

**Titre:** Usure par diffusion des outils en carbure pendant l'usinage des alliages d'aluminium  
Title: diffusion wear of carbide tools during machining of aluminium alloys

**Auteur:** Victor Calatoru  
Author:

**Date:** 2007

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Calatoru, V. (2007). Usure par diffusion des outils en carbure pendant l'usinage des alliages d'aluminium [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal].  
Citation: PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/7962/>

## Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/7962/>  
PolyPublie URL:

**Directeurs de recherche:** Marek Balazinski, & René Mayer  
Advisors:

**Programme:** Non spécifié  
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

USURE PAR DIFFUSION DES OUTILS EN CARBURE PENDANT  
L'USINAGE DES ALLIAGES D'ALUMINIUM

VICTOR CALATORU  
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES  
(GÉNIE MÉCANIQUE)

AVRIL 2007



Library and  
Archives Canada

Bibliothèque et  
Archives Canada

Published Heritage  
Branch

Direction du  
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

395, rue Wellington  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

*Your file* *Votre référence*

ISBN: 978-0-494-29217-4

*Our file* *Notre référence*

ISBN: 978-0-494-29217-4

#### NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

#### AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

\*\*  
Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

USURE PAR DIFFUSION DES OUTILS EN CARBURE PENDANT  
L'USINAGE DES ALLIAGES D'ALUMINIUM

présenté par : CALATORU Victor

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées  
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. VERREMAN Yves, Ph.D., président

M. BALAZINSKI Marek, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. MAYER René, Ph.D., membre et co-directeur de recherche

M. SONGMENE Victor, Ph.D., membre

*À mes anciens professeurs  
Boris Plahteanu, Vitalie Belousov  
et Victor Bausic pour leur rôle de  
modèle dans ma formation*

## Remerciements

Je voudrais remercier les personnes qui m'ont aidé pour mener à bien le travail de ce mémoire. Plus particulièrement, je voudrais remercier mes deux directeurs de recherche, les Professeurs Marek Balazinski et René Mayer pour leur confiance et leur patience. Je voudrais remercier aussi les professeurs Krzysztof Jemielniak de l'Université de Varsovie et Henri Paris de l'Université de Grenoble pour leur support et leurs conseils.

Aussi, je voudrais remercier Melissa Côté et les techniciens du Laboratoire de recherche en Fabrication Virtuelle de l'École Polytechnique de Montréal pour leur appui dans la réalisation des essais d'usinage nécessaires pour cette recherche. J'aimerais mentionner les mérites de messieurs Stéphane Chalut de Bombardier Aéronautique et Éric Péloquin de Optimum Inc., à Mercier, qui ont partagé avec moi leurs connaissances sur les outils en carbure.

J'ai dédié cet ouvrage à mes anciens professeurs et collègues Boris Plahteanu et Vitalie Belousov, qui m'ont appris beaucoup de choses qui m'ont servi pour la réalisation de la recherche, ainsi qu'à mes anciens collègues Cristian Croitoru, Mihaita Horodinca et Catalin Dumitras dans le Département des Outils et Systèmes des Machines de l'Université Technique de Iasi, en Roumanie qui m'ont donné des idées et des exemples, en plus de leur amitié et encouragements.

La réalisation de cette recherche aurait été tout simplement impossible sans le support de CRIAQ et de Monsieur André Bazergui, qui a financé les recherches et mon aide financière pour la durée du projet, fournissant un cadre idéal pour la communication avec l'industrie.

Je suis reconnaissant à toute ma famille et à mes amis pour la patience et la sympathie avec laquelle ils ont suivi mes progrès et m'ont encouragé de continuer jusqu'à la fin.

## Résumé

Les alliages d'aluminium sont utilisés souvent dans l'industrie aéronautique pour leurs qualités comme leur faible poids spécifique, la résistance à la corrosion et la facilité de l'usinage. Pour des raisons économiques et de qualité du produit final, il est préférable que la fabrication des certaines composantes de la structure du fuselage soit effectuée à partir d'un seul brut, en creusant des poches pour enlever des quantités importantes de matière, pour créer des structures de type gaufre.

L'opération est effectuée à l'aide des fraises en bout en carbure de tungstène à des vitesses élevées. Malgré l'importante différence entre les propriétés mécaniques de l'alliage usiné et du matériau de l'outil, les outils brisent avant d'atteindre leur durée de vie utile recommandée par le manufacturier.

La recherche derrière ce mémoire était censée de découvrir et d'expliquer le mécanisme d'usure qui conduisait au bris des outils. Il a été trouvé que les conditions sur le taillant de l'outil sont plus critiques qu'on ne le pensait avant, favorisant l'usure par adhérence accélérée par la diffusion entre le cobalt contenu dans le matériau de l'outil et l'aluminium dans l'alliage usiné. On a démontré que le composé formé entre les deux éléments, l'aluminure de cobalt Al-Co, est fragile et peut affaiblir les taillants de l'outil, jusqu'à une profondeur importante. Aussi, il a été démontré par un essai de frottement que l'adhérence de l'aluminium à la surface de l'outil est liée à la concentration apparente de cobalt sur la surface de l'outil. Les taches de cobalt, reliés aux non-uniformités dans la distribution du cobalt dans le volume du matériau de l'outil et à l'accumulation du cobalt près de la surface à cause du réchauffement pendant la rectification des outils peuvent jouer un rôle critique dans ce processus.

Le mémoire présente aussi les avances dans la technologie d'obtention des carbures qui pourraient aider à retarder ou éliminer le processus d'usure décrit.

## Abstract

Aluminum alloys are often used in aeronautical industry for their qualities, such as lightweight, corrosion resistance and ease of machining. For structural integrity, large components of the fuselage frame are manufactured as complex honeycomb structure, by removing important quantities of material through carving pockets.

The operation is performed with tungsten carbide end mills at high speeds. Despite the important difference in mechanical properties of the machined alloy and the tool material, tools broke before reaching their expected lifetime.

This research was aimed to discover and explain the wear mechanism that led to catastrophic failure of the tools. It was found that the conditions on the edge of the tool are more critical than thought before, favoring diffusion wear by particles migration between the cobalt contained in the tool material and the aluminum in the machined alloy. It was proved that the compound formed between the two elements, the cobalt aluminide, Al-Co, is brittle and can weaken the edges of the tool, down to a significant depth. Also, it was proved by a friction test that the adherence of the aluminum to the tool surface is related to the apparent concentration of cobalt on the surface of the tool. Cobalt smear, related to non-uniformities in the cobalt distribution in the volume of the tool material and cobalt accumulation close to the surface due to heating during grinding of the tools may play a critical role in the process.

Also the dissertation presents the advances in the carbide technology that may help to overcome the described wear process.

## Table des matières

DEDICACE .....	iv
REMERCIEMENTS .....	v
RÉSUMÉ .....	vi
ABSTRACT .....	vii
TABLE DES MATIÈRES .....	viii
LISTE DES FIGURES.....	x
LISTE DES TABLEAUX.....	xii
LISTE DES ANNEXES.....	xiii
CHAPITRE 1 – INTRODUCTION .....	1
1.1       Motivation.....	2
1.2       Objectif et approche .....	3
1.3       Structure du mémoire .....	3
CHAPITRE 2 DÉMARCHE DE L'ENSEMBLE DU TRAVAIL.....	6
CHAPITRE 3 – REVUE CRITIQUE DE LA LITTÉRATURE .....	16
3.1       Introduction .....	16
3.2       Fabrication des carbures de tungstène.....	18
3.3       Phénomènes d'usure des outils pendant l'usinage de l'aluminium .....	23
3.3.1    Usure par abrasion.....	24
3.3.2    Usure par adhésion.....	25
3.3.3    Usure par diffusion.....	26
3.3.4    Ébréchure des taillants .....	28
3.3.5    Influence de l'échauffement de l'outil et de la pièce sur l'usure .....	30
3.4       Modélisation des phénomènes de coupe pour l'usinage à grande vitesse de l'aluminium .....	32
3.5       Surveillance des outils pendant l'usinage .....	33
3.5.1    Surveillance acoustique.....	34
3.5.2    Surveillance des forces de coupe .....	35
3.6       Analyse et modélisation des phénomènes de coupe par fractals.....	36

3.7	Protection contre l'usure .....	37
3.7.1	Nouveaux matériaux pour les outils, nouvelles technologies de fabrication des outils .....	38
3.7.2	Recouvrement des outils par des couches protectrices .....	40
3.8	Géométrie des outils améliorée .....	49
3.9	Outils spécialisés pour l'usinage d'aluminium à sec .....	50
3.10	Conclusions .....	51
CHAPITRE 4	– OUTILS SPÉCIALISÉS POUR L'USINAGE DE L'ALUMINIUM .....	52
4.1	Outils fabriqués par Sandvik Coromant .....	52
4.2	Outils fabriqués par Gühring .....	53
4.3	Outils fabriqués par OSG .....	54
4.4	Outils fabriqués par SOWA .....	55
4.5	Outils fabriqués par Dormer .....	56
4.6	Outils fabriqués par Kennametal .....	56
4.7	Conclusion .....	57
CHAPITRE 5	– DIFFUSION WEAR MECHANISM DURING HIGH SPEED MACHINING OF 7475-T7351 ALUMINUM ALLOY WITH CARBIDE END MILLS .....	58
CHAPITRE 6	– DISCUSSION GÉNÉRALE .....	79
CHAPITRE 7	– CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS .....	81
BIBLIOGRAPHIE .....	85	
ANNEXE 1 – METHOD FOR ANALYZING THE EFFECTS OF ALUMINUM BUILD-UP ON TUNGSTEN CARBIDE TOOLS BEHAVIOR .....	93	
ANNEXE 2 – ASPECTS OF THE TOOL WEAR OF CARBIDE TOOLS DURING HIGH SPEED MACHINING OF ALUMINUM ALLOYS .....	100	

## Liste des figures

Figure 2-1 – Durabilité réduite des outils suite au passage au régime d'usinage à grande vitesse. À gauche répartition de la durée de vie des outils, à droite distribution en temps des bris.....	7
Figure 2-2 – Effet destructif de l'addition de l'aluminium dans des bains de galvanisation sur les guidages en Stellite, contenant du cobalt. Tiré de Zhang et Tang [7].....	9
Figure 2-3 – Apparence des traces d'usure pour les guidages en Stellite (a gauche), après Zhang et Tang [6] et microphotographie des surfaces des outils exposés à l'attaque de l'aluminium pendant les essais de frottement (à droite).....	9
Figure 2-4 – Mécanisme de défaillance des outils en carbures pendant l'UGV de l'aluminium .....	10
Figure 2-5 – Effet de l'aluminium sur le matériau des outils à hautes températures. À gauche structure du carbure dans la couche affectée, à droite photographie de la surface de l'outil, où on observe les noyaux de cobalt attaqués.....	11
Figure 2-6 – Températures pendant l'essai de frottement.....	13
Figure 2-7 – Anomalies des efforts de coupe observés pendant plusieurs essais de coupe après 400 minutes d'usinage.....	14
Figure 2-8 – Diagrammes FFT des efforts de coupe pour 200, 400 et 600 minutes. Le signal a été prélevé dans les mêmes conditions pour les 3 essais.....	15
Figure 3-1 – Diagramme typique des lobes de stabilité.....	17
Figure 3-2 - Élaboration des carbures de tungstène WC (après une documentation électronique de la compagnie Safety, France) .....	18
Figure 3-3 – Fabrication des pièces en carbures de tungstène .....	20
Figure 3-4 – Pressage des pièces en forme de barre .....	21
Figure 3-5 – La matrice du cobalt.....	22
Figure 3-6 – Grains de carbures de tungstène après le frittage .....	22
Figure 3-7 – Types d'usure prédominants en fonction de la température (Hastings, 1976) .....	23

Figure 3-8 – Résultats de l’analyse PIXE sur la pénétration de l’aluminium dans les outils en carbure. Après Nouari et al. [7] .....	27
Figure 3-9 – Distribution de la température calculée le long de la face de coupe pour le perçage à sec d’une pièce en aluminium AA2024 T351 avec un outil en WC-Co. Avance = 0,4 mm/rot. Après Nouari et al. [8].....	31
Figure 3-10 – Dureté et résilience des quelques types de carbures de tungstène. Après Friedrichs [43] .....	38
Figure 3-11 – L’effet du revêtement d’un foret et des conditions de perçage sur la durée de vie utile de l’outil pour l’alliage A319 ; (*) indique un outil qui n’a pas brisé pendant les essais. Après Wain et al. [16].....	43
Figure 3-12 – Images MEB des faces de coupe et de dépouille d’une plaquette utilisée pour fraiser une pièce en alliage d’aluminium AlCu2.5Si18 (après 36 m usinés). Après Fukui et al. [17].....	43
Figure 3-13 – Forces de coupe mesurées pour le fraisage d’une pièce en AlMg2.5 à 300 m/min, $f=0,15$ mm/rev, $Ad=Rd=5$ mm. Après Fukui et al. [17].....	44
Figure 3-14 – Modélisation des champs de température par éléments finis pour le fraisage à sec de l’alliage AlMg2.5 (V=300m/min, $f=0,15$ mm/rév, DOC=1mm). Après Fukui et al. [17].....	45
Figure 3-15 – Comparaison entre les durées de vie utiles des outils des différents types de revêtement en diamant, déposé par vaporisation chimique, le diamant polycristallin et le carbure de type K10 non recouvert. Après Lahres et Jørgensen [18]. .....	46
Figure 3-16 – Comparaison entre les forces de coupe et la rugosité obtenue pour le tournage à sec d’un alliage d’aluminium avec 11% Si. Le substrat est un carbure de type K10. Après Sahoo et al. [19] .....	47
Figure 3-17 – Variation de la durée de vie de l’outil avec l’angle du chanfrein. Après Choudhury et al. [26].....	50
Figure 5-1 – Al-Co diagram and the list of chemical compounds of aluminum and cobalt (medallion) After ASM Handbook, 1999 [2].....	62
Figure 5-2 – Distribution of temperatures during orthogonal cutting of aluminum with a tool with the same characteristics as a section through the tool studied (rake angle = 10.5 deg, primary clearance angle 10 deg, edge radius 0.02 mm). Simulation performed with AdvantEdge® from Third Wave Inc. .....	65

Figure 5-3 – Attacked surface of the tool, at a) 650 °C, b) 750 °C, for 200 min, samples in contact with aluminum .....	66
Figure 5-4 – Surface of the tool affected by aluminum vapors.....	67
Figure 5-5 – Altered structure of the carbide exposed to high temperature, prolonged contact with aluminum alloy (left). Normal structure (right) .....	68
Figure 5-6 – Changes in the layer of aluminum with temperature and exposure time ..	69
Figure 5-7 – Absorption of aluminum on the bottom side of the layer (left). Collapsed aluminum layer over what looks like a cobalt accumulation to the surface (right). Both samples were exposed at 500 °C for 400 minutes. ....	70
Figure 5-8 – The most common form of chipping observed on the tools. Burnout of the tool material is visible around the chipping. A shiny plaque of aluminum adhered to the rough surface of the chipping. ....	72
Figure 5-9 – Aluminum adherences to the tool cutting edge. The form of deposits indicates melting. ....	73
Figure 5-10 – Non-uniformities in the distribution of cobalt in the mass of carbide tool; a) kernel type and b) accumulation at the surface .....	74
Figure 5-11 – Important non-uniformity of cobalt distribution close to the ground surface of the tool.....	75
Figure A1-0-1 – Typical chipping of the cutting edge of the tool, axial view (left), rake face view (right) .....	95
Figure A1-0-2 - Tool path for cutting tests .....	96
Figure A1-0-3 – Force measurement results: average, maximum and minimum of variable component (vibrations) envelope .....	97
Figure A1-0-4 – Variable component of the cutting force when aluminum is building up on the tool surfaces .....	98
Figure A2-0-1 – Non-uniformities in the distribution of cobalt in the tool material: left – kernel type, right infiltration to surface .....	103
Figure A2-0-2 – Evolution of the cutting forces with wear, a) 0, b) 200, c) 400 and d) 600 minutes respectively Axial DOC = 0.762 mm, full immersion, 11060 rpm .....	104
Figure A2-0-3 – Friction tests results BUL formation, after 5 minutes (left), aluminum welded, after 10 minutes of test (center), surface free of adhered aluminum, after 20 minutes (right) .....	105

**Liste des tableaux**

Tableau 3-1 – Influence des principaux additifs ajoutés aux carbures de tungstène .....	19
Tableau 3-2 – Liste des échantillons pour les essais présentés dans Figure 3-15.	
Après [18].....	46
Tableau 3-3 - Comparaison entre les propriétés des certains recouvrements. Après [14].....	48
Tableau 4-1- Liste des outils recommandés pour l'usinage de l'aluminium .....	57

**Liste des annexes**

ANNEXE 1 – Method for Analyzing the Effects of Aluminum Build-Up on Tungsten Carbide Tools Behavior .....	78
ANNEXE 2 – Aspects of the Tool Wear of Carbide Tools during High Speed Machining of Aluminum Alloys .....	85

## **Chapitre 1 – Introduction**

L'industrie aéronautique utilise de grandes quantités d'aluminium pour la fabrication des aéronefs. Soumise à des pressions pour réduire les coûts de fabrication et pour assurer une meilleure qualité, la fabrication de certaines composantes de fuselage se fait désormais de préférence à partir de blocs ou de plaques d'alliage d'aluminium, en enlevant par fraisage la plupart du matériau pour alléger la structure. Ce processus n'est convenable du point de vue économique que si on peut le faire très vite, en se plaçant dans le domaine de l'usinage à grande vitesse. Bien sûr, il faut s'assurer que dans les nouvelles conditions de travail, une durabilité satisfaisante des outils est assurée.

Les bris accidentels des outils pendant l'usinage peuvent causer des pertes matérielles importantes qui ne seraient pas limitées seulement à l'outil mais qui pourraient s'étendre sur la pièce usinée ainsi que sur le système de fixation de l'outil ou la broche de la machine. Suite à l'augmentation de la vitesse de coupe pendant l'usinage des structures monobloