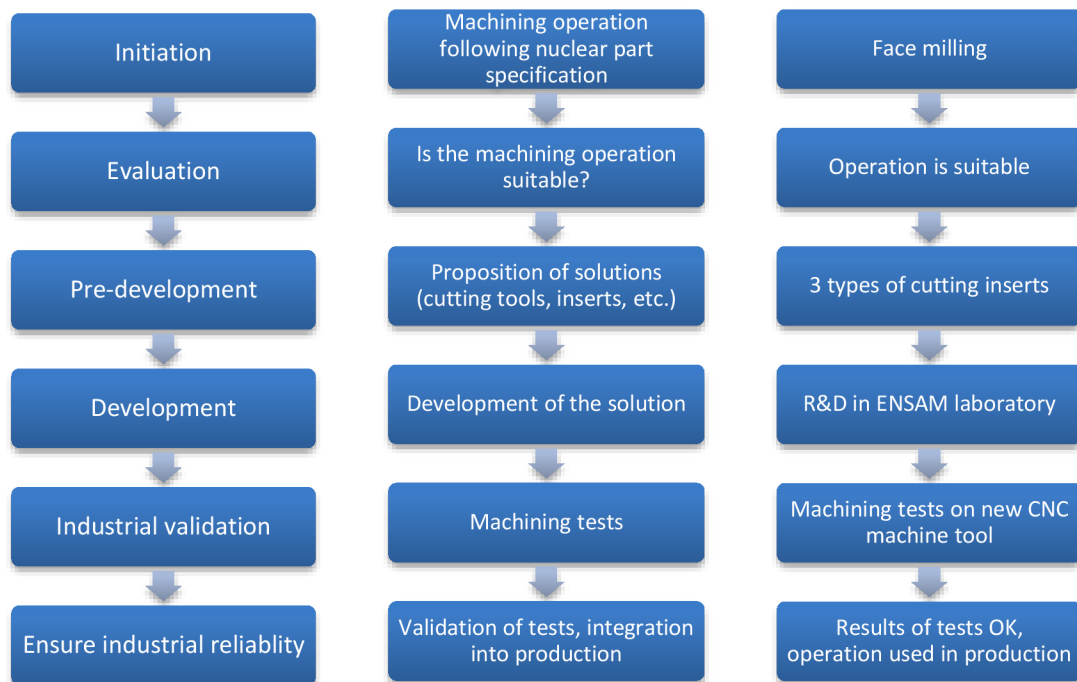


Fig. 6 Scheme of the machining industrialization process [4].

2.2 Large dimensions machining

Energy, mining, naval, aeronautics, and nuclear industries demand machining of very large and heavy workpieces. These heavy workpieces, often large forged parts, have to be machined with a high precision in challenging work conditions. To obtain acceptable results after several machining operations, following equipment have to be adapted:

- 1) machine tools
- 2) cutting tools
- 3) crane capacity for handling of large and heavy parts [5], [6].

2.2.1 Heavy machine tools

Heavy machine tools have to be able to perform machining operations with high cutting speed and feed, as well as to cut chips of high volume. It is necessary for the structure of the machine to be sufficiently rigid and resistant against static and dynamic effects of cutting forces induced during a machining operation. In plus, components such as motors, gearbox and bearings have to be adjusted to long machining times to withstand thermal stresses. In addition, machines have to be equipped with a thermal error compensation and monitoring systems to eliminate these errors [5], [7].

Heavy machine tools are adapted to the shape of machined parts. For rotational workpieces, heavy horizontal and vertical lathes are used. For non-rotational parts, mostly horizontal boring and milling machines are preferred. These two principal machine tool types are illustrated on figures below [5].



Fig. 7 Horizontal boring and milling machine [34].



Fig. 8 A double-column vertical lathe [35].

2.2.2 Crane for handling of heavy parts

Cranes are a necessary part of a production of large parts. They are one of the crucial equipment. Without them, mounting of parts would not be possible. Nevertheless, they require skilled and experienced workers to operate them. Heavy overhead cranes are not only used for manipulation with machined parts, but as well to assemble heavy machine tools [5], [8].

In Saint-Marcel plant are in disposition cranes with total lifting capacity of 1 000 000 kilograms, and individual lifting capacity of cranes reaches up to 600 000 kilograms [3].

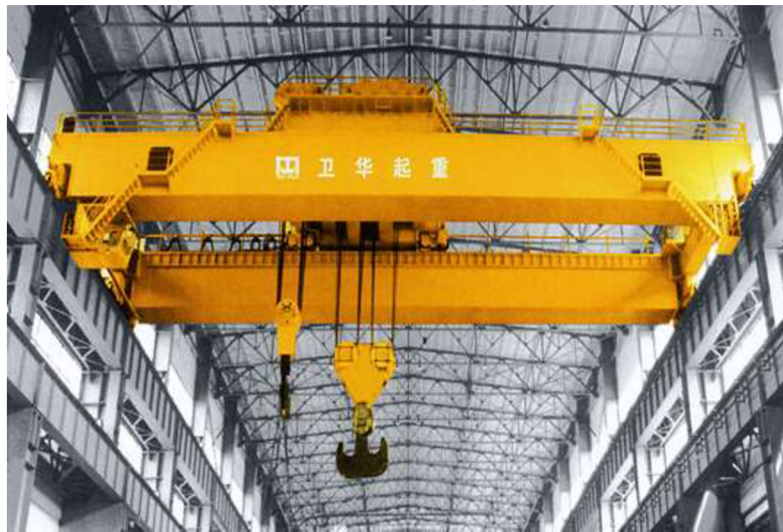


Fig. 9 Heavy overhead crane [36].

2.3 Machining operations

2.3.1 Deep hole drilling

Deep hole drilling is a drilling process for drilling of holes with a ratio length-to-diameter [9]:

$$\frac{L}{D} > 5 \quad (2.1)$$

Deep hole drilling has several fields of application such as nuclear, aeronautics or naval industry with origins starting in the gun making industry. In the gun making industry, straighter and more accurate gun barrels are demanded. After the application in gun barrels, deep hole drilling operation expanded to other industries as mentioned before [10].

Deep hole drilling technologies are divided generally by their cutting fluid supply and by their chip evacuation system. In heavy industry, three major technologies are applied:

- 1) deep hole drilling with a Gundrill tool
 - high-pressure cutting fluid supplied by the tool centre;
 - chips evacuated through a groove on the exterior of the tool;
 - less productive than BTA technology [9], [10];

- 2) deep hole drilling with BTA-DTS tool
 - chip evacuated by the tool centre;
 - cutting fluid is introduced to the cutting zone from the tool due to double-walled system [9];



Fig. 10 Example of BTA drilling tools [37], [38].

- 3) deep hole drilling with BTA-STS tool, demonstrated in Fig. 11
 - chip evacuation by the tool centre;
 - drill bushing – cutting fluid is introduced on the periphery of the tool and then is led to the cutting zone;
 - technology suitable for drilling of very deep holes [9].

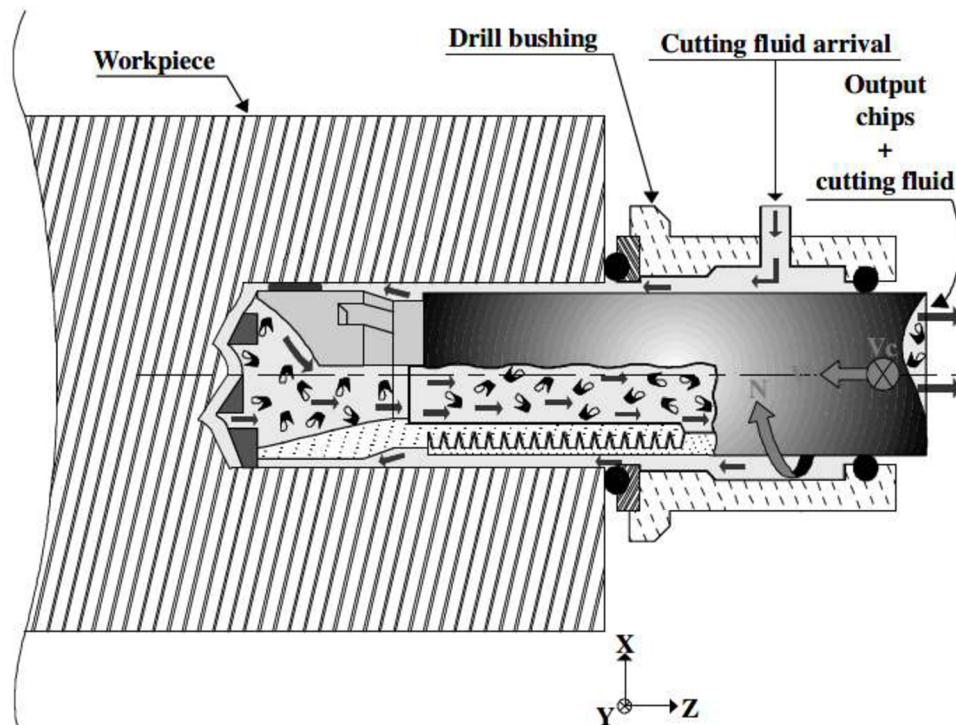


Fig. 11 BTA-STS drilling schematisation [39].

During industrialization of machining in nuclear industry, several parameters are important to evaluate deep drilling operation. In this project, observed parameters during machining tests are diameter and the geometrical tolerance of perpendicularity. These parameters are measured with a laser tracker in Framatome production conditions.

2.3.2 Boring

Boring is a machining operation, often applied in previously drilled holes [11].

Generally, boring helps to achieve multiple production criteria, such as:

- hole enlargement;
- hole abnormalities correction;
- improvement of surface texture [12].

Boring is performed in two steps, which are roughing and finishing operations. Roughing operation has for the objective to remove material and prepare a hole for finishing. Finishing operation focus on a surface quality and the hole tolerance. These operations are illustrated in Fig. 12. In majority of industrial cases, for roughing operation boring heads with two cutting inserts are used. On the other hand, for finishing operation are applied boring heads with only one cutting insert [13].

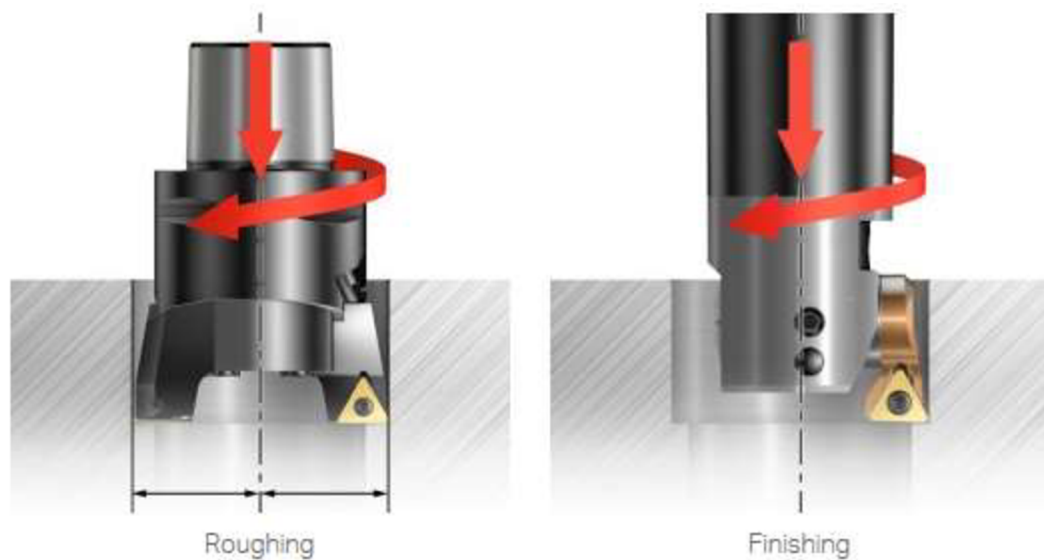


Fig. 12 Demonstration of roughing and finishing in boring machining operation [13].

Industrialization of this process into nuclear components requires practical tests, to verify the technology in the terms of cutting tools, cutting conditions and machine tool itself. Results of boring operation tests are presented below. Comparison of a deep hole before and after boring operations (roughing and finishing) is presented in Fig. 13. Bored hole is later measured with 3D dimensional scanner to obtain values of a desired diameter and geometrical tolerance of perpendicularity. This measurement is very quick and serves well in Framatome production conditions.



Fig. 13 Comparison of deep drilled hole and finished hole by boring operation.

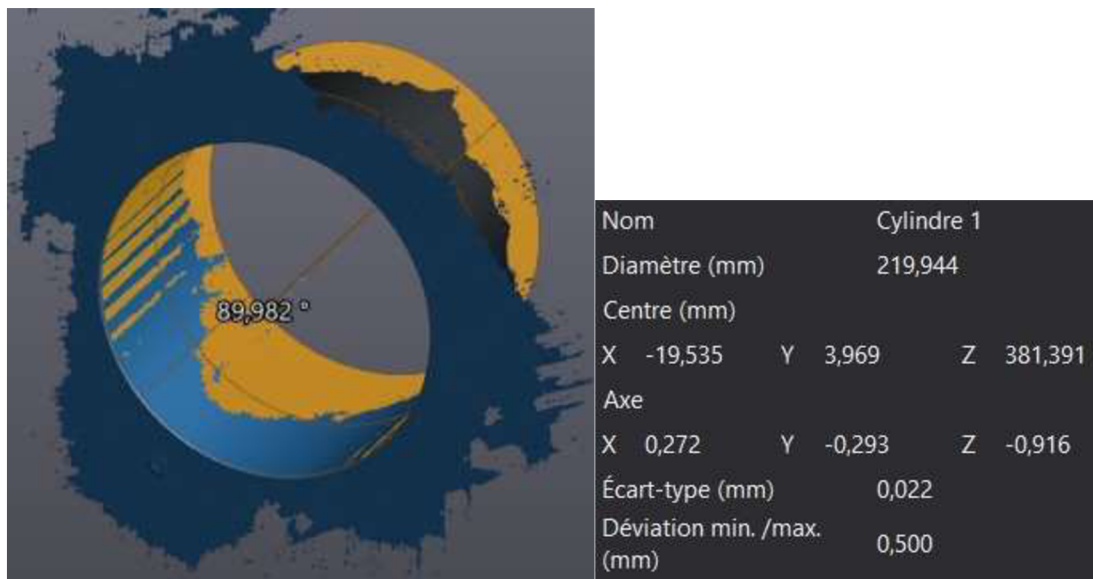


Fig. 14 Results of 3D dimensional scanning of a bored hole.

Boring is as well used as an internal turning for holes with a very large diameter, or for machining of tubes (Fig. 15). To apply this process, either special boring machine is necessary, or a boring / facing head has to be mounted on a horizontal boring-milling machine (Fig. 16). This head is a special machining accessory and in today's industry is quite wide-spread since it increases machines variability and helps to machine more complicated shapes and parts.



Fig. 15 Turning of an internal tube diameter.

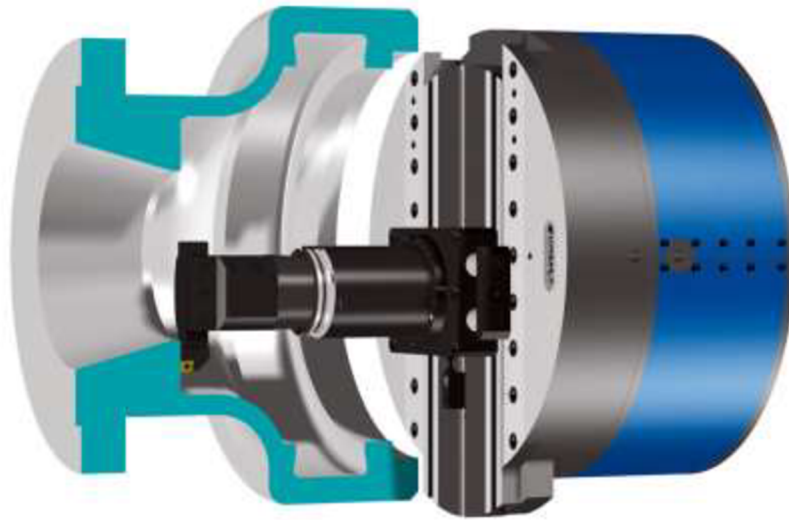


Fig. 16 Boring with a special boring / facing head [40].

2.3.3 Face milling – High Feed Machining

High feed milling is a very effective technique of roughing operation. Its objective is to remove as much material as possible in the shortest time possible. This process offers great productivity and increase of the material removal rate. However, the operation requires an adequate optimization to diminish negative effects and unfavourable results [14].

During this project, the optimization is performed to achieve desirable results in a long face milling roughing operation, visualized in Fig. 17. High feed machining helps to replace milling with tools having bigger diameter but slower feed.



Fig. 17 High feed milling and an illustration of typical high feed milling tools [14].

To properly optimize the process, Couple tool-material method is applied. This method is detailed in Chapter 4.3 and is standardized by the French standard NF E66 520. Nevertheless, basic phases of this method are reminded below:

- 1) determination of cutting speed v_c range;
- 2) determination of feed per tooth f_z or average chip thickness h_m range;
- 3) wear tests [15].

Material restrictions of couple tool-material are following:

- material 16MND5 (16MnNiMo5);
- dry machining;
- axial depth of cut $a_p = 1.5$ mm;
- radial depth of cut a_e is not constant all along the machining but the power is measured in the sequences with the same cutting parameters to ensure an acquisition of correct data;
- values of the power are obtained from CNC system screen.

A high feed milling cutter is chosen for this operation. Its geometrical characteristics are described in Fig. 18 and table 2.1. Cutting inserts with a low lead angle are necessary for this operation to direct cutting forces to the axial direction (into the spindle). This direction is preferable since it allows to achieve higher stability during cutting process and to limit the principal source of vibrations: the radial force [14].

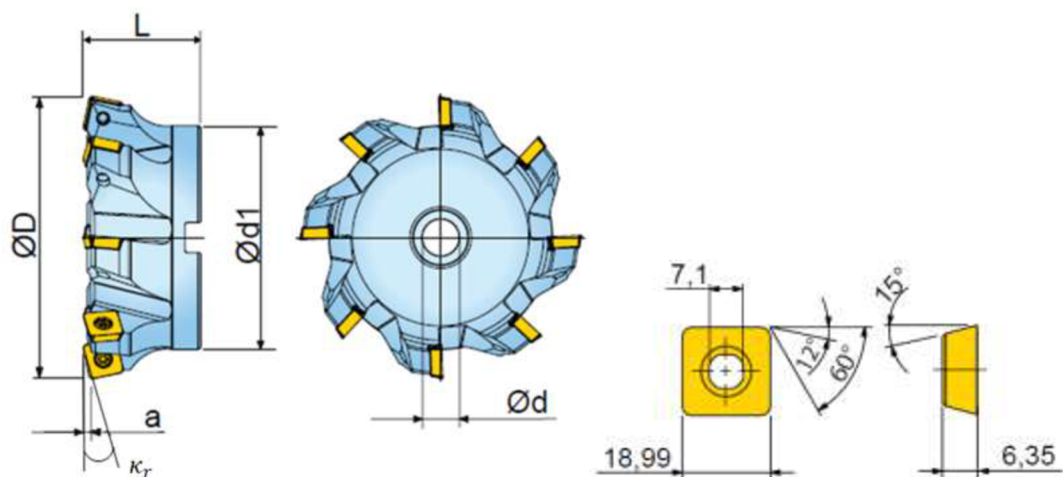


Fig. 18 Illustration of geometrical characteristics of the chosen high feed milling cutter [41].

Table 2.1 Geometrical characteristics of the chosen high feed milling cutter.

D [mm]	Z [-]	D_1 [mm]	d [mm]	d_1 [mm]	L [mm]	a [mm]	K_r [°]
160	8	160	40	130	63	3	12

Working zones for cutting inserts are determined in Fig. 19 and Fig. 20 from a power measurement.

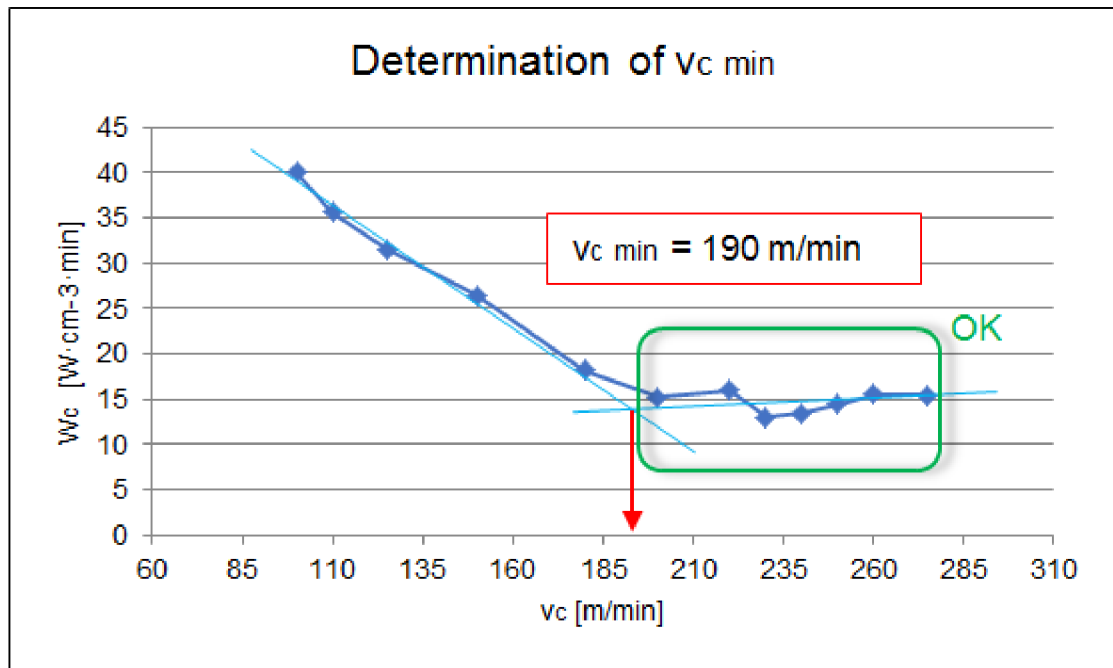


Fig. 19 Determination of v_c min.

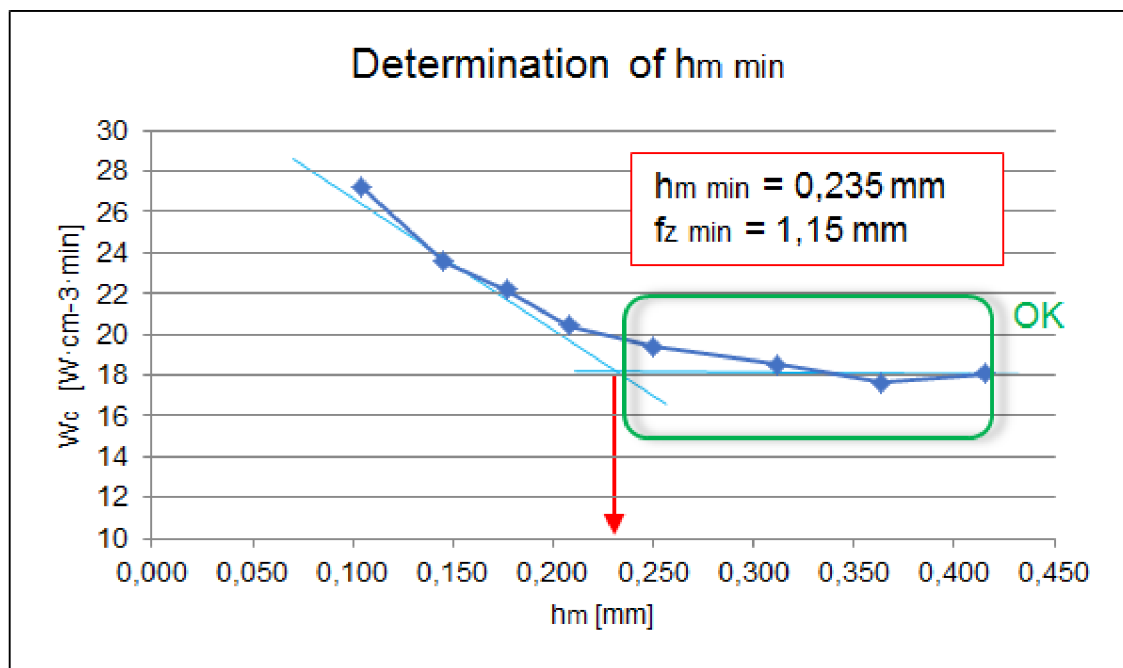


Fig. 20 Determination of h_m min.

When v_c min and h_m min are obtained and f_z min is calculated by Eq. 2.2 [42], working zones are established (table 2.2). Optimized cutting conditions are defined when specific cutting energy is stabilized.

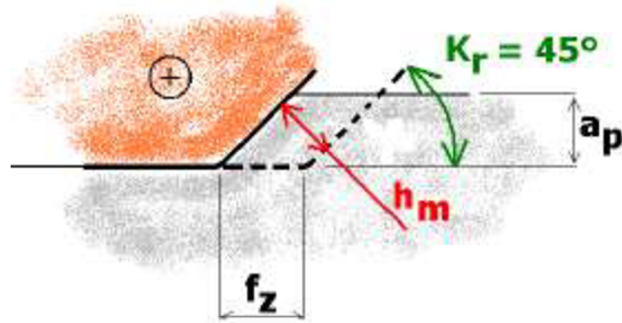


Fig. 21 Average chip thickness for the high feed milling cutter [42].

$$h_m = f_z \cdot \sin(\kappa_r) \quad (2.2)$$

Table 2.2 Working zones for the high feed milling cutter.

v_c [m/min]	h_m [mm]	f_z [mm]
190 - 275	0,235 - 0,416	1,15 - 2

Objective of wear tests is to find a balance between cutting parameters and tool life to achieve maximal productivity of this operation.

Wear test start with very high feed per tooth (1,9 mm). Six tests are repeated with eight new inserts mounted on the milling cutter during each test:

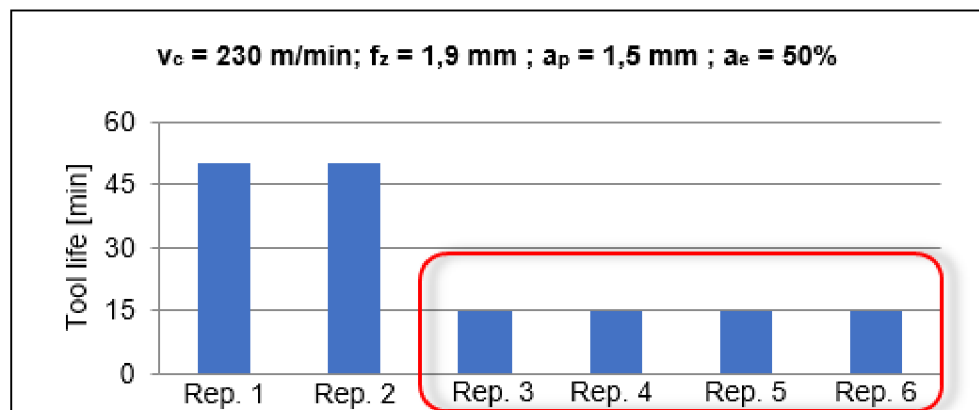


Fig. 22 Wear tests, $f_z = 1.9$ mm. Tool life is unsatisfactory.

Unfortunately, when such a high feed per tooth is applied, tool life of cutting inserts is very low (15 min). Time necessary to change cutting inserts is high and therefore these results are unsatisfactory and feed per tooth has to be decreased.

Thus, tests continue with $f_z = 1,6$ mm and three tests using milling cutter with eight new inserts mounted are carried out:

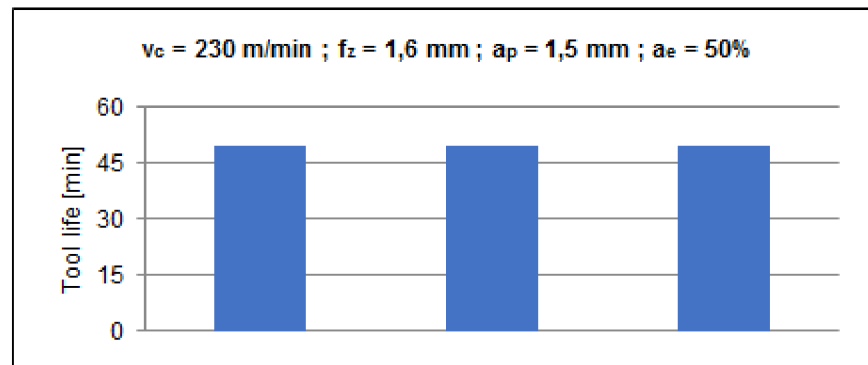


Fig. 23 Wear tests, $f_z = 1.6$ mm. Tool life 50 min is acceptable.

Tool life increased to 50 min. This time is acceptable for the production purposes. Optimized cutting parameters are listed in Table 2.3.

Table 2.3 Optimized cutting parameters for high feed milling cutter.

v_c [m/min]	D [mm]	N [tr/min]	f_z [mm]	Z [-]	a_p [mm]	a_e [mm]	v_f [mm/min]	Q [cm ³ /min]	h_m [mm]
230	160	458	1,6	8	1,5	80	5857	702,83	0,333

These tests demonstrate a real potential of the high feed milling strategy. Before applying this method, a milling cutter with diameter 315 mm was used for machining of an unmentioned part of a nuclear reactor. Cutting time with this cutter is 5h13 min. On the other hand, when the high feed milling cutter with optimized parameters is used, the cutting time is only 3h13 min.

Today, high feed milling strategy saves 38% of cutting time on one of the most strategic parts of Framatome production, and it is applied on several other important parts.

2.3.4 Pocket machining

In modern industry, pocket machining is applied to decrease weight of critical components [12]. In nuclear industry, the objective of pocket machining is different: it helps to obtain desired shapes of large guidance grooves to connect different parts of a nuclear reactor or a steam generator or special circular J-shaped grooves (Fig. 24).

J-groove is a very specific part for Framatome, therefore its industrialization is complicated concerning CNC programming, cutting tool choice and cutting conditions choice. J-groove's shape requires roughing operation creating multiple levels in the material and finishing operations sweeping these levels. Susceptible cutting tool is a ball milling cutter usually used for machining of molds and dies.



Fig. 24 J-groove machining is composed of roughing and finishing operations.

In Framatome production for other types of pockets, several methods for opening up of a pocket might be applied:

- drilling and circular milling;
- drilling and plunge milling;
- circular ramping [43].

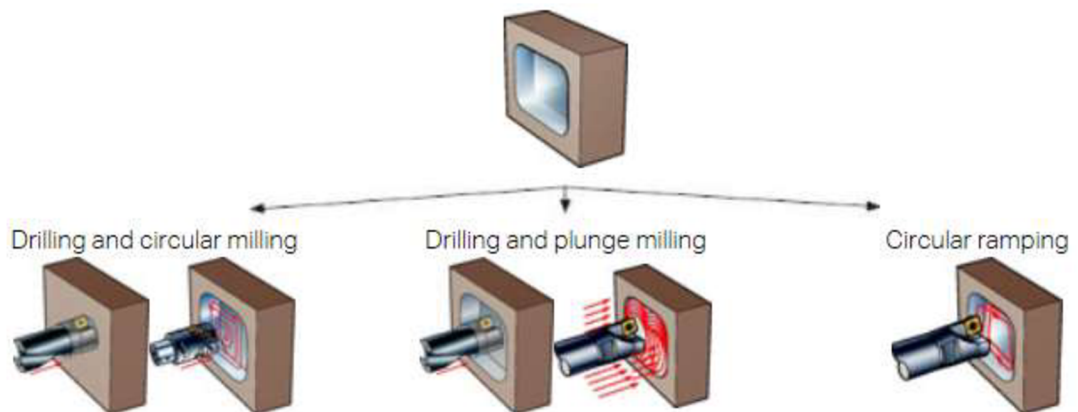


Fig. 25 Techniques for opening up of a pocket [43].

3 INDUSTRIALIZATION OF CNC MACHINE TOOLS FOR NUCLEAR COMPONENTS MANUFACTURING

This chapter describes major stages of the industrialization of CNC machine tools and it introduces the most important tests to be carried out during an acceptance of a CNC machine tool.

3.1 Testing of CNC machine tools – Acceptance tests

Testing of CNC machine tools forms individual branch of metrology. It is specific in terms of metrological procedures and management with measuring instruments. Testing of CNC machine tools can be divided into several parts [5]:

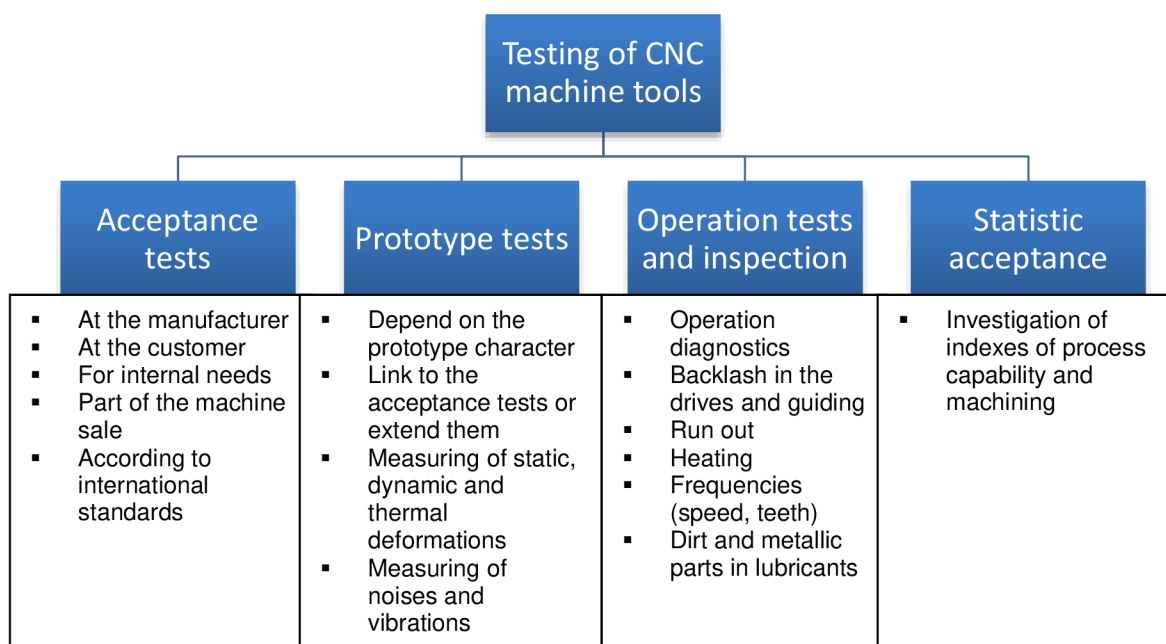


Fig. 26 Testing of CNC machine tools [5] .

The first group is called acceptance tests. These tests are contained in a contract between a buyer and a seller of the machine. Acceptance tests are made at manufacturer's site (seller) and then, after assembling the machine, at the customer' site (buyer). The objective of these tests is to verify properties of the machine, which are stated by the manufacturer [5], [16].

Prototype tests extend acceptance tests, especially to discover unexpected properties of the machine that cannot be foreseen during manufacturing. As well these tests help to examine limit states of the machine's behaviour in operation conditions [5].

Statistic acceptance tests are usually applied for highly demanding customers when there is a need to maintain workpiece quality for a long period of time [5].

This chapter is focused on acceptance tests. Their content is illustrated in the Fig. 27.

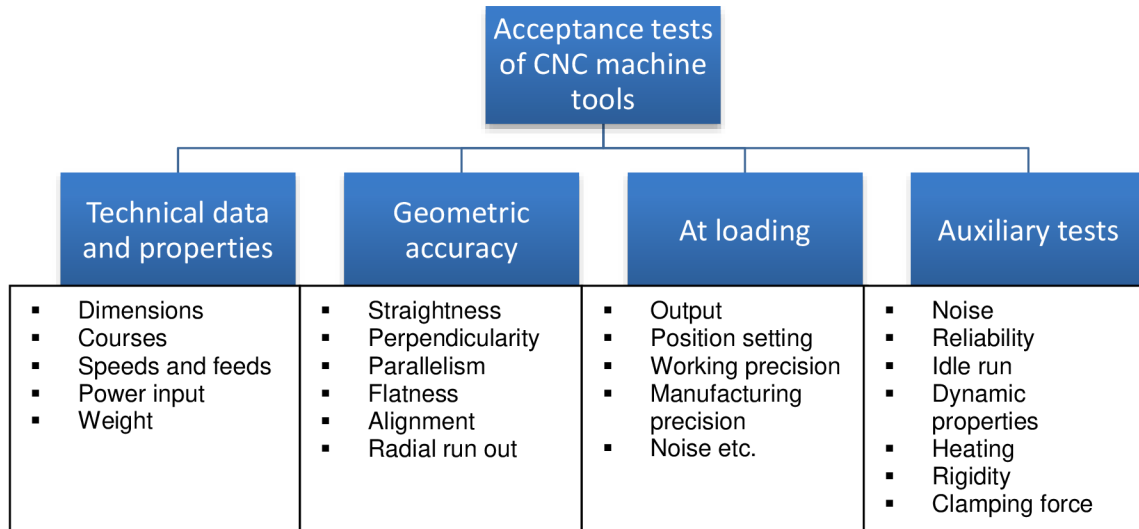









Fig. 27 Acceptance tests of CNC machine tools [5].

3.1.1 Geometric accuracy

Geometric accuracy tests have for a goal to describe geometric structure of a machine tool in the means of motions of functional parts and their accuracy that might influence the working precision [5], [16].

To achieve reliable description of a machine in terms of geometric accuracy, geometrical tolerances described in Table 3.1 are verified.

Table 3.1 Geometrical tolerances measured during acceptance tests [16].

Geometrical tolerance	Symbol
Straightness	
Angularity	
Perpendicularity	
Parallelism	
Coaxiality	
Flatness	
Run outs	

1) Straightness

Straightness is measured mainly at the guideways with the use of conventional methods (water level) or a laser interferometer (Fig. 28 and Fig. 29) [16].

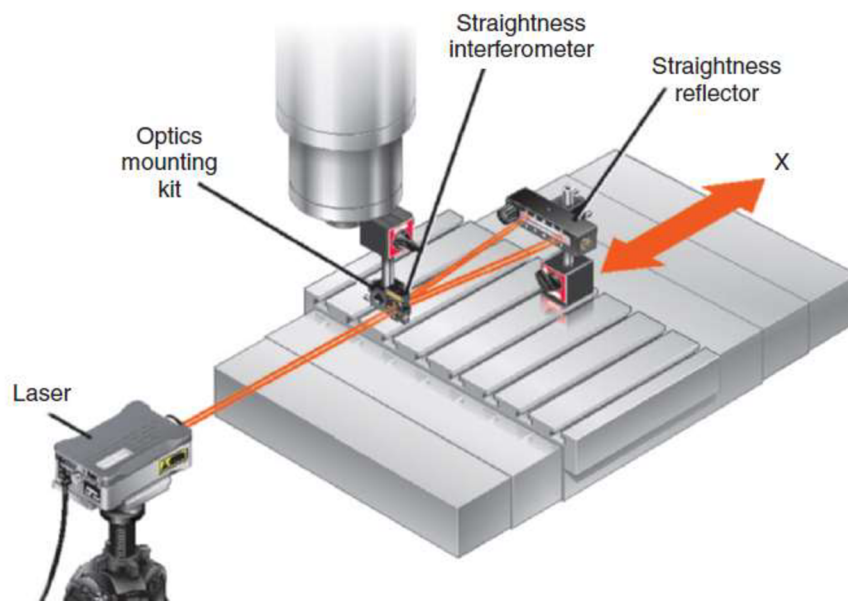


Fig. 28 Straightness measurement equipment and setup [44].

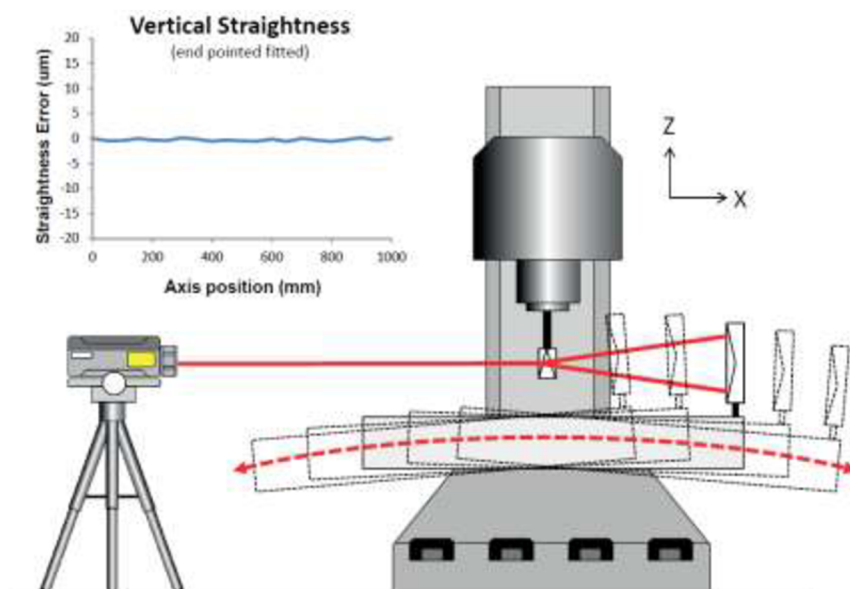


Fig. 29 Demonstration of straightness measurement on a machine tool [44].

2) Angularity

Angular errors are explained in Fig. 30. Errors correspond to yaw, roll and pitch movements. This terminology is the same as in aircraft mechanics.

Angularity is measured with water level or optical devices [17].

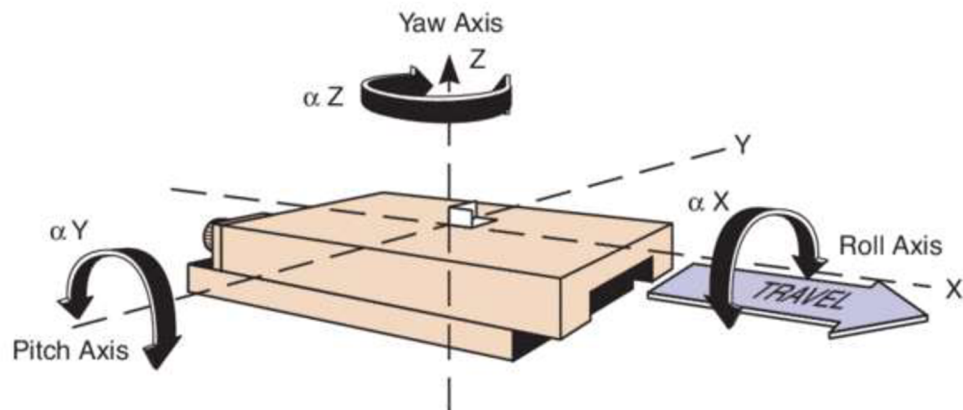


Fig. 30 Angular errors of a machine tool [45].

3) Perpendicularity

Perpendicularity is measured with measuring squares, indicators or laser interferometers [5], [16].

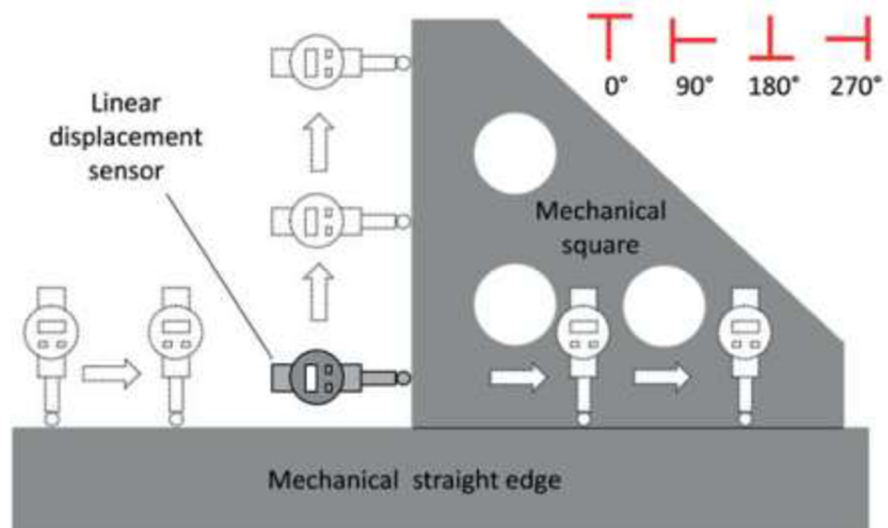


Fig. 31 Perpendicularity measurement with indicator [46].

4) Parallelism

Parallelism is measured with water levels or with internal micrometers [5], [16].

5) Coaxiality

Coaxiality is measured with control mandrels or with a laser interferometer [5], [16].

6) Flatness

Flatness is determined with rulers, water levels, surface plates or laser interferometer. This measurement is necessary especially on tables of machine tools [5], [16].

7) Run outs

Radial and axial runouts are measured with control mandrel and gauges [17].

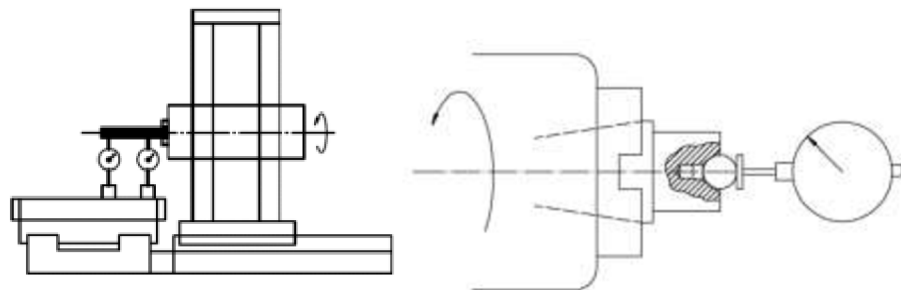


Fig. 32 Radial (on the left) and axial (on the right) runouts measurement [17].

3.1.2 Standards

Standards used very often for inspection of machine-tools are:

- ISO 230;
- ISO 10791;
- VDI/DGI 3441;
- ANSI B5:54;
- JIS B 6330-1980 [5].

3.1.3 Testing at machine loading

Testing at machine loading consist of two parts: power output test and operation accuracy tests. Power output test verify that a machine is capable to withstand short term heavy loading of electrical drives and if electrical outfit and the mechanical design are able to operate under high force loading during short transitory phases [5].

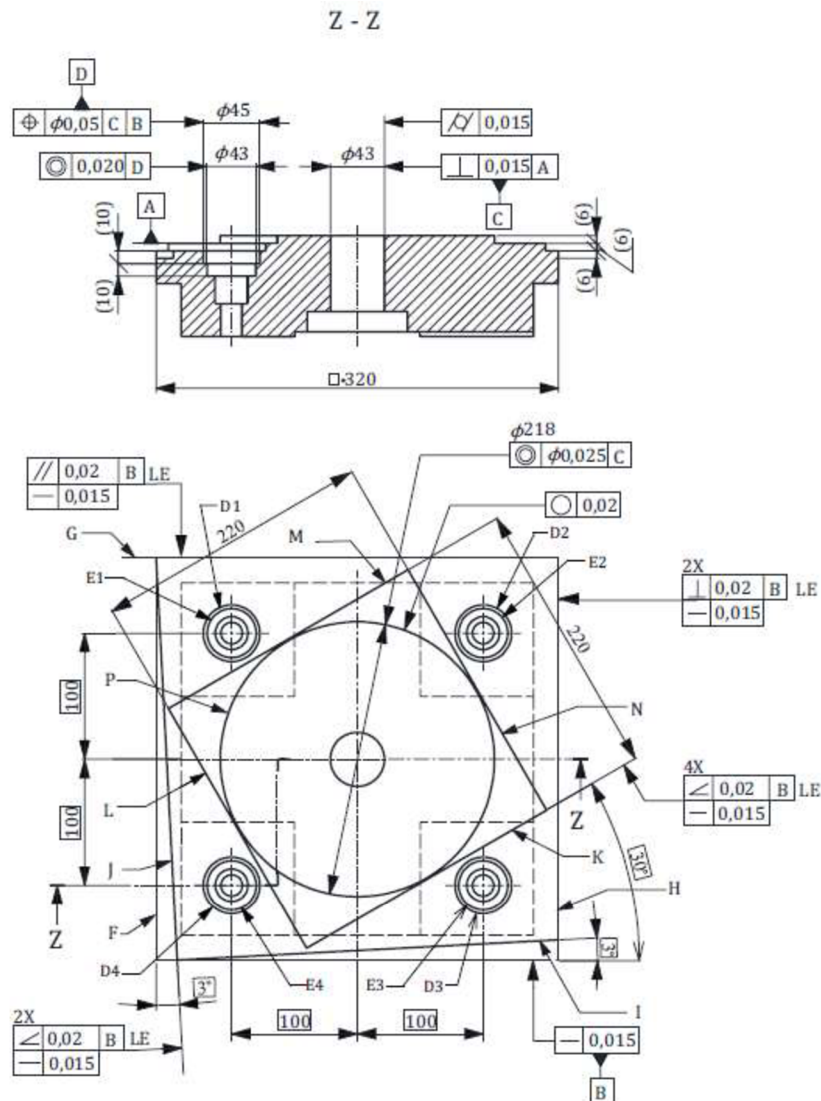


Fig. 34 Test part according to standard ISO 10791-7 [47].

3.1.4 Accuracy and repeatability at position setting

Accuracy and repeatability at position setting are important characteristics necessary to accept a machine tool. These characteristics verify if a machine tool is capable to position itself in a certain position in accurate and repeatable manner. Accuracy and repeatability are described with following parameters:

- position tolerance T_p
- positional uncertainty P
- positional deviation P_a
- reversal error U
- positional scatter P_s .

These parameters have to be determined for every machine's axis at the unloaded state, very often following the standard VDI/DGI 3441 [5], [18].

3.1.5 Auxiliary tests – Thermal distortions and vibrations

Vibrations analysis helps to define the quality of spindle and its components. This method is applied during acceptance of a new machine and regularly during a lifespan of the machine for the purpose of preventive maintenance [19], [20].

To diagnose the state of a CNC machine, vibrations spectres have to be obtained. With the use of these spectres and of the machine's cinematics, possible defects are detected [21], [30].

To get vibrations spectre, experimental setup is necessary (Fig. 35 and Fig. 36). Measurement equipment setup is composed of:

- accelerometers in several directions;
- acquisition cards;
- computer with adapted software.

Thermocouple sensors (Fig. 35 and Fig. 36) might be added to complete vibrations analysis by temperature measurements, especially in areas with heavily loaded components (bearings).

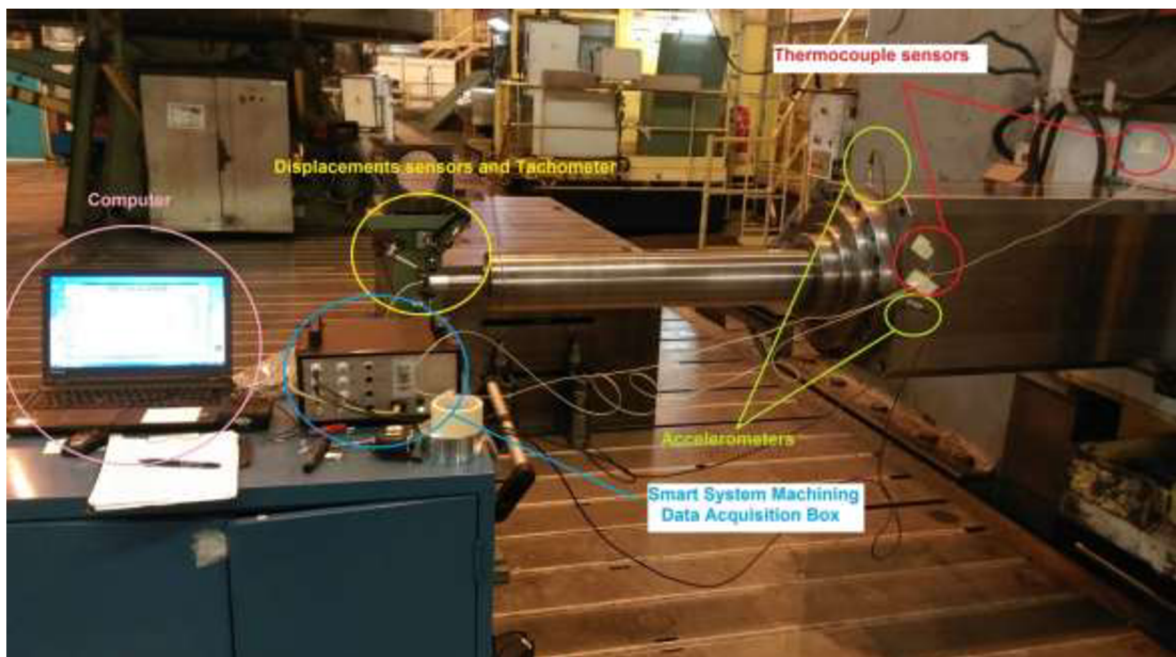


Fig. 35 Vibration analysis measurement setup.

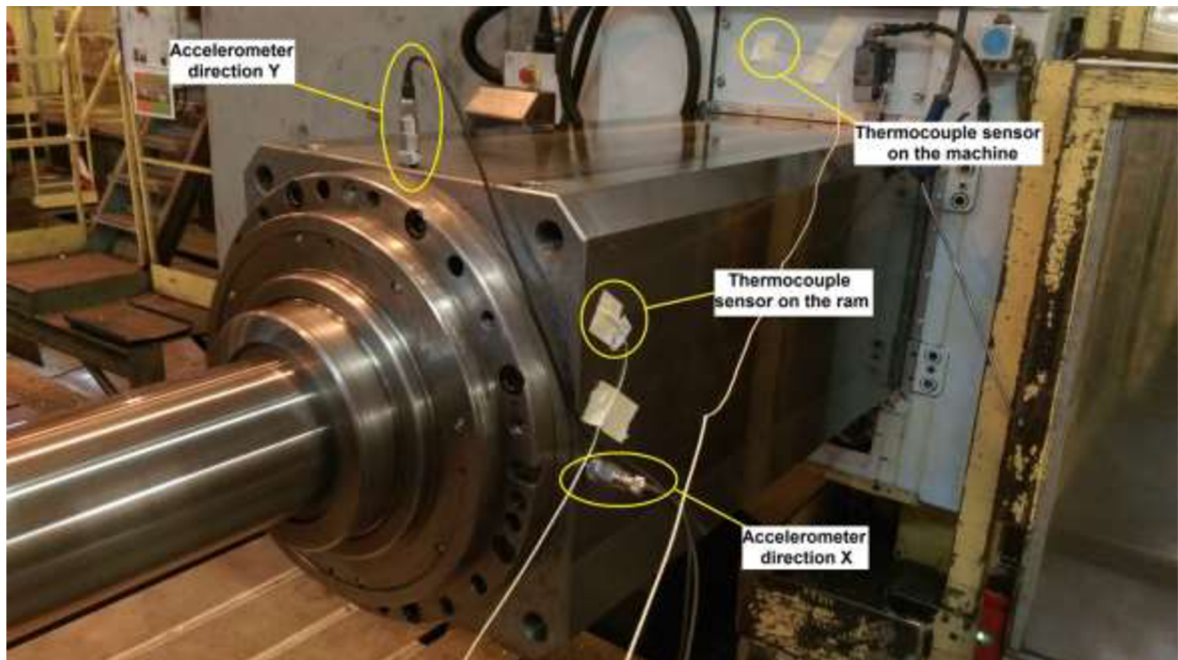


Fig. 36 Thermocouple sensors mounted on the spindle and the machine tool.

Vibrations of the machine are evaluated with the use of the standard ISO 10816-3:2009 (Fig. 37).

ISO 10816-3:2009 Vibration Standard Evaluation

Velocity severity (mm/s RMS)	Machinery Group2		Machinery Group1	
0.71	A	A	A	A
1.4	B	A	A	A
2.3	B	B	B	A
2.8	C	B	B	B
3.5	C	C	C	B
4.5	D	C	C	B
7.1	D	D	D	C
11.0	D	D	D	D
Foundation	Rigid	Flexible	Rigid	Flexible

A:Good B:Satisfactory C:Unsatisfactory(alert) D:Unacceptable(danger)

Fig. 37 Vibrations evaluation according to standard ISO 10816-3:2009 [48].

Detailed dynamic analysis of the machine is necessary as well for modelling and simulations of vibrations that occur during machining operations. This analysis is therefore very important for the later scientific research on a concerned machine [22].

Tests of thermal distortions are normalized in the standard ISO 10791-10 and are composed of three parts:

- 1) test of error of a variation of ambient temperature (ETVE)
- 2) test of thermal deformation caused by spindle rotation
- 3) test of thermal deformation caused by linear movements [23].

Generally, thermal distortions are measured with displacement sensors [23].

Illustration of measurement is in Fig. 38 and experimental setup adapted to the production conditions is demonstrated in Fig. 39.

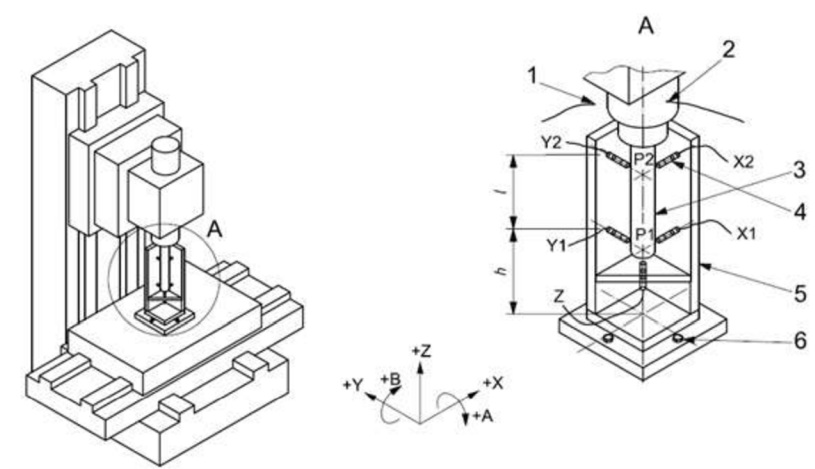


Fig. 38 Displacement sensors setup for measurement of thermal distortions [23].

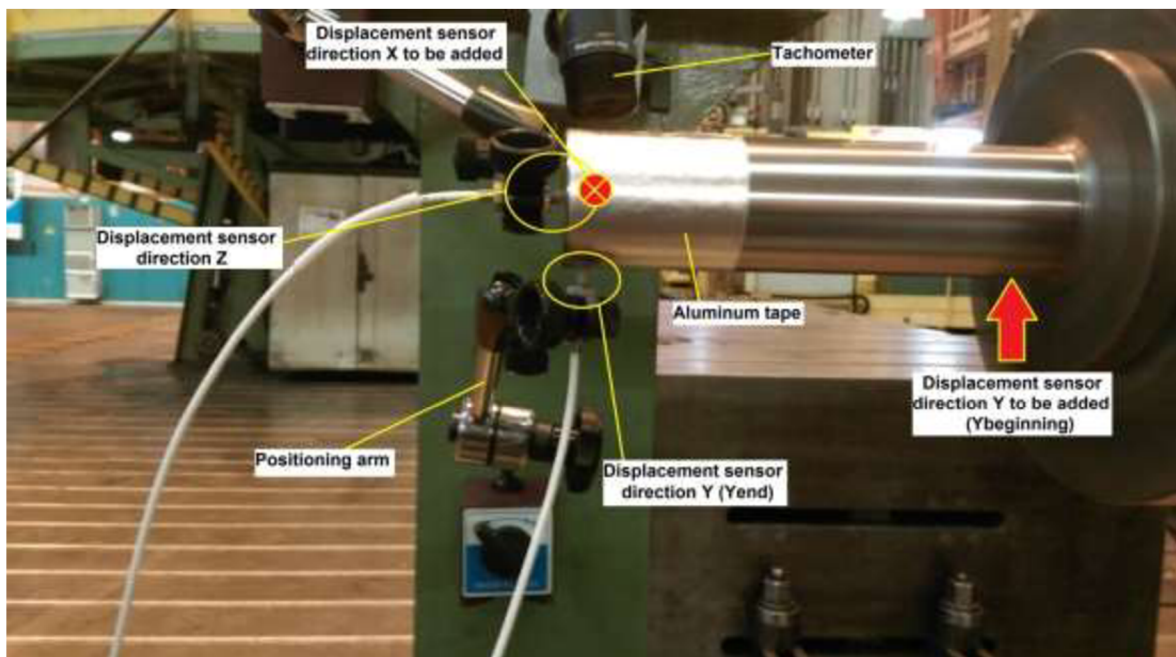


Fig. 39 Experimental setup of displacement sensors in production conditions.

3.1.6 Auxiliary tests – Circular interpolations

In today's industry, Ballbar test is one of the most commonly used control equipment for circular interpolations verification. It is very quick and simple way how to control the performance of positioning of and CNC machine axis, following international standards [24].

Ballbar is composed of the high-precision linear telescopic sensor with a ball on each of its end, and of two magnetic stands fixed to a CNC machine's table and to its spindle. This setup is illustrated in Fig. 40 [24].

If a CNC machine was without defects, when it is programmed, circular trajectories which machine performs should correspond to the trajectories programmed. In reality, several factors, such as machine's geometry and machine's wear, contribute to deviations between real circular interpolations and programmed ones [25].

Ballbar measures minor variations of the rayon which machine follows during programmed circular movement around the magnetic stand mounted to a machine's table [24]. This measurement allows engineers to evaluate machines precision [25].



Fig. 40 Ballbar test demonstration [24].

4 DEVELOPMENT OF MACHINING STRATEGY

4.1 Introduction

Industrialization of a new horizontal boring and milling machine opens new possibilities in machining, such as higher cutting speed, table feed and lubrication by the centre of the tool. These parameters allow the use of smaller tools, for example of a diameter 50 mm, for roughing face milling operations (and pocket milling in the case of triangular cutting insert). This new strategy needs to be developed to assure successful industrialization.

4.1.1 Material 16MND5

French nuclear reactor pressure vessels and steam reactors are made of low-alloyed steel 16MND5 (or 16MnNiMo5) [26]. It is as well most often used in manufacturing in Framatome workshop, therefore this steel is chosen as testing material.

Chemical composition is following:

Table 4.1 Chemical composition of 16MND5 steel (Weight Percent) [27].

Alloying Elements						Impurities	
C	Mn	Ni	Mo	Cr	Si	P	Cu
0,15	1,40	0,60	0,50	0,15	0,30	0,01	0,08

Major characteristics of this low-alloyed steel are [27].:

- good thermal conductivity;
- excellent weldability;
- good behaviour when irradiated;
- low cost;
- R_m around 800 MPa;
- hardness 20 HRC.



Fig. 41 Reactor pressure vessel being forged in Framatome Le Creusot [49].

4.2 Geometrical analysis of cutting tools

In this project, three types of cutting inserts (Fig. 42) are investigated:

- round;
- triangular;
- tangential.

Cutting inserts are designated for roughing and semi-finishing operations. They are provided by a supplier with a TiAlN / TiN coating.

Milling cutters used for tests have diameter 50 mm with clamping technology HSK A63 and with lubrication by the centre of the tool.

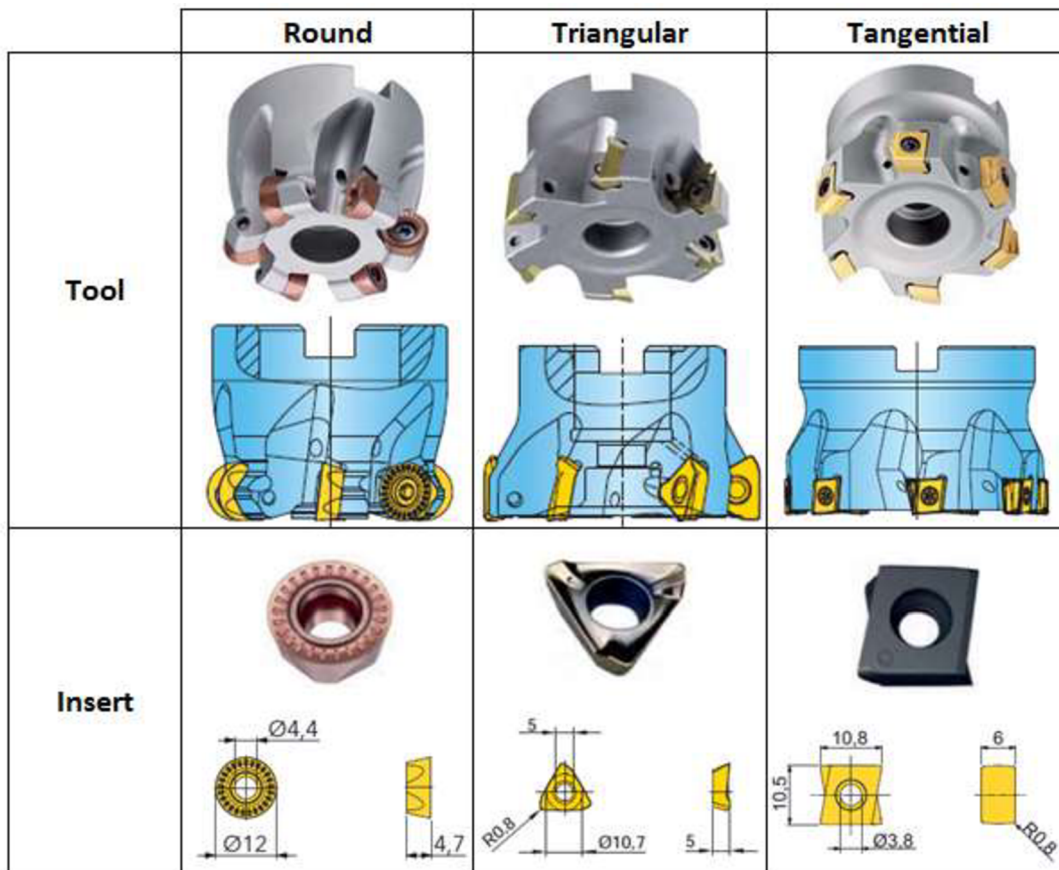


Fig. 42 Overview of cutting tools and inserts [41].

4.2.1 Measurement methodology

Measuring equipment chosen for this study is Alicona (Fig. 43) and microscope Keyence. Observation method and the measurement are performed according to standard ISO 3002.

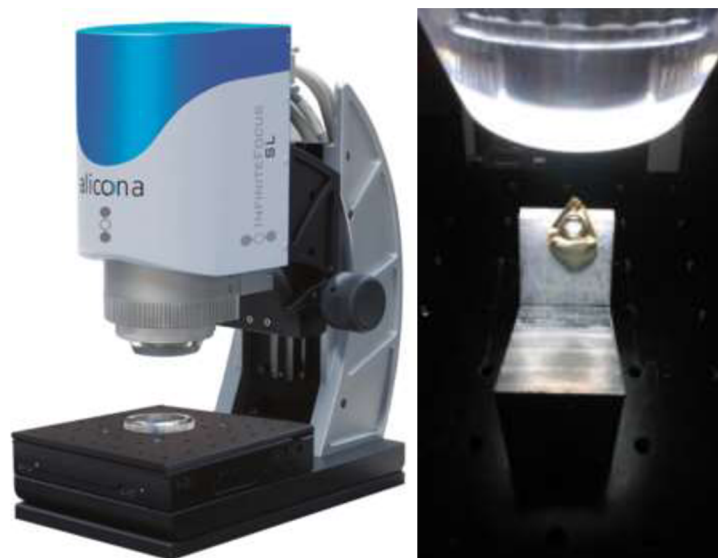


Fig. 43 Alicona measuring device and triangular cutting insert being measured [50].

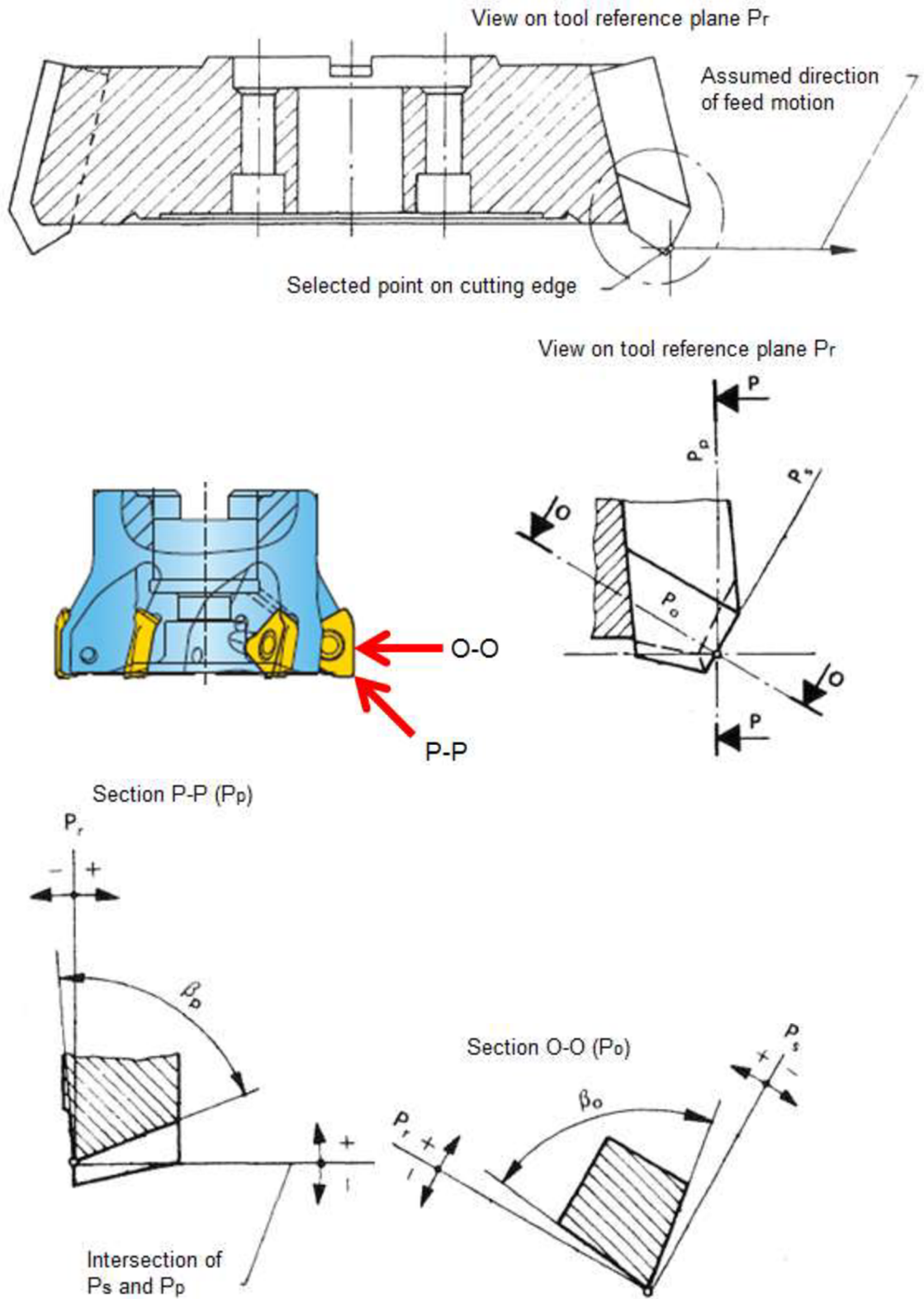


Fig. 44 Cutting inserts geometry illustration [41], [51].

Due to limited possibilities of mounting on measuring equipment it is not possible to measure working angles of a tool and only several tool dimensions are measured.

These dimensions are:


- average cutting edge radius;
- wedge angle;
- length of land;

Mentioned cutting tool dimensions are measured in two cutting tool areas, in corner radius (Section P-P) and in side cutting edge (Section O-O). Both areas are illustrated in Fig. 44.

4.2.2 Results of geometrical analysis

Corner radius

Table 4.2 Results of cutting tool geometry analysis – corner radius.

	Round	Triangular	Tangential
			
Average cutting edge radius r [μm]	53	38	80
Wedge angle β [$^\circ$]	69	60	62
Length of land by [μm]	/	265	/

Cutting edge of round and tangential cutting inserts are simple, without a land. On the other hand, the cutting edge on triangular cutting inserts is reinforced with a land.

- Round insert

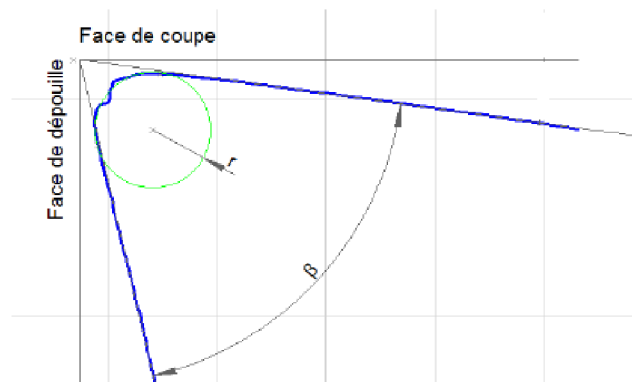


Fig. 45 Corner radius geometry of round insert.

▪ Triangular insert

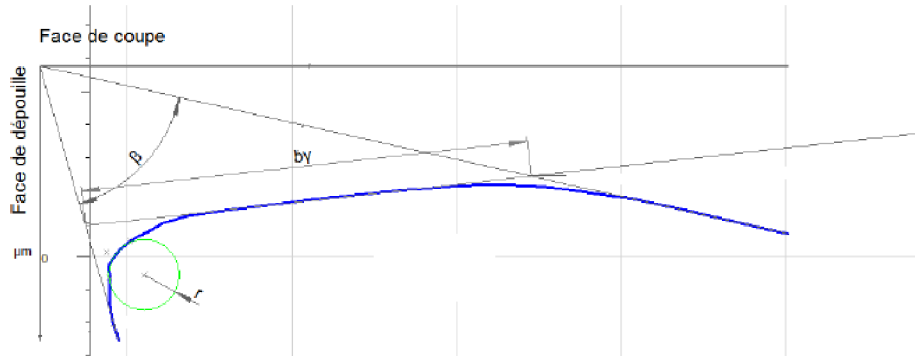


Fig. 46 Corner radius geometry of triangular insert.

▪ Tangential insert

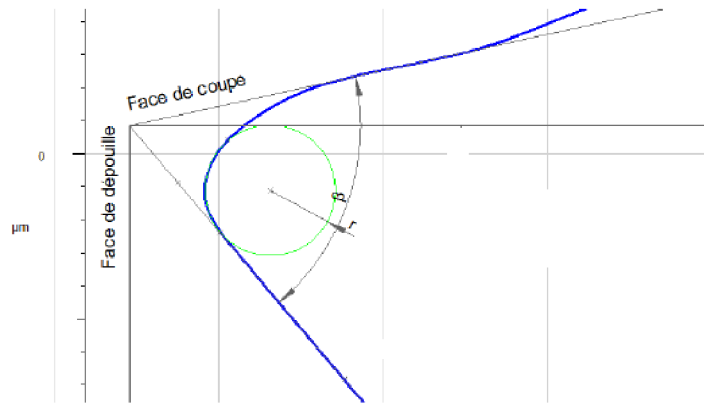


Fig. 47 Corner radius geometry of tangential insert.

Generally, cutting inserts without land have better cutting properties (cutting easily the machined material) and are more wear resistant than cutting inserts with a land.

Side cutting edge

Table 4.3 Results of cutting tool geometry analysis – side cutting edge.

	Round	Triangular	Tangential
			
Average cutting edge radius r [μm]	53	48	42
Wedge angle β [$^\circ$]	69	64	58
Length of land b_y [μm]	/	168	195

Side cutting edge of round cutting insert is simple, without a land. Side cutting edges of triangular and tangential cutting inserts are reinforced with a land.

- Round insert

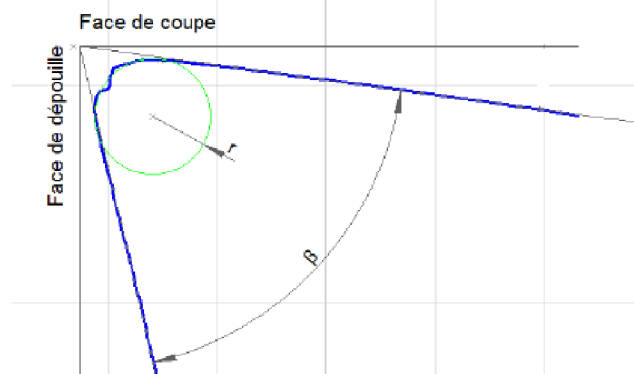


Fig. 48 Side cutting edge geometry of round insert.

- Triangular insert

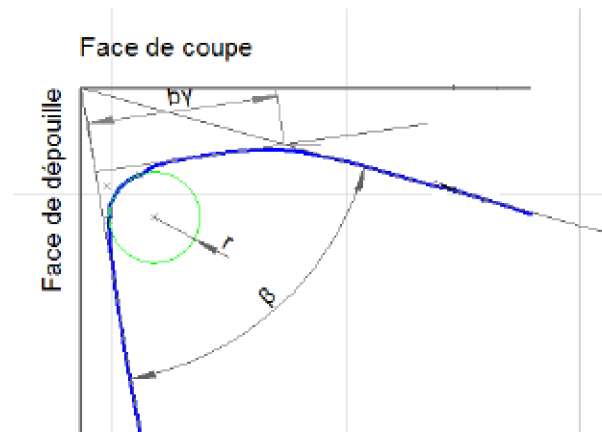


Fig. 49 Side cutting edge geometry of triangular insert.

- Tangential insert

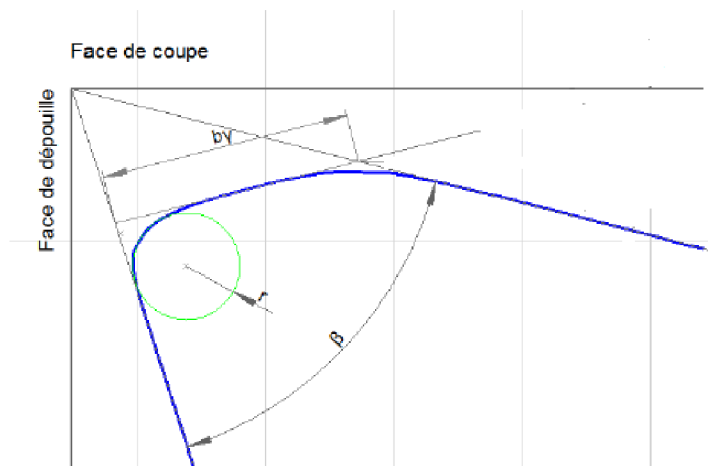


Fig. 50 Side cutting edge geometry of tangential insert.

Cutting edge reinforced with a land is assumed to be more resistant against cutting forces than edges without a land. During wear tests, this hypothesis is disproved.

4.3 Working zones of cutting tools: Couple tool-material

4.3.1 Definition of Couple tool-material

Couple tool-material is a methodology following standard NF E66 520 to choose the best cutting conditions for a given cutting tool and a given material.

This method is composed of several machining tests:

- determination of v_c range;
- determination of f_z or h_m range;
- wear tests [15].

Machining tests are comprised of following stages:

1) qualification test

The objective of this stage is to ensure compatibility of a tool and a material and to find acceptable and stable cutting conditions for a starting point for following tests (very often given by a tool supplier) [15].

2) working zones

After different machining tests, working zone is defined for reliable use of a tool, for a given material and in given conditions [15].

3) particular restrictions

This last stage specifies supplementary restrictions for an environment during machining tests, such as functional characteristics of a machine (power, torque, forces, vibrations, and rigidity), interface machine-tool, tested part rigidity, tested part clamping, length of a cutting tool etc.

- These limitations reduce working zones (suppression of machining conditions to avoid).

4.3.2 Material restrictions of Couple tool-material

- radial engagement a_e is equal to 1/3 of a tool diameter ($a_e = 17\text{mm}$);
- down milling;
- lubrication by the centre of a tool;
- only one cutting insert on a tool during tests to obtain clear force signal;
- machine DMG DMC 65V, machine allows to clamp and to use chosen tools.

4.3.3 Acquisition chain

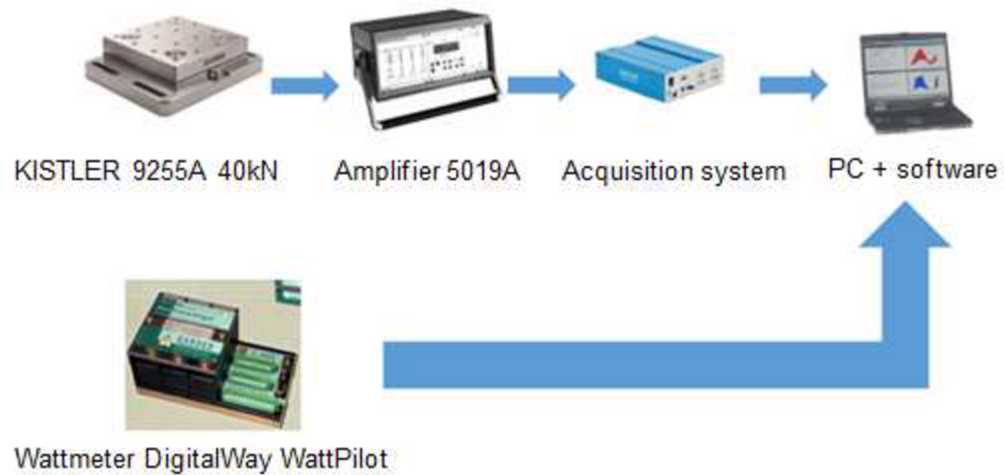


Fig. 51 Acquisition chain for cutting forces and power measurements [52].

▪ Measurement of cutting forces

Piezoelectric dynamometer KISTLER 9255A is used to measure forces during machining tests. It is characterized by:

- cutting measurement range of 40 kN in Z direction;
- sensitivity of -8 pC/N in directions X and Y and -3,7 pC/N in Z direction;
- natural frequency (dynamometer clamped on the machine table without a testing part) of 1,7 kHz (given by a supplier) and measured of 1,1 kHz [53].

These characteristics are compatible with a measurement of forces induced by a cutting tool with cutting inserts. Frequencies of pass of a tooth in the material during machining are inferior to 40 Hz. Measurements are in a frequency range compatible with the natural frequency of the dynamometer.

▪ Measurement of power

Power measurement is realized by a wattmeter positioned between the spindle variator of the milling machine and the spindle motor. This wattmeter measures three-phase currents with variable frequencies.

4.3.4 Average chip thickness h_m

Machining tests (face milling) are performed with different types of geometry of cutting inserts (round, triangular, tangential). It is convenient to take preventive measures before the start of tests, especially concerning conditions set on the machine.

For these complex cutting tool geometries, and conditions of radial engagement, Fig. 52 and Fig. 53 demonstrate evolutions of average chip thickness.

Two types of relations between radial engagement and cutter diameter are presented:

$$a_e < D_f/2 \quad (4.1)$$

$$a_e > D_f/2 \quad (4.2)$$

In this study, $a_e = 1/3$ of D_f . Therefore, only the configuration $a_e < D_f/2$ is tested.

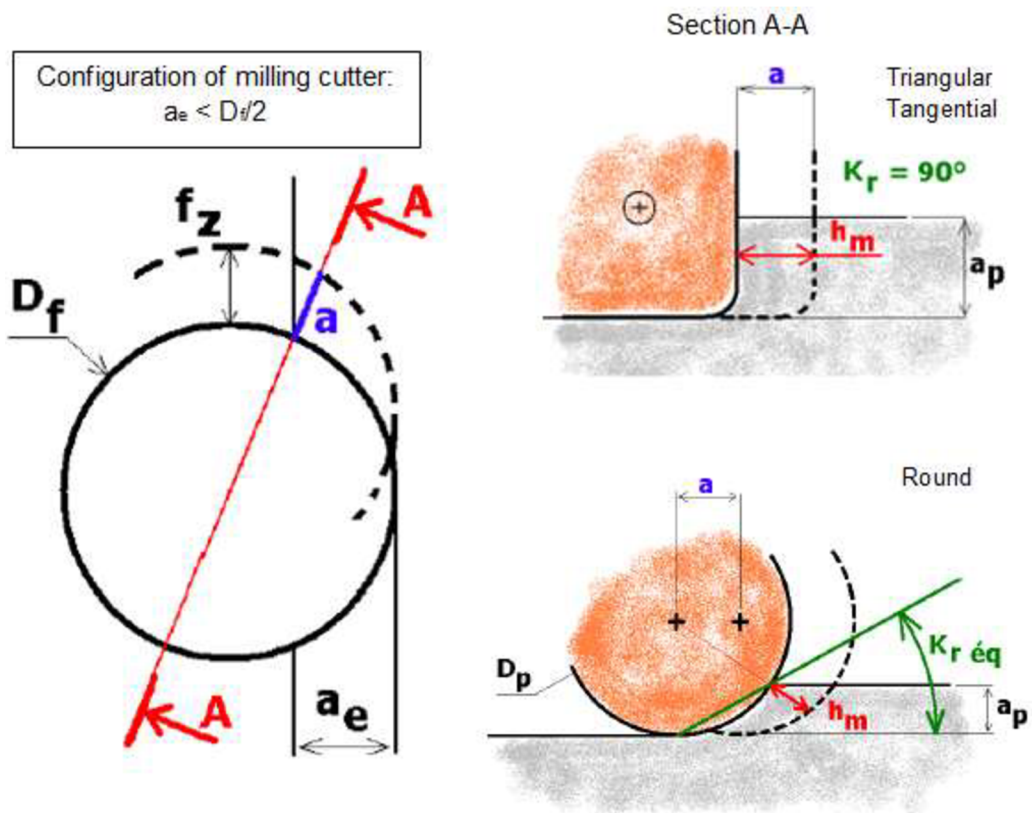


Fig. 52 Schemes of average chip thicknesses for different cutting insert types ($a_e < D_f/2$) [42].

Average chip thickness is calculated by following formulas [42]:

Triangular, Tangential

$$h_m = 2 \cdot f_z \cdot \sqrt{\frac{a_e}{D_f} \cdot \left(1 - \frac{a_e}{D_f}\right)} \quad (4.3)$$

Round

$$h_m = 4 \cdot f_z \cdot \sqrt{\frac{a_p}{D_p} \cdot \left(1 - \frac{a_p}{D_p}\right)} \cdot \sqrt{\frac{a_e}{D_f} \cdot \left(1 - \frac{a_e}{D_f}\right)} \quad (4.4)$$

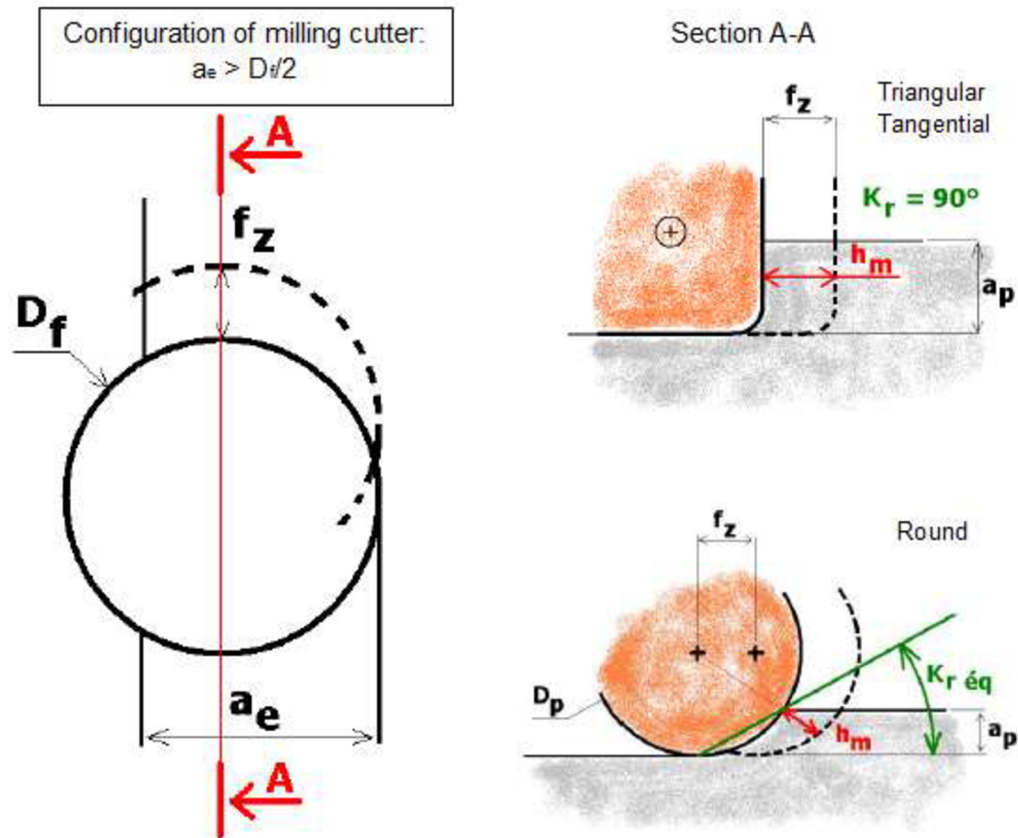


Fig. 53 Schemes of average chip thicknesses for different cutting insert types ($a_e > D_f/2$) [42].

Average chip thickness is calculated by following formulas [42]:

Triangular, Tangential
$$h_m = f_z \quad (4.5)$$

Round
$$h_m = 2 \cdot f_z \cdot \sqrt{\frac{a_e}{D_f} \cdot \left(1 - \frac{a_e}{D_f}\right)} \quad (4.6)$$

These theoretical results (for configuration $a_e < D_f/2$) allow to configure a folder Excel with calculations, with a goal to convert values of average chip thickness h_m (variable parameter in the case of Couple tool-material tests) into feed per tooth f_z (and inversely), so the machine is always set in f_z in relation to milling cutter axis.

4.3.5 Results Couple tool-material

For every cutting insert, $v_{c \min}$ and $h_{m \min}$ are determined. Necessary parameter to determine those characteristics is a specific cutting energy W_c , which calculated from measured power [15]:

$$W_c = \frac{P}{Q} \quad (4.7)$$

On Fig. 54 and Fig. 55 is demonstrated case of round cutting insert.

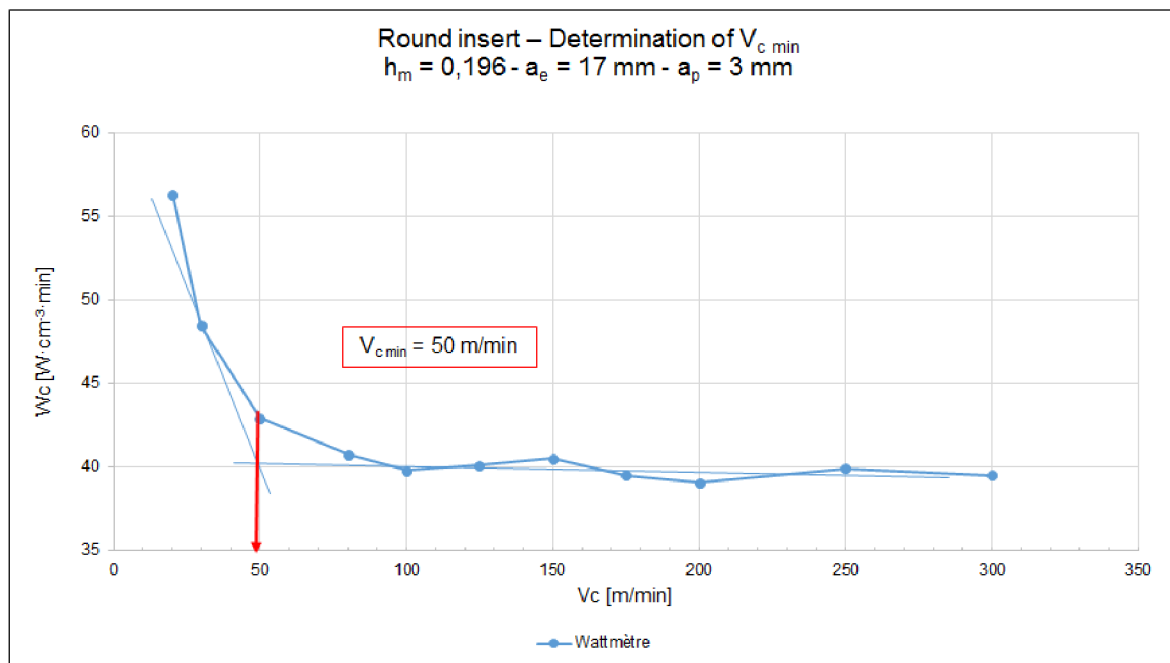


Fig. 54 Determination of $v_{c \min}$, round cutting insert.

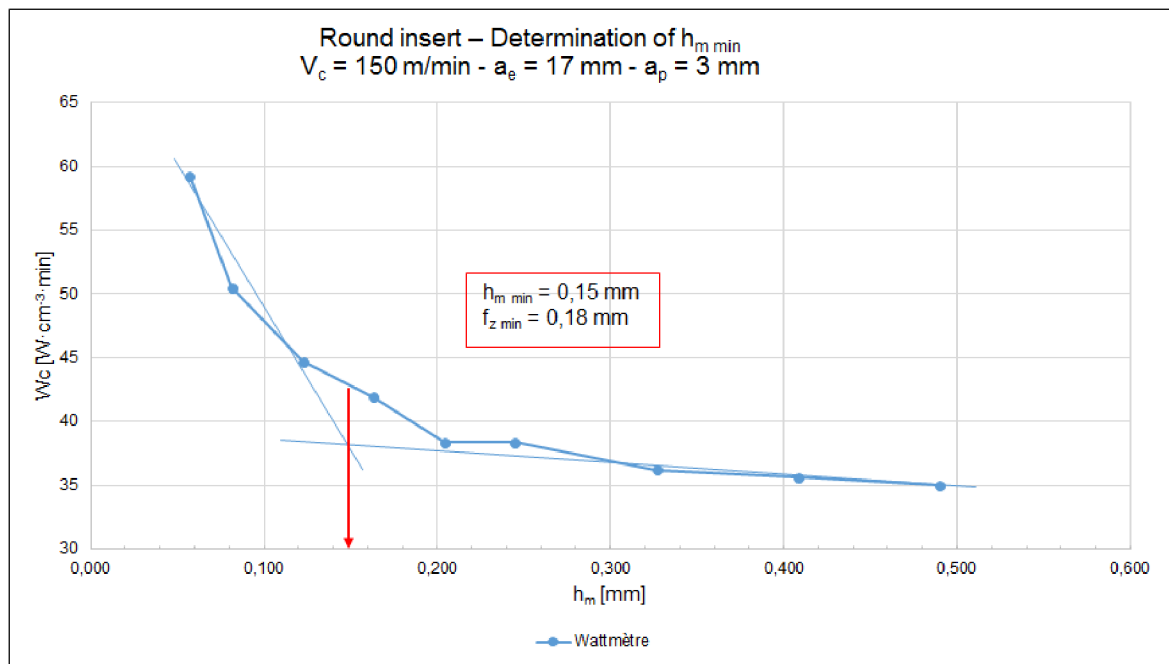


Fig. 55 Determination of $h_{m \min}$, round cutting insert.

On following figures (Fig. 56 and Fig. 57) are demonstrated results of Couple tool-material. For every investigated cutting insert type, $v_{c \min}$ and $h_{m \min}$ are obtained and $f_{z \min}$ is calculated. These minimal values of cutting condition allow establishing working zones for cutting inserts.

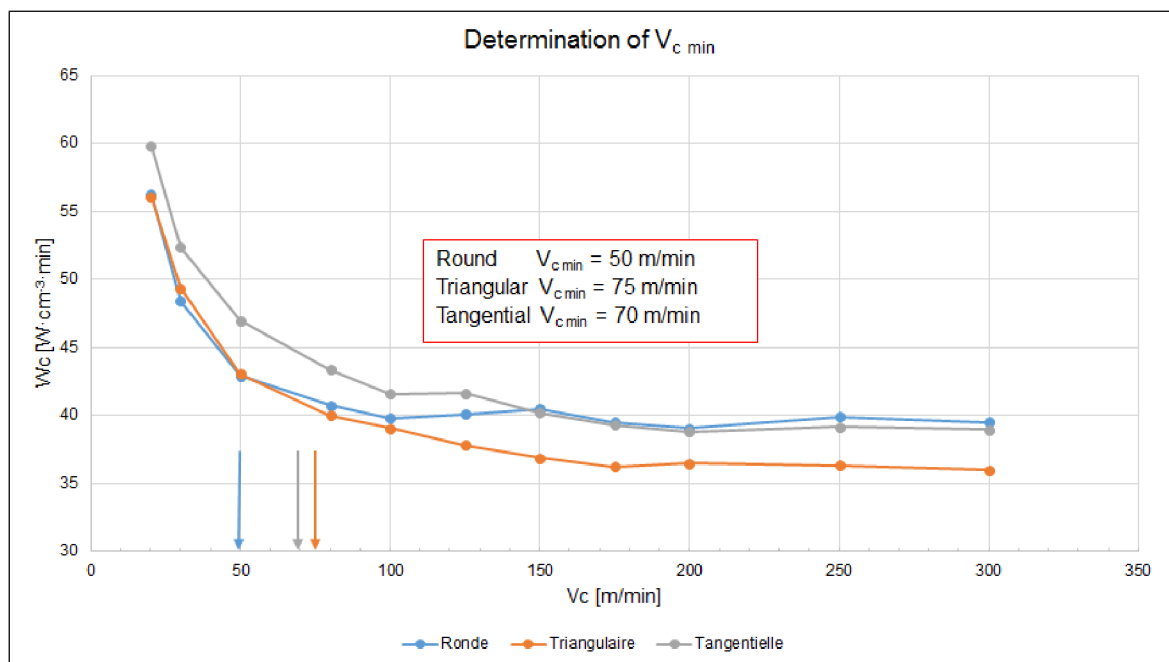


Fig. 56 Influence of cutting speed on specific cutting energy.

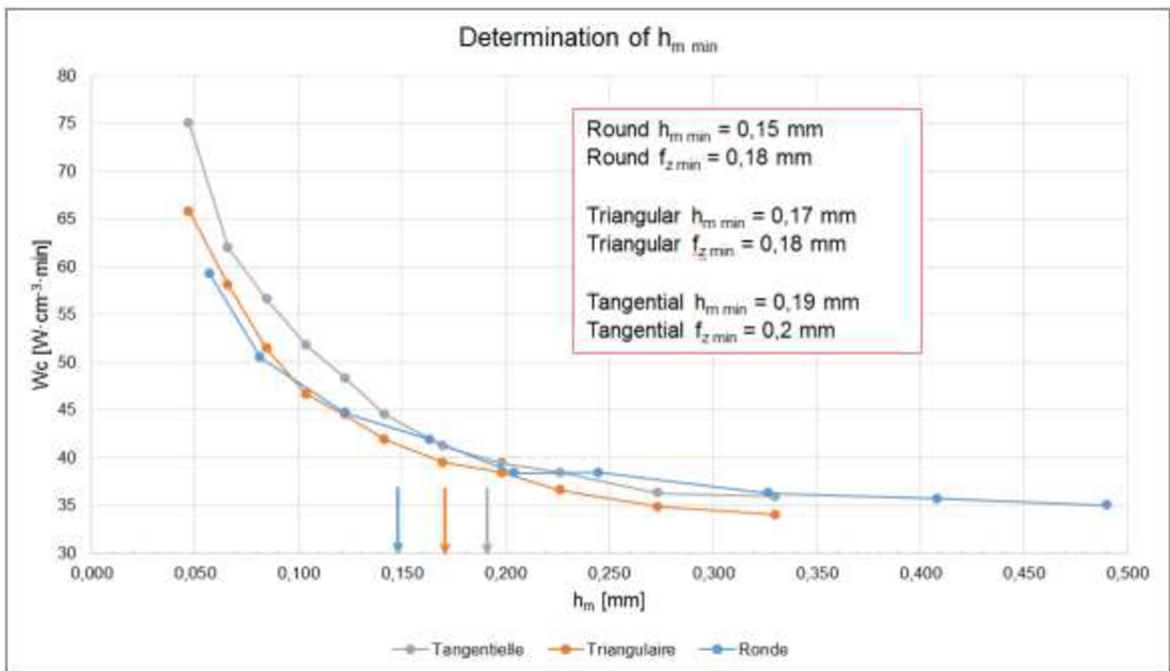


Fig. 57 Influence of average chip thickness on specific cutting energy.

4.3.6 Working zones of cutting inserts

Working zones are established from machining tests and from cutting data given by the supplier. Lower limit of a zone is represented by minimal value of cutting condition obtained during Couple tool-material tests. Upper limit correspond to the highest tested value with acceptable behaviour during machining tests. During establishment of these limits, supplier cutting data are considered.

Table 4.4 Summary of working zones of cutting inserts following Couple tool-material tests.

	Round	Triangular	Tangential
			
V_c [m/min]	50 - 300	75 - 300	70 - 300
h_m [mm]	0,14 - 0,49	0,12 - 0,33	0,1 - 0,33
f_z [mm]	0,17 - 0,6	0,13 - 0,35	0,11 - 0,35

Round insert has the largest working zone, in the terms of cutting speed and feed per tooth. Therefore, this type of cutting insert is the most variable and potentially the most economical type of cutting insert, since it allows a use of highest feed per tooth.

4.4 Wear tests

4.4.1 Wear tests context

- cutting conditions;

Table 4.5 Cutting conditions for wear tests.

$V_{c \text{ min}}$ [m/min]	$h_{m \text{ min}}$ [mm]	a_e [mm]	a_p [mm]
250	0,2	17	3

- down milling;
- lubrication by the centre of a tool;
- only one cutting insert on a tool during tests;
- tool wear is measured every 5 minutes;
- minimal duration of wear tests for an insert is 30 minutes;
- tool wear is measured on Keyence microscope (Fig. 58).



Fig. 58 Tool wear measurement on Keyence microscope.

Tool wear is measured in two zones:

- bottom part (zone of an insert in the contact with machined surface);
- side cutting edge.

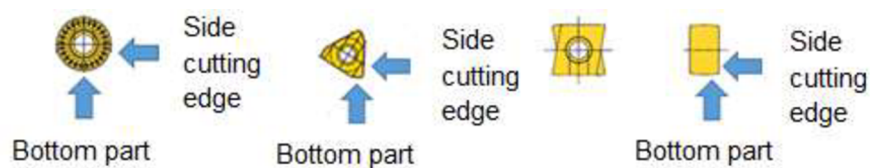


Fig. 59 Measured zones. Order of inserts starting from the left: Round, Triangular, Tangential [41].

4.4.2 Surveillance of a power

During tests, a measurement of the power is performed by wattmeter FLUKE in the same conditions as for Couple tool-material tests. This measurement serves as a control indicator during tests.



Fig. 60 Wattmeter FLUKE [52].

4.4.3 Observed wear mechanisms

- flank wear

Flank wear (Fig. 61) is the most common type of a tool wear and it is as well the most desirable tool wear type. It is very predictable and stable. It is caused by abrasion caused by of hard particles of a machined material [54], [55].

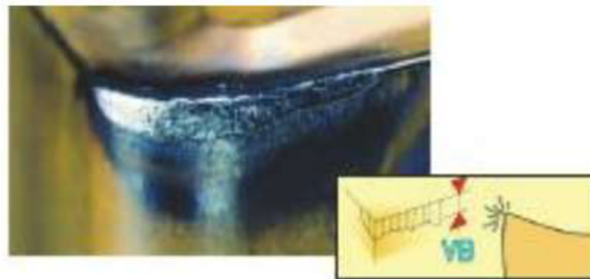


Fig. 61 Example of a flank wear [55].

- edge chipping

Edge chipping (Fig. 62) is caused by an overcharge of tensile stresses. These stresses are induced by various causes, for example by chip hammering, by too high feed or a too high depth of cut, build-up edge, excessive wear on the insert or by vibrations (we have only one tooth on a cutting tool) [55], [56].



Fig. 62 Example of an edge chipping [55].

4.4.4 Round insert – Wear after tests



Fig. 63 Round insert – Wear after tests.

- T = 45 min;
- VB bottom part = 140 μm ;
- VB side cutting edge = 100 μm .

4.4.5 Triangular insert – Wear after tests



Fig. 64 Triangular insert – Wear after tests.

- T = 31,42 min;
- VB bottom part = 125 μm ;
- VB side cutting edge = 125 μm .

4.4.6 Tangential insert – Wear after tests

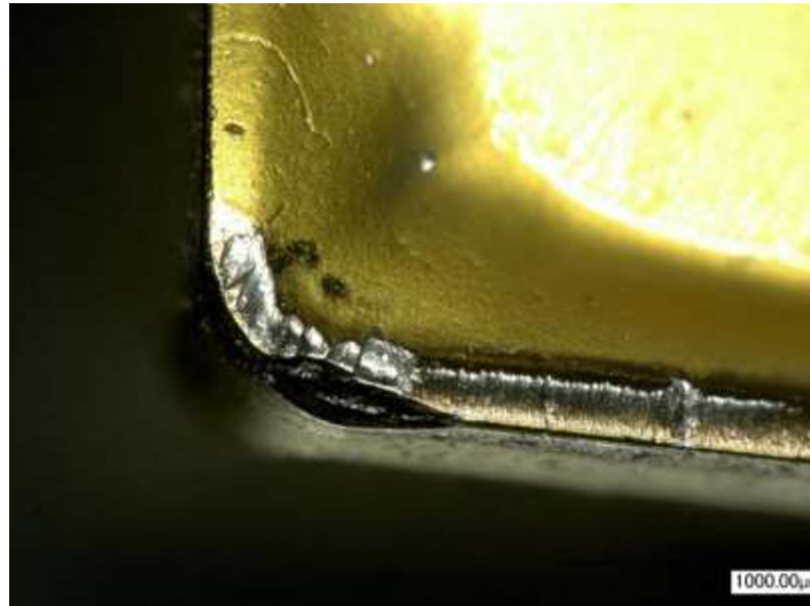


Fig. 65 Tangential insert – Wear after tests.

- $T = 35,9$ min;
- VB bottom part = $50 \mu\text{m}$;
- VB side cutting edge = $330 \mu\text{m}$.

4.4.7 Wear tests results

- VB – bottom part

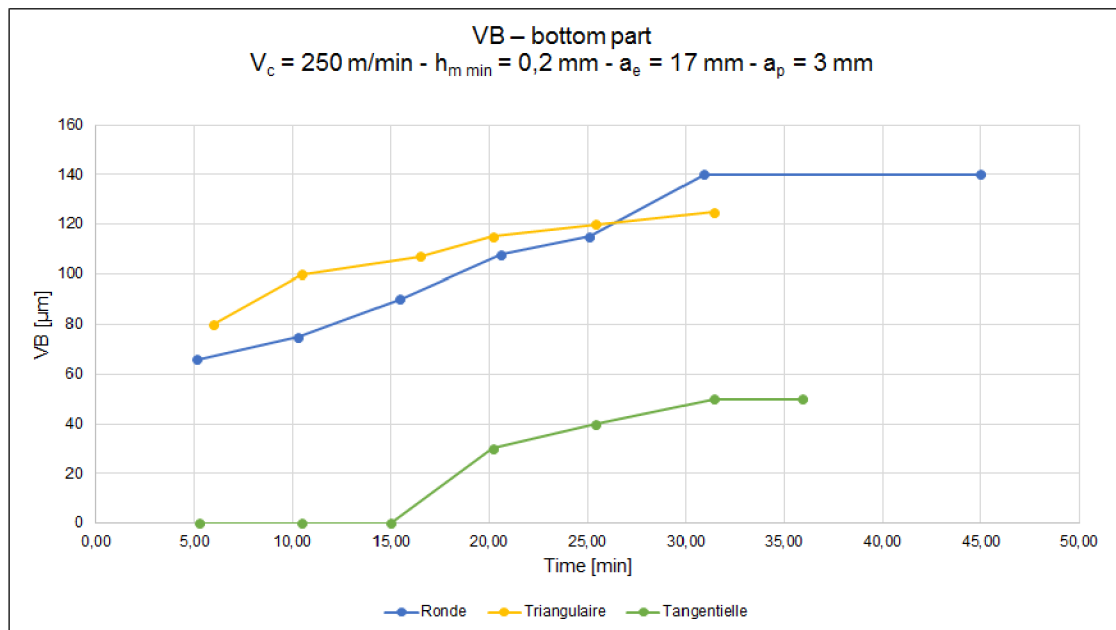


Fig. 66 Evolution of flank tool wear in the bottom part zone during machining time for all types of investigated inserts.

- VB – side cutting edge

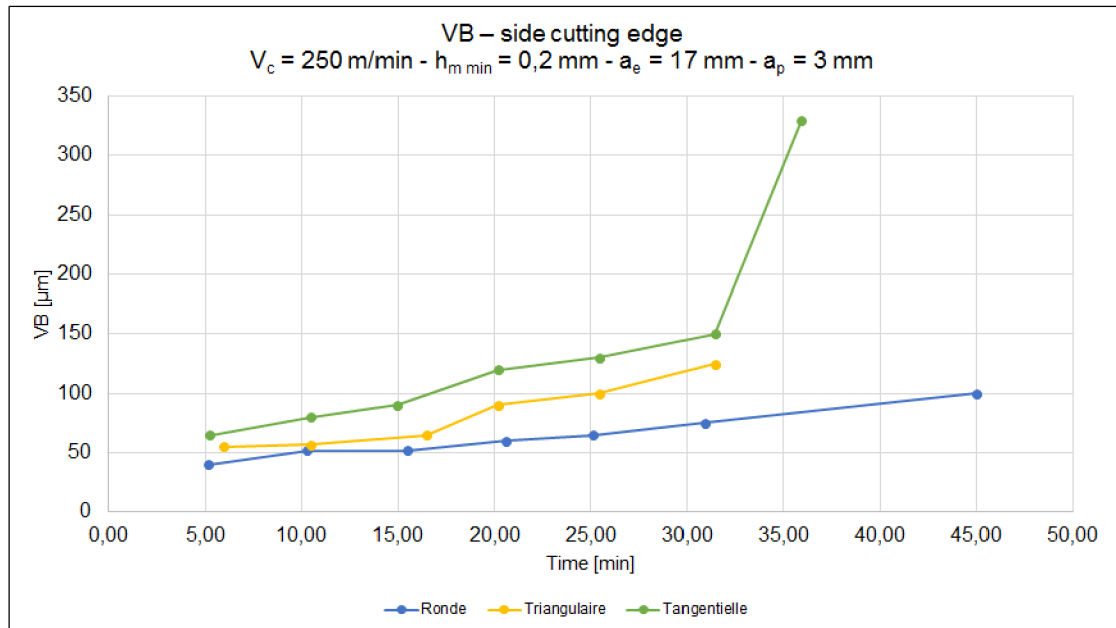


Fig. 67 Evolution of flank tool wear in the side cutting edge during machining time for all types of investigated inserts.

- Surface roughness – Ra [μm]

Table 4.6 Evolution of surface roughness during machining time

Time [min]	Round Ra [μm]	Triangular Ra [μm]	Tangential Ra [μm]
5	0,25	0,33	0,10
31	2,85	0,39	0,43

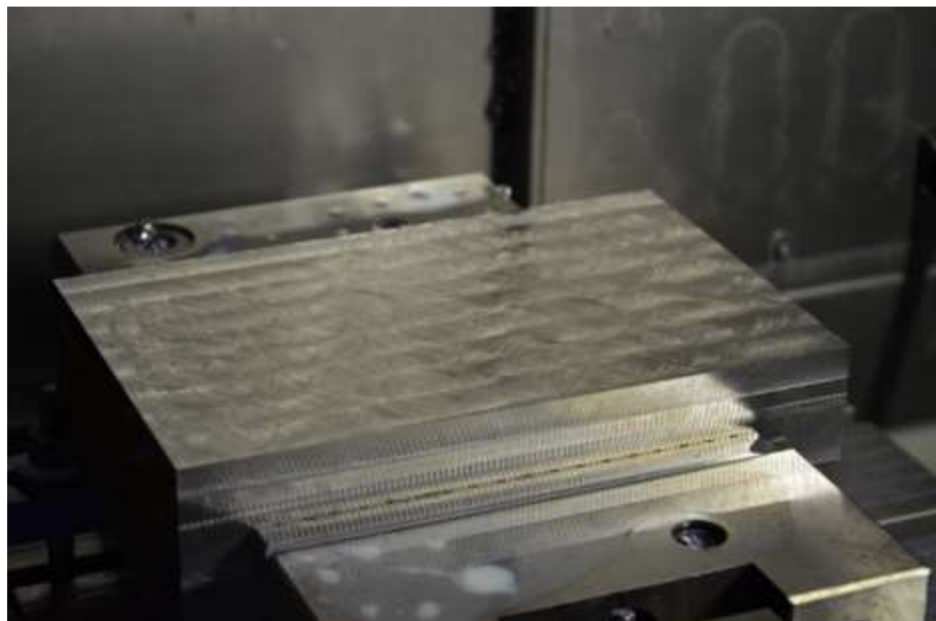


Fig. 68 Visual state of surface after milling with the use of round cutting insert.
 $T = 32 \text{ min. Ra} = 2,85 \text{ μm.}$

▪ Specific cutting energy W_c

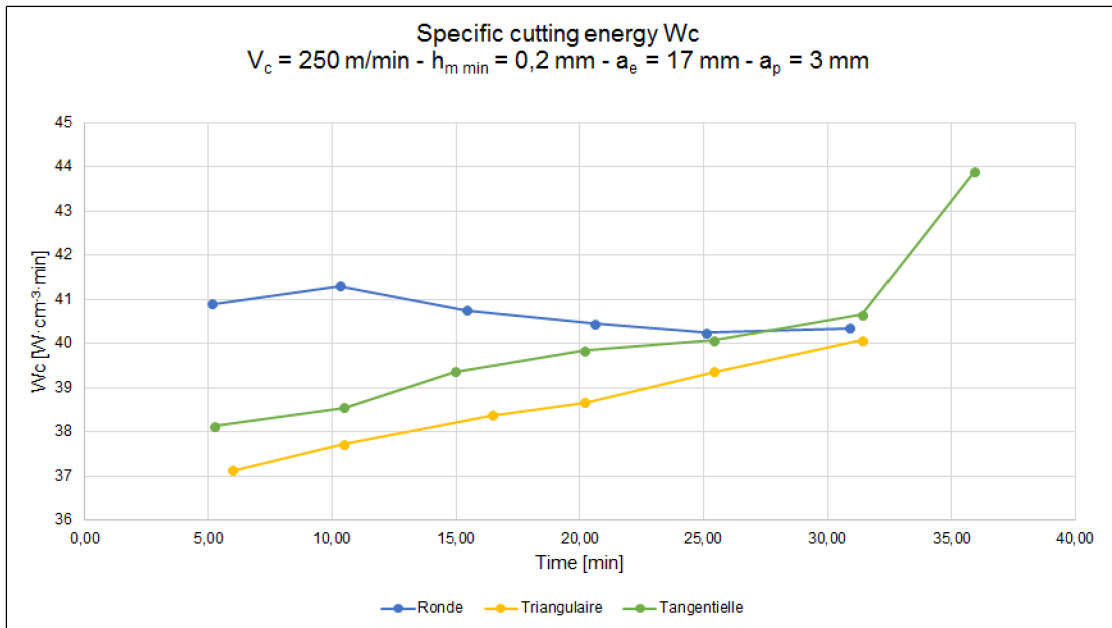


Fig. 69 Evolution of specific cutting energy during machining time.

4.4.8 Wear tests – Conclusions

Table 4.7 Overview of tool wear, surface roughness and specific cutting energy during 30 min. Stability corresponds to the tendency of the curve.

	VB bottom part		VB side cutting edge		Roughness	Specific cutting energy W_c	
	VB [μm]	Stability	VB [μm]	Stability	Ra [μm]	W_c [W·cm ⁻³ ·min]	Stability
Round	140	Stable	75	Stable	2,85	40,34	Stable
Triangular	125	Stable	125	Stable	0,39	40,01	Stable
Tangential	50	Stable	330	Unstable	0,43	40,65	Stable

Round inserts is the most stable insert concerning tool wear. Evolution of the tool wear in both investigated zones is very stable, the curve of evolution of the tool wear is increasing in controlled manner and the cutting edge of a round inserts dispose a potential to machine around 60 min of cutting time without a change of a cutting edge. Therefore, round insert is the best of all three investigated cutting insert types in the criterion of tool wear.

In plus, specific cutting energy (control factor for the tests calculated from measured power) of round insert is the most stable since only its curve, from all investigated inserts, is decreasing.

Triangular insert is stable concerning tool wear, but less stable than round insert.

Tangential insert has very good tool wear behaviour in the bottom part zone. In table 4.7, the value of 330 μm for VB side cutting edge correspond to tool wear after machining for 35 minutes. During first 30 minutes of machining, insert has stable behaviour but after additional 5 min of machining, critical growth occurs and tool wear in side cutting edge increase up to value of 330 μm . This value is immense in comparison to other tested inserts.

Concerning surface roughness, triangular and tangential inserts are performant. Round insert gives $R_a = 2,85 \mu\text{m}$ so the value seven times higher than in the case of triangular and tangential inserts.

To conclude tool wear tests, of the criteria of Framatome for roughing operation allow to have surface roughness giving $R_a = 2,85 \mu\text{m}$, the round insert is the best choice due to its great behaviour in the cut and to its stability and resistance against tool wear.

5 ANALYSIS AND MODELLING OF MACHINING FORCES

5.1 Machining forces analysis

Coordinate system of the dynamometer and tool coordinate system are not the same. To convert active force F_a from dynamometer coordinate system to tool rotating coordinate system, software DasyLab uses these mathematical equations to perform the conversion [57]:

$$\text{Machining force} \quad F = F_a + F_z \quad (5.1)$$

$$\text{Active force} \quad F_a = F_x + F_y = F_c + F_{cN} \quad (5.2)$$

Active force is located in working plane defined by vector v_c and vector v_f .

For the purpose of this study, forces F_a and F_z are sufficient to fulfil objectives of this chapter. If the entry angle φ would be known, forces F_x and F_y could be transferred into forces by applying formulas below [57]:

$$\text{Cutting force} \quad F_c(\varphi) = F_x(\varphi) \cdot \cos \varphi + F_y(\varphi) \cdot \sin \varphi \quad (5.3)$$

$$\text{Perpendicular cutting force} \quad F_{cN}(\varphi) = F_x(\varphi) \cdot \sin \varphi + F_y(\varphi) \cdot \cos \varphi \quad (5.4)$$

Illustration of the transition of three workpiece specific forces F_x , F_y , F_z (coordinate system of the dynamometer in other words forces measured during machining) to the tool rotating coordinate system with tool specific forces (F_c , F_{cN} , F_z) is explained in Fig. 70.

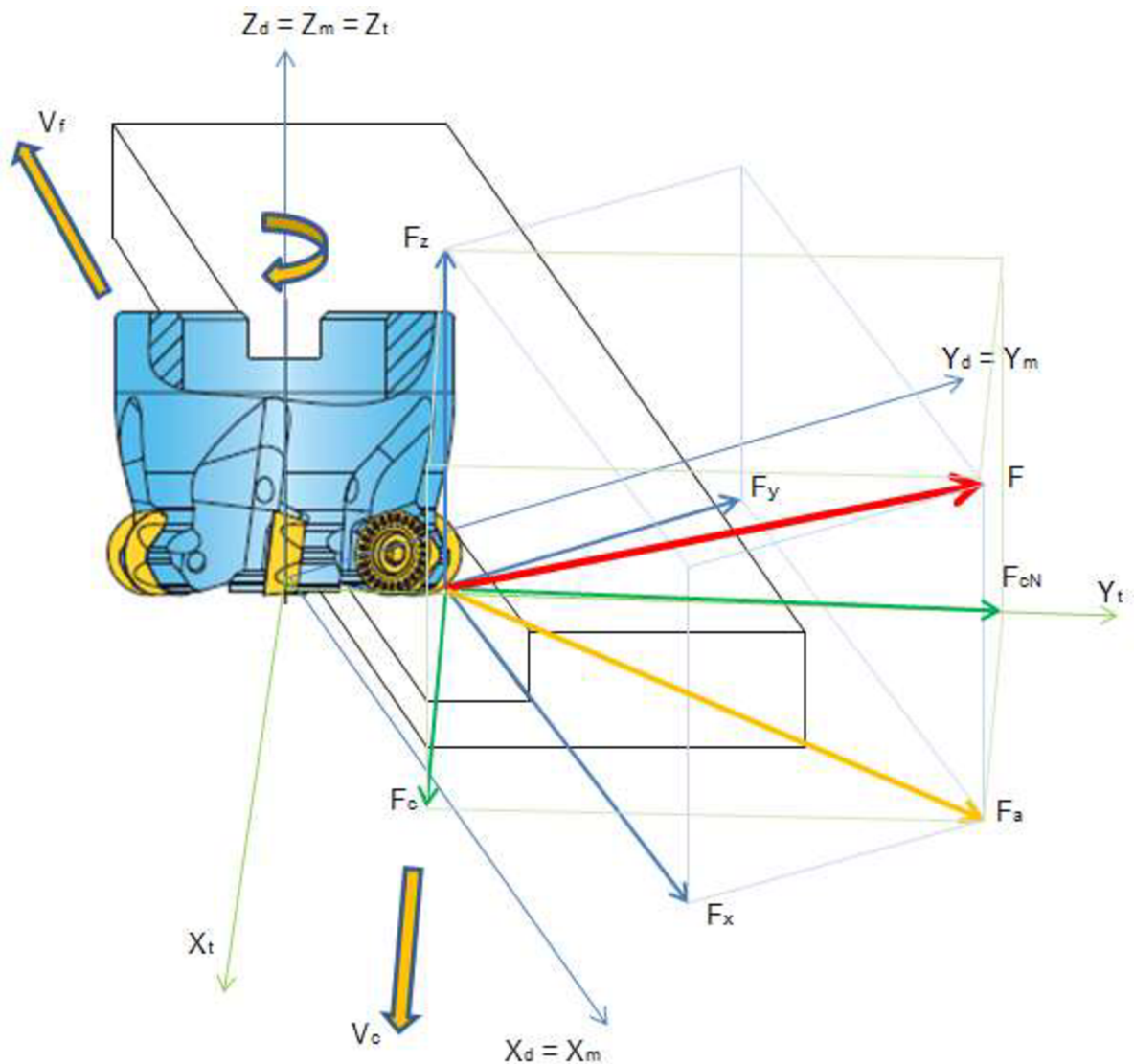


Fig. 70 Relationship between F_x , F_y , F_z and tool coordinate system (F_z , radial force, tangential force) [57], [28].

Tests prove that forces act only in the plane XY for triangular and tangential inserts, therefore for these two types of cutting inserts it is a 2D problem. For round cutting insert, force in the Z axis has to be taken into account, thus it is a 3D problem.

This effect is caused by insert geometry. Due to geometries of triangular and tangential inserts force F_z is negligible, but round insert induces effort F_z of the value around 500N.

Force signals for all three types of cutting inserts are detailed on figures below. These figures confirm the introduced effect (Red curve – F_x ; Blue curve – F_y ; Violet curve – F_z ; Green curve – F_a).

- Round insert

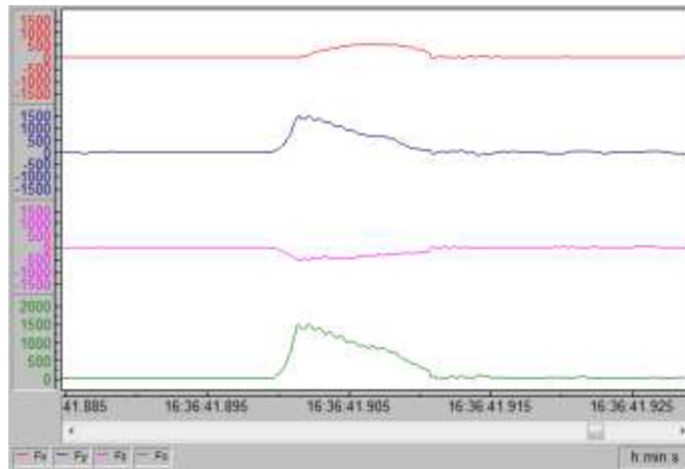


Fig. 71 Signal of forces obtained during tests -Round insert.

- Triangular insert

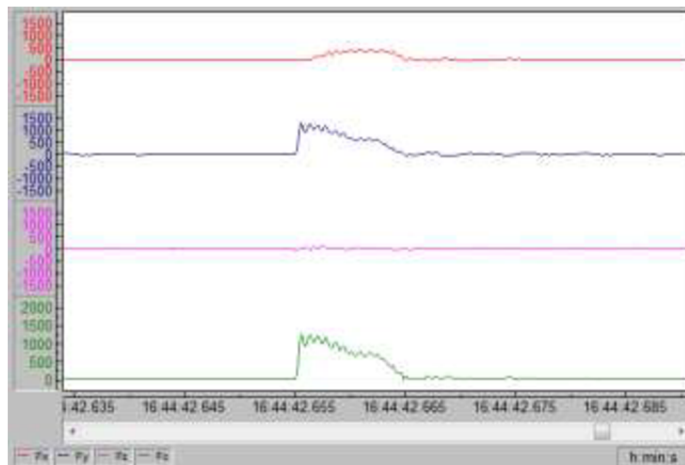


Fig. 72 Signal of forces obtained during tests - Triangular insert.

- Tangential insert

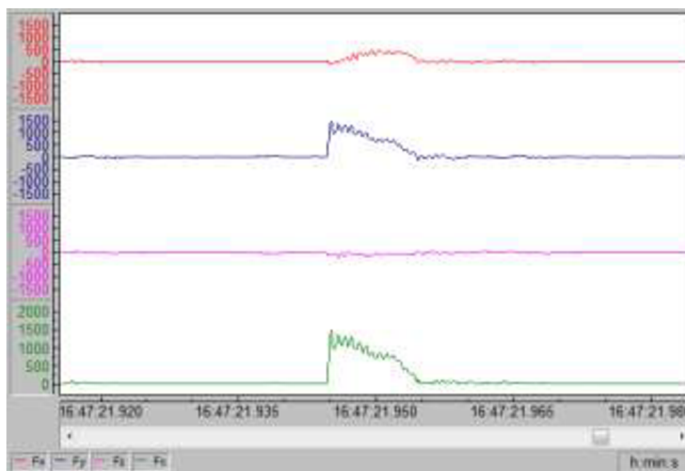


Fig. 73 Signal of forces obtained during tests - Tangential insert.

During the passage of a one tooth in the material during machining, a curve of forces is not constant and forces vary in following manner (Fig.74), due to rapid increase of the chip area (so h_m) when the tooth enter the workpiece in combination with the choc of entering of the tooth in the workpiece and rapid reduction of the chip area (so h_m) when tooth leaves the workpiece [28]:

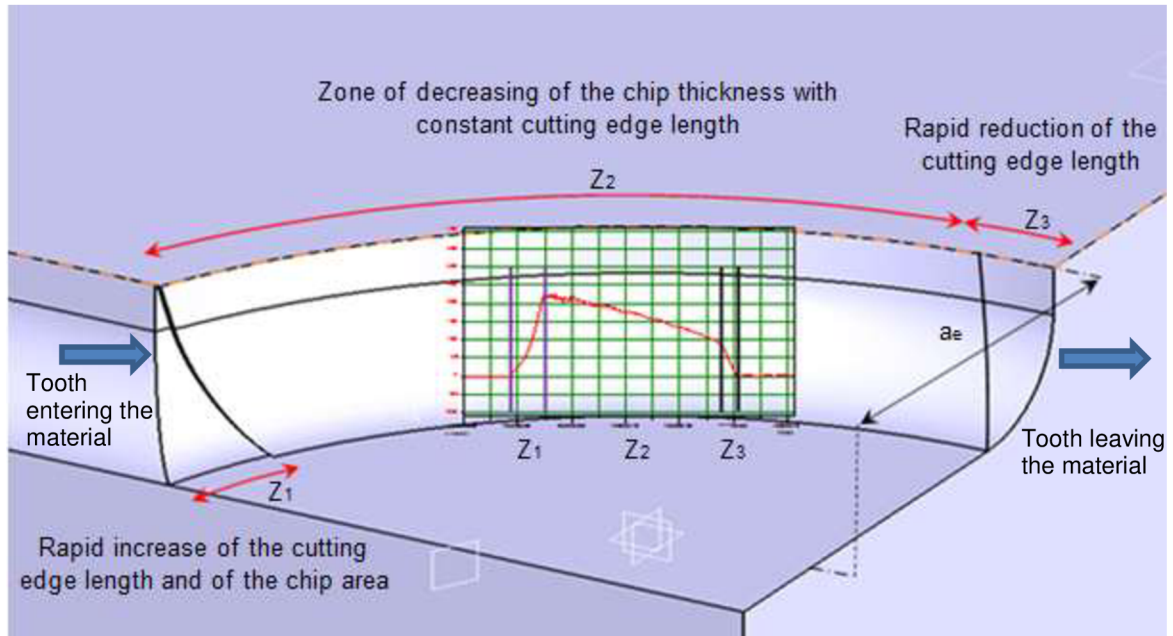


Fig. 74 Influence of the chip area on a force signal [28].

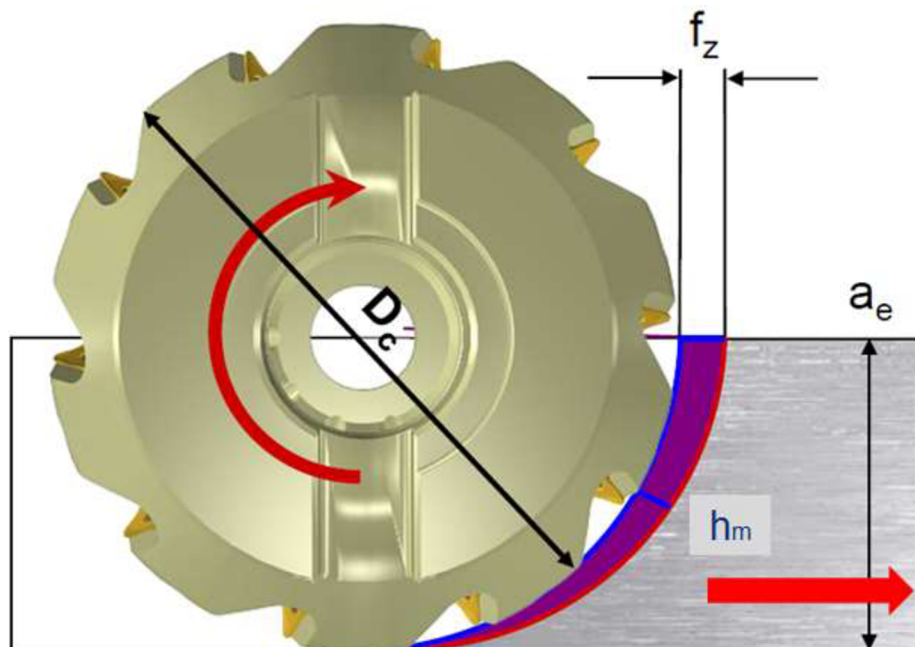


Fig. 75 Visualisation of variation of the average chip thickness during a passage of a tooth in the workpiece during machining [56].

5.2 Modelling of machining forces

Cutting forces model for dimensioning of clamping and spindle is created. It is a simple model based on cutting conditions, the use of an abacus of specific cutting energy W_c as the function of the average chip thickness h_m and on the mathematical relationships between F_c , F_a and F_z . This model is based on average values of machining forces.

As the result of the model, following results are achieved:

- Force F_c which serves for calculation of torque used to dimension machine-tool spindle and accessories mounted during machining, such as tool holders, large interface between spindle and tool or machining head. This force is calculated from data measured with wattmeter.
- Force F_a used for dimensioning of a piece clamping. When F_a is calculated, its value is superposed into X and Y directions of the clamped part.
- Force F_z used for dimensioning of a piece clamping.

These values are sufficient to dimension the clamping of a machined part and the spindle for machining operations used in Framatome production conditions.

5.2.1 Application of the model

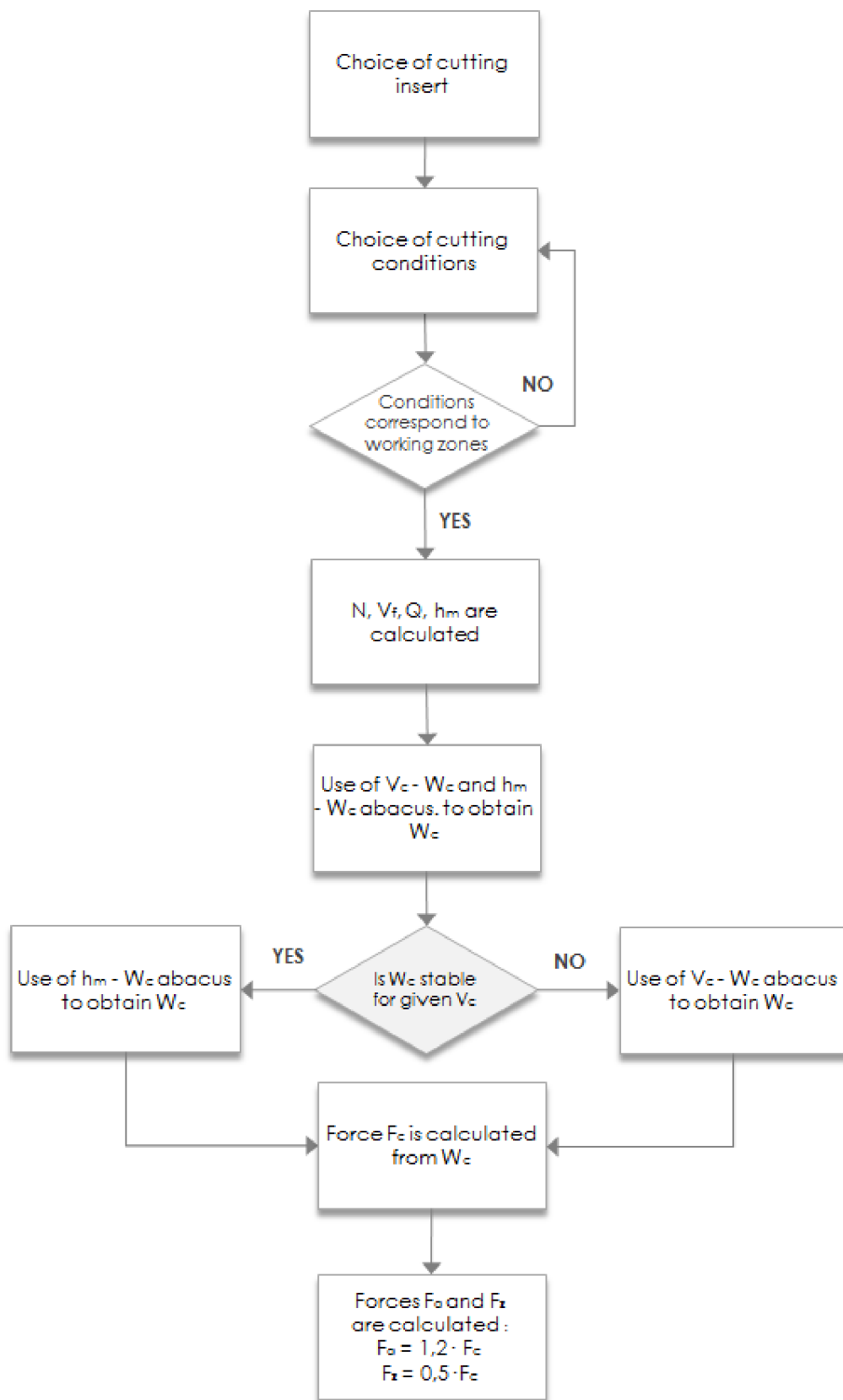


Fig. 76 Flowchart illustrating forces model.

Cutting conditions (v_c , D , f_z , z , a_p , a_e) are chosen following corresponding working zone obtained during Couple tool-material tests.

Then spindle speed N , table speed v_f , metal removal rate Q and average chip thickness h_m are calculated according to following formulas [58]:

$$\text{Spindle speed} \quad N = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D} \quad (5.5)$$

$$\text{Table feed} \quad v_f = f_z \cdot N \cdot z \quad (5.6)$$

$$\text{Metal removal rate} \quad Q = \frac{a_p \cdot a_e \cdot v_f}{1000} \quad (5.7)$$

Average chip thickness calculated following formulas introduced in chapter
Average chip thickness h_m

Stability of W_c for chosen v_c has to be verified with the use of $v_c - W_c$ abacus (Fig. 77). If the value of W_c is stable, $h_m - W_c$ abacus (Fig. 78) is used to determine the value of W_c . On the other hand, if the value of W_c is not stable, the value of W_c from $v_c - W_c$ abacus is applied. Both abacuses are created from power values measured with wattmeter during tests. Cutting conditions used for determination of these abacuses are shown in table 5.1 and table 5.2.

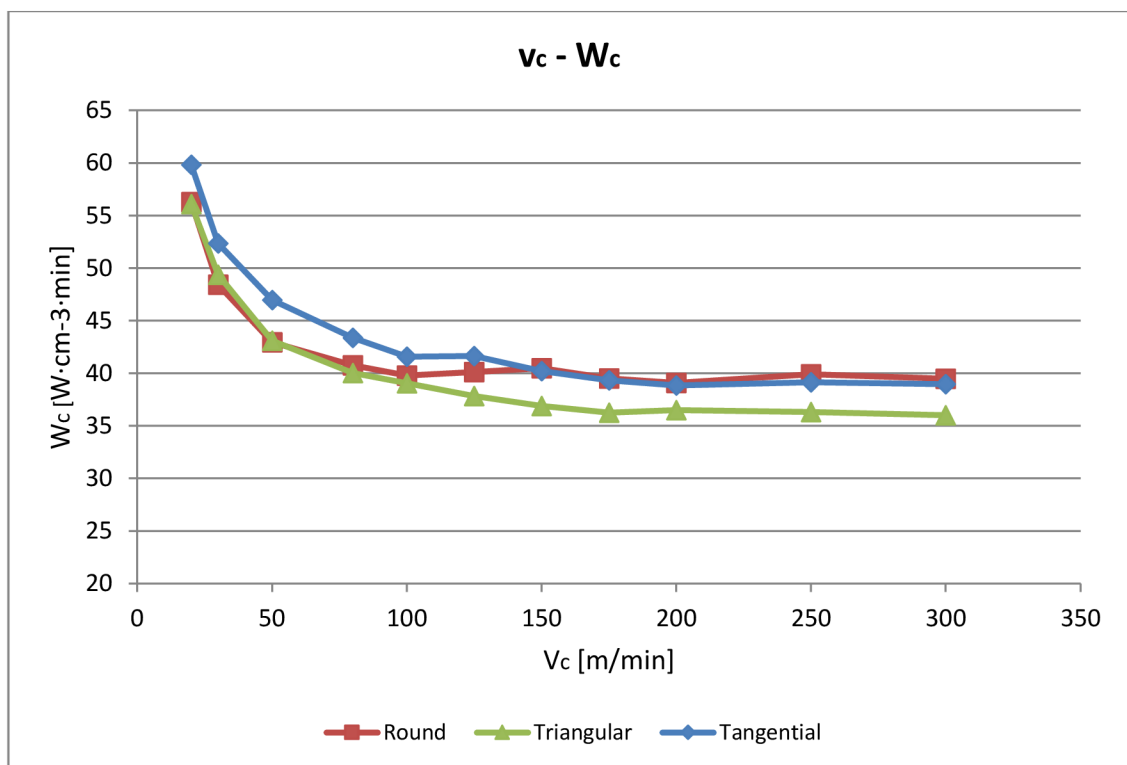


Fig. 77 Relationship between v_c and W_c .

Table 5.1 Cutting conditions used to obtain $v_c - W_c$ abacus.

Round					Triangular					Tangential				
v_c	f_z	a_p	h_m	W_c	v_c	f_z	a_p	h_m	W_c	v_c	f_z	a_p	h_m	W_c
m/min	mm	mm	mm	$W \cdot cm^{-3} \cdot min$	m/min	mm	mm	mm	$W \cdot cm^{-3} \cdot min$	m/min	mm	mm	mm	$W \cdot cm^{-3} \cdot min$
20	0,24	3	0,196	56	20	0,21	3	0,198	56	20	0,21	3	0,198	60
30	0,24	3	0,196	48	30	0,21	3	0,198	49	30	0,21	3	0,198	52
50	0,24	3	0,196	43	50	0,21	3	0,198	43	50	0,21	3	0,198	47
80	0,24	3	0,196	41	80	0,21	3	0,198	40	80	0,21	3	0,198	43
100	0,24	3	0,196	40	100	0,21	3	0,198	39	100	0,21	3	0,198	42
125	0,24	3	0,196	40	125	0,21	3	0,198	38	125	0,21	3	0,198	42
150	0,24	3	0,196	40	150	0,21	3	0,198	37	150	0,21	3	0,198	40
175	0,24	3	0,196	39	175	0,21	3	0,198	36	175	0,21	3	0,198	39
200	0,24	3	0,196	39	200	0,21	3	0,198	37	200	0,21	3	0,198	39
250	0,24	3	0,196	40	250	0,21	3	0,198	36	250	0,21	3	0,198	39
300	0,24	3	0,196	39	300	0,21	3	0,198	36	300	0,21	3	0,198	39

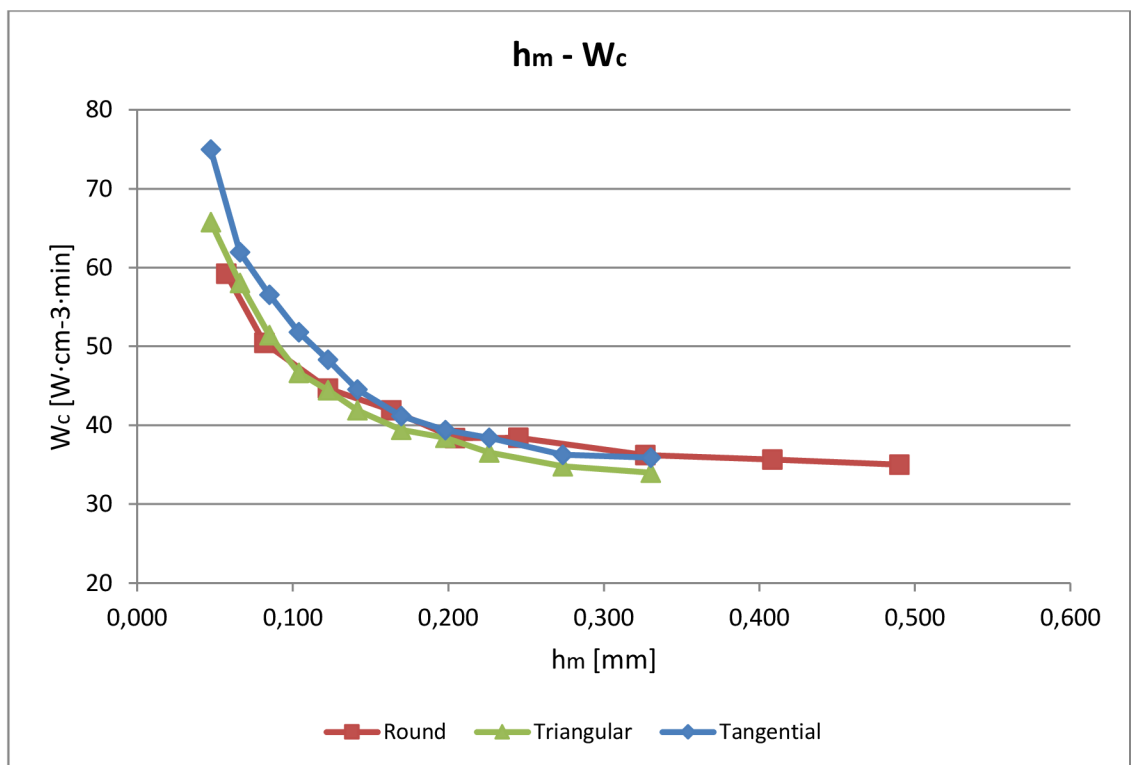


Fig. 78 Relationship between h_m and W_c .

Table 5.2 Cutting conditions used to obtain $h_m - W_c$ abacus.

Round					Triangular					Tangential				
v_c	f_z	a_p	h_m	W_c	v_c	f_z	a_p	h_m	W_c	v_c	f_z	a_p	h_m	W_c
m/min	mm	mm	mm	W.cm ⁻³ .min	m/min	mm	mm	mm	W.cm ⁻³ .min	m/min	mm	mm	mm	W.cm ⁻³ .min
150	0,07	3	0,057	59	150	0,05	3	0,047	66	150	0,05	3	0,047	75
150	0,1	3	0,082	50	150	0,07	3	0,066	58	150	0,07	3	0,066	62
150	0,15	3	0,122	45	150	0,09	3	0,085	51	150	0,09	3	0,085	57
150	0,2	3	0,163	42	150	0,11	3	0,104	47	150	0,11	3	0,104	52
150	0,25	3	0,204	38	150	0,13	3	0,123	44	150	0,13	3	0,123	48
150	0,3	3	0,245	38	150	0,15	3	0,141	42	150	0,15	3	0,141	45
150	0,4	3	0,327	36	150	0,18	3	0,170	39	150	0,18	3	0,170	41
150	0,5	3	0,408	36	150	0,21	3	0,198	38	150	0,21	3	0,198	39
150	0,6	3	0,490	35	150	0,24	3	0,226	37	150	0,24	3	0,226	38
					150	0,29	3	0,273	35	150	0,29	3	0,273	36
					150	0,35	3	0,330	34	150	0,35	3	0,330	36

During Couple tool-material tests, relations between h_m and W_c are obtained from measurement of power [15]:

$$W_c = \frac{P}{Q} \quad (5.8)$$

Wattmeter measuring power takes into account in its calculation the cutting force F_c .

Torque C , used for dimensioning, is calculated with ensuing formulas [58], [59]:

$$\text{Power} \quad P = W_c \cdot Q \quad (5.9)$$

$$\text{Cutting force} \quad F_c = \frac{P}{v_c} \quad (5.10)$$

$$\text{Torque} \quad C = F_c \cdot \frac{D}{2} \quad (5.11)$$

Forces measurements with Kistler dynamometer are necessary to determine following relations between average forces F_c , F_a and F_z (Fig. 79, Fig. 80, Fig. 81, Fig. 82):

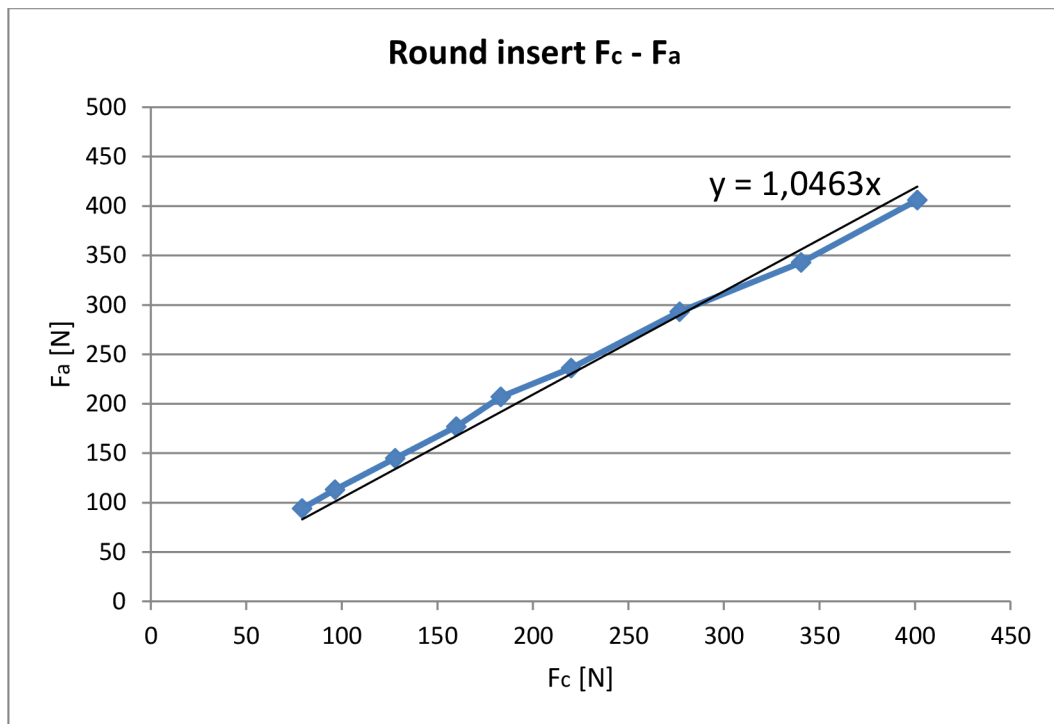


Fig. 79 Correlation between F_c and F_a – round insert.

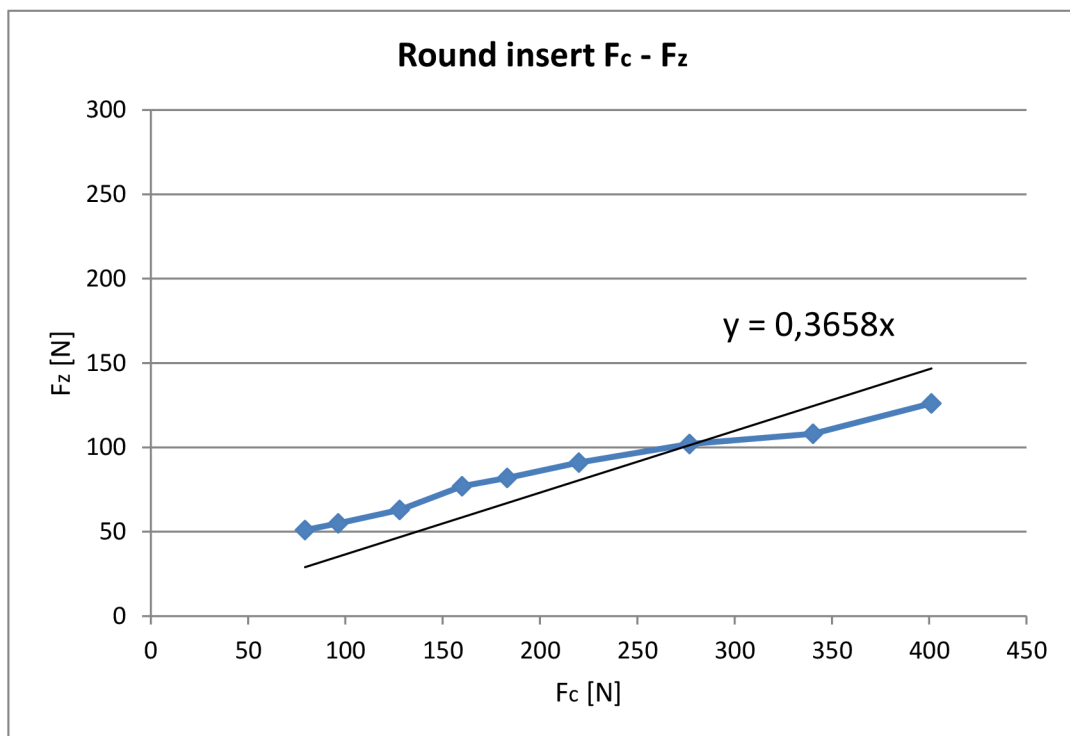


Fig. 80 Correlation between F_c and F_z – round insert.

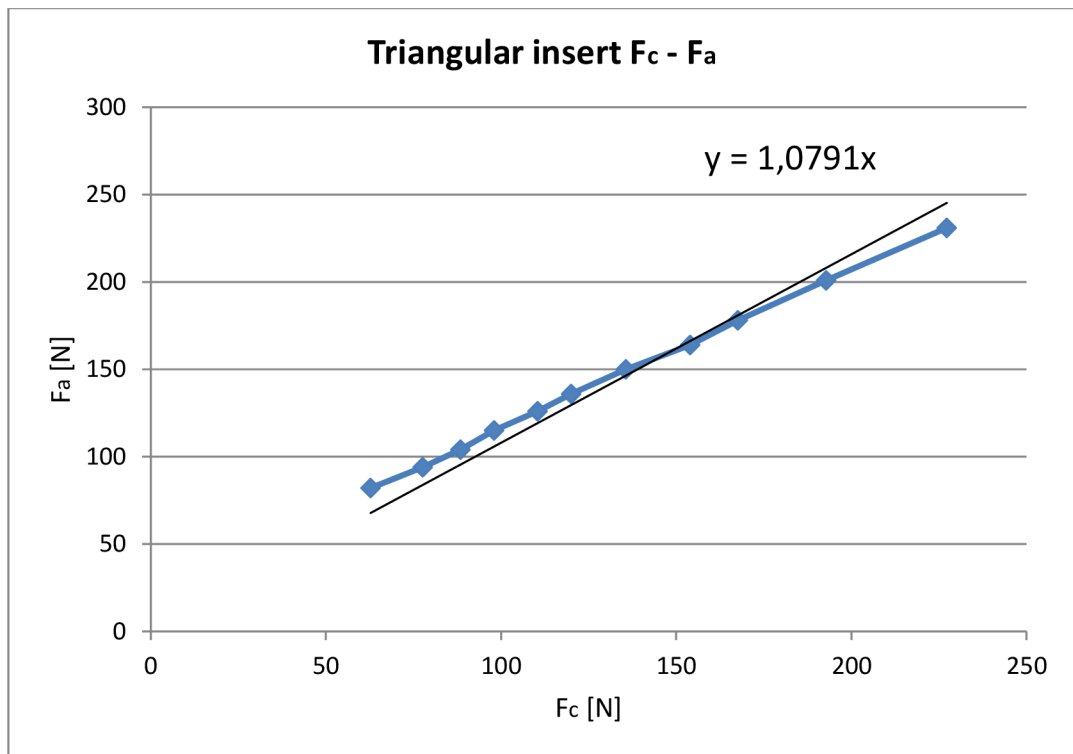


Fig. 81 Correlation between F_c and F_a – triangular insert.

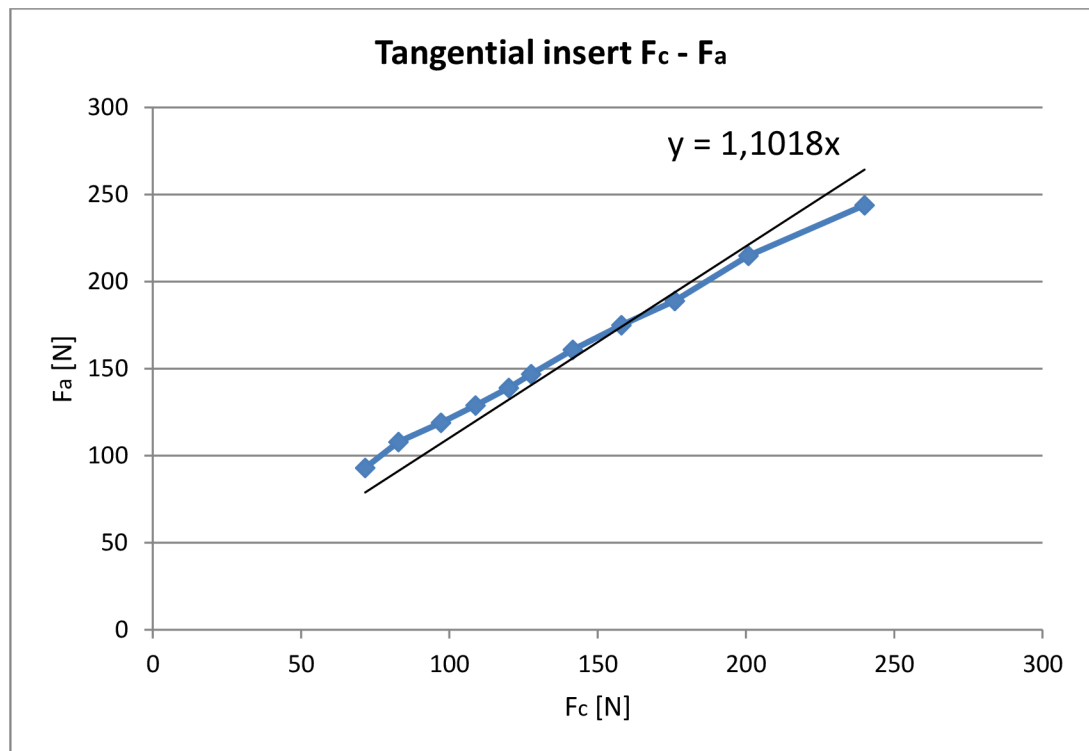


Fig. 82 Correlation between F_c and F_a – tangential insert.

To ensure good implementation into production conditions, security coefficient is applied and relationships between forces is adjusted and determined in following manner:

$$\text{Active force} \quad F_a = 1,2 \cdot F_c \quad (5.12)$$

$$\text{Force } F_z \quad F_z = 0,5 \cdot F_c \quad (5.13)$$

These relations are applicable for all three types of cutting inserts. Relation between active and cutting force is established from tests performed with all three types of cutting inserts. Relation between force F_z and cutting force is determined from tests with round cutting inserts, nevertheless this relation is applicable as well for triangular and tangential inserts since their force F_z is negligible and therefore with application of this relation, mounting of a part is sufficiently dimensioned.

Calculated and obtained parameters are sufficient to dimension the machine's spindle, machining accessories, tool holder interface and machined part clamping.

6 CONCLUSIONS

From theoretical studies and practical experiments can be given conclusions and results described below.

Results of industrialization of machining operations and CNC machine tools are:

- 1) The industrialization of high feed milling saves 38% of cutting time on one of Framatome's strategic parts. Thanks to this project, this technology is also applied to many other machined components using optimized cutting parameters (cutting speed equal to 230 m/min and feed per tooth equal to 1,6 mm).
- 2) The industrialization of other machining operations presented in this work (deep hole drilling, boring and pocket machining) has resulted in the successful industrialization of these machining operations into Framatome production on a new heavy CNC machine tool.
- 3) The theoretical and practical information obtained during this work is a key part of the Framatome investment project for the introduction of new heavy machine tools into production. Presented tests and methods are applied and contribute to the successful verification and industrialization of several machine tools, which significantly influenced the project schedule and financial results of the investment.

For development of roughing face milling strategy following principal conclusions might be drawn:

- 1) Results of geometrical analysis shows that cutting edge of round and tangential inserts are simple, without a land, in the zone of corner radius. On the other hand, the cutting edge of triangular cutting insert is reinforced with a land ($b\gamma = 265 \mu\text{m}$).
- 2) Geometrical analysis demonstrates as well that side cutting edge of round insert is simple, without a land. Side cutting edges of triangular ($b\gamma = 168 \mu\text{m}$) and tangential ($b\gamma = 195 \mu\text{m}$) cutting inserts are reinforced with a land.
- 3) Round insert has the largest working zone, in the terms of cutting speed (50 – 300 m/min) and feed per tooth (0,17 – 0,6 mm). Maximal limits of feed per tooth of triangular and tangential inserts are 0,35 mm, which is inferior to value obtained with round insert (0,6 mm). Therefore, this type of cutting insert is the most variable and potentially the most economical type of cutting insert, since it allows a use of the highest feed per tooth.

- 4) Values of VB in the bottom part (zone of contact with machined surface) for round (140 μm) cutting insert are higher than for triangular (125 μm) and tangential (50 μm) cutting inserts.

On the other hand values of VB on the side cutting edge are smaller in the case of round (75 μm) insert than values for triangular (125 μm) and tangential (330 μm) inserts.

- 5) With machining tests is proved that the cutting edge of round inserts dispose a potential to machine around 60 min of cutting time without a change of a cutting edge. Therefore, round insert is the best of all three investigated cutting insert types in the criterion of tool wear.
- 6) Tool wear tests results are connected with geometrical analysis of cutting inserts. Cutting inserts without a land (round) have better cutting properties (cutting easily machined material) and are more wear resistant than cutting inserts with a land (triangular, tangential). This is proved during tool wear tests with the results of round cutting insert.
- 7) Despite the fact that surface roughness obtained after machining with round insert is approximately seven times higher than after machining with triangular or tangential inserts, surface roughness $R_a = 2,85 \mu\text{m}$ is acceptable surface roughness for roughing operations in Framatome production.

Conclusions of analysis and modelling of machining forces are:

- 1) Result of this model is a receiving of cutting force F_c , which is used for calculation of torque for dimensioning of machine tools spindle and its machining accessories (such as tool holders, interfaces between spindle and cutting tool or machining head). Obtained are as well forces F_a and F_z , applied for dimensioning of machined part clamping.
- 2) Relationships between machining forces are determined resulting from their analysis during this project. Active force F_a is 1,2 times higher than cutting force F_c . Force F_z is twice lower than cutting force F_c .

Modernisation and improving of manufacturing processes are very important factors to maintain quality and competitiveness of the production. Therefore, it's is necessary to continue in development of machining operations following this project. Methodology introduced in this work is more and more often used in Framatome's production and helps to increase productivity and safety of machining operations, and getting maximum of new company's CNC machines tools in terms of their power, torque and feeds. Thus, the continuation of the research is advised for more cutting tools and more machining operations, combining them for example with modern methods of machining surveillance.

BIBLIOGRAPHY

- [1] "Designer and supplier of nuclear steam supply system and nuclear equipment, services and fuel for high levels of safety and performance." [Online]. Available: <https://www.framatome.com/EN/businessnews-94/framatome-designer-and-%09supplier-of-nuclear-steam-supply-system-and-nuclear-equipment-services-%09and-fuel-for-high-levels-of-safety-and-performance.html>. [Accessed: 25-Jul-2019].
- [2] FRAMATOME, "At a glance." [Online]. Available: https://www.framatome.com/businessnews/liblocal/docs/1_QUI-sommes-%09nous/Carre_identite/At-a-glance_Framatome_130718_BD.pdf. [Accessed: 26-Jul-2019].
- [3] "Saint-Marcel: a plant dedicated to heavy equipment assembly." [Online]. Available: <https://www.framatome.com/EN/businessnews-255/framato-me-%09components--%09saintmarcel-a-plant-dedicated-to-heavy-equipment-assembly.htm>. [Accessed: 27-Jul-2019].
- [4] M. AUROY, *Processus d'industrialisation: Schémas en industrie de process*. Techniques de l'ingénieur, 1999.
- [5] J. MAREK et al, *Design of CNC Machine Tools*. MM publishing, 2015.
- [6] PRAMET, "Těžké obrábění," 2019.
- [7] Z.-D. ZHOU, L. GUI, Y.-G. TAN, M.-Y. LIU, Y. LIU, and R.-Y. LI, "Actualities and Development of Heavy-Duty CNC Machine Tool Thermal Error Monitoring Technology," *Springer*, 2017.
- [8] N. SABKHI, "Contribution à l'étude expérimentale et à la modélisation de l'usinage des pièces de grandes dimensions: Applications au cas du taillage de dentures à la fraise-mère," L'Université de Lorraine, 2015.
- [9] J. THIL, "Contribution à l'étude expérimentale et à la modélisation de l'usinage des matériaux difficiles pour le procédé de forage profond avec système BTA," L'Université de Lorraine, 2013.
- [10] "What is Deep Hole Drilling?" [Online]. Available: <https://www.unisig.com/information-and-resources/what-is-deep-hole-drilling/>. [Accessed: 31-Jul-2019].
- [11] "Machining Processes IME 240."
- [12] G. T. SMITH, *Cutting Tool Technology: Industrial Handbook*. Springer-Verlag London Limited, 2008.
- [13] "Boring holes." [Online]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/boring/pages/default.aspx>. [Accessed: 01-Aug-2019].
- [14] "Six Points You must Know about High-Feed Milling." [Online]. Available: <https://www.moldmakingtechnology.com/articles/six-points-you-must-know-about-high-feed-milling->. [Accessed: 01-Aug-2019].

- [15] "NF E 66-520-6, Domaine de fonctionnement des outils coupants; Couple outil-matière. Partie 6: Mode d'obtention du couple outil-matière en fraisage," 1999.
- [16] M. MICHALÍČEK, "Predikce pracovní přesnosti CNC obráběcích strojů.," Vysoké učení technické v Brně, 2013.
- [17] "ISO 10791-1, Conditions d'essai pour centres d'usinage – Partie 1: Essais géométriques des machines à broche horizontale (axe Z horizontal)," 2015.
- [18] "VDI/DGQ 3441: Statistical testing of the Operational and Positional Accuracy of Machine Tools Basis," 1977.
- [19] J. SELMI, "Qualification dynamique de l'ensemble outil-machine: Application au fraisage et à l'alésage," ENSAM, 2015.
- [20] "Stratégies de maintenance: Analyse vibratoire des machines tournantes."
- [21] "Les techniques de la maintenance préventive prévisionnelle."
- [22] C.-F. BISU, M. GHINEA, A. GERARD, M. ZAPCIU, and M. ANICA, "Analyse du comportement dynamique d'une broche de machine-outils," *Mécanique Ind.* 12, 2012.
- [23] "ISO 10791-10, Conditions d'essai pour centres d'usinage – Partie 10 : Evaluation des déformations thermiques," 2007.
- [24] "Système Ballbar QC20-W." [Online]. Available: <https://www.renishaw.fr/fr/systeme-ballbar-qc20w--11075%0A%0A>. [Accessed: 04-Aug-2019].
- [25] "Principes des tests Ballbar." [Online]. Available: <https://www.renishaw.fr/fr/principes-des-tests-ballbar--6818>. [Accessed: 04-Aug-2019].
- [26] B. VEREECKE, "Une analyse probabiliste du comportement d'une famille d'aciers pour cuve de REP en cas d'accident grave," LMT Cachan, 2005.
- [27] J.-H. SCHMITT, "Matériaux à hautes performances, Matériaux pour l'énergie: Tenue des cuves de REP," 2014.
- [28] S. BORECKI, "Research work." .
- [29] "Nuclear Power Plant – Working Principle, Advantages, Disadvantages with Diagram." [Online]. Available: <https://www.mechanicalbooster.com/2017/12/nuclear-power-plant.html%0A%0A>. [Accessed: 28-Jul-2019].
- [30] L. FOUED, "Cours de techniques de surveillance."
- [31] "L'activité réacteurs d'Areva pourrait passer sous le contrôle d'EDF." [Online]. Available: <http://www.lefigaro.fr/societes/2015/03/26/20005-20150326ARTFIG00377-l-activite-reacteurs-d-areva-pourrait-passer-sous-le-controle-d-edf.php>. [Accessed: 27-Jul-2019].

- [32] D. DESTRE and J.-P. IZARD, *Construction des centrales REP – Equipements primaires*. Techniques de l'ingénieur, 2012.
- [33] "Shell Flanges for Nuclear Pressure Vessel." [Online]. Available: https://www.jsw.co.jp/en/products/shell_flanges/index.html. [Accessed: 28-Jul-2019].
- [34] "APPLICATION FIELDS – ENERGETICS." [Online]. Available: <https://skodamt.com/en/fields-of-application/power-generation>. [Accessed: 30-Jul-2019].
- [35] "Vertical Lathes." [Online]. Available: <http://www.ckd-blansko.cz/en/product-portfolio/vertical-lathes/ckd-skdy%0A%0A>. [Accessed: 30-Jul-2019].
- [36] "Heavy Duty Double Girder Overhead Crane." [Online]. Available: <https://www.weihuagr.com/product/overhead-crane/heavy-duty-double-girder-overhead-crane.html>. [Accessed: 30-Jul-2019].
- [37] "Deep Hole Drilling Heads." [Online]. Available: <http://www.afh-tools.com/brand/taegutec/?page=2>. [Accessed: 31-Jul-2019].
- [38] "TOOL TIPS: Deep hole machining in 'multi-task' format." [Online]. Available: <https://www.canadianmetalworking.com/blog/tool-tips-deep-hole-machining-in-multi-task-format>. [Accessed: 31-Jul-2019].
- [39] B. HADDAG, J. THIL, M. NOUARI, C. BARLIER, and L. PAPILLON, "Analysis of the deep hole drilling with BTA system by the characterization of the cutting process," 2013.
- [40] "U-Tronic." [Online]. Available: http://www.dandrea.com/fr/U-Tronic_Têtes_à_aléser_et_à_dresser_de_moyennes_et_grandes_dimensions_à_commande_numérique_pour_aléseuses_et_machines_spéciales_. [Accessed: 01-Aug-2019].
- [41] "Catalog Ingersoll." [Online]. Available: <https://www.ingersoll-imc.com/>. [Accessed: 01-Aug-2019].
- [42] C. DE AMORIN and D. MAGNIERE, "Rationalisation des outils de coupe et optimisation des conditions de coupe," 2004.
- [43] "Milling holes and cavities/pockets." [Online]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/milling/milling-holes-cavities-pockets/pages/default.aspx%0A%0A>. [Accessed: 02-Aug-2019].
- [44] M. A. V. CHAPMAN, R. FERGUSON-KELLY, and W. LEE, "Interferometric straightness measurement and application to moving table machines."
- [45] "Tutorial: Manual Positioning Basics." [Online]. Available: <https://www.newport.com/t/manual-positioning-basics%0A%0A>. [Accessed: 01-Aug-2019].
- [46] M. A. V. CHAPMAN, "Calibration of machine squareness."
- [47] "ISO 10791-7, Conditions d'essai pour centres d'usinage – Partie 7: Exactitude des pièces d'essai usinées," 2015.

- [48] "Evaluation of vibration." [Online]. Available: https://www.imv.co.jp/e/pr/vibration_measuring/chapter04/. [Accessed: 04-Aug-2019].
- [49] "As Nuclear Giant AREVA Reforms, Framatome Is Resurrected," 2018. [Online]. Available: <https://www.powermag.com/as-nuclear-giant-areva-reforms-framatome-is-resurrected/>. [Accessed: 05-Aug-2019].
- [50] "Alicona Infinite Focus SL." [Online]. Available: <https://www.alicon.com/fr/produits/infinitefocussl/>. [Accessed: 05-Aug-2019].
- [51] "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," 1982.
- [52] G. FROMENTIN, "Moyens et caractéristiques des matériels d'acquisition de laboratoire d'usinage."
- [53] G. FROMENTIN, "Synthèse des documents sur le matériel d'acquisition d'efforts du laboratoire," 2012.
- [54] G. LEVAILLANT *et al.*, *Usinage par enlèvement de copeaux de la technologie aux applications industrielles*. Eyrolles, 2005.
- [55] "Wear on cutting edges." [Online]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/materials/pages/wear-on-cutting-edges.aspx>. [Accessed: 07-Aug-2019].
- [56] C. BARLIER, *Mémotech Plus, Industrialisation & Mécanique « Usinage des matériaux métalliques »*. Casteilla, 2010.
- [57] G. ANTONSSON, *Handbook of Mechanical Engineering*. Springer, 2012.
- [58] "Expressions usuelles en usinage," 2007.
- [59] "Sciences et Techniques Industrielles. Génie Mécanique. Conditions de coupe."

LIST OF USED SYMBOLS AND ABBREVIATIONS

Abbreviation	Description
ANSI	American National Standards Institute
BTA	Boring Trepanning Association
CNC	Computer Numeric Control
DTS	Double Tube System
EDF	Electricité de France
ENSAM	l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers
ETVE	Test of error of a variation of ambient temperature
HRC	Hardness, as measured by the Rockwell scale
HSK	Hollow taper shank
ISO	International organization for standardization
JIS	Japanese Industrial Standards
LaBoMaP	Laboratoire Bourguignon des Matériaux et Procédés
MW	Megawatt
STS	Single Tube System
VDI	Association of German Engineers
Axe	Axis
Cylindre	Cylinder
Déviation	Deviation
Diamètre	Diameter
Ecart-type	Standard deviation
Rep.	Repetition

Symbol	Unit	Description
C	[N.m]	Torque
D	[mm]	Diameter
D _f	[mm]	Milling cutter diameter
D _p	[mm]	Cutting insert diameter
F	[N]	Machining force
F _a	[N]	Active force

F_c	[N]	Cutting force
F_{cN}	[N]	Perpendicular cutting force
F_x	[N]	Specific force in direction X
F_y	[N]	Specific force in direction Y
F_z	[N]	Specific force in direction Z
L	[mm]	Length
N	[rpm]	Spindle speed
P	[W]	Power
Q	[cm ³ .min ⁻¹]	Material removal rate
Ra	[μ m]	Arithmetical mean deviation of the assessed profile
R _m	[MPa]	Ultimate strength
T	[min]	Time
VB	[μ m]	Width of the flank wear land
W _c	[W.cm ⁻³ .min]	Specific cutting energy
a _e	[mm]	Radial depth of cut
a _p	[mm]	Axial depth of cut
f _z	[mm]	Feed per tooth
h _m	[mm]	Average chip thickness
r	[μ m]	Average cutting edge radius
v _c	[m.min ⁻¹]	Cutting speed
v _f	[mm.min ⁻¹]	Table feed
z	[-]	Number of teeth
β	[°]	Wedge angle
b _y	[mm]	Length of land
κ_r	[°]	Tool cutting edge angle
φ	[°]	Entry angle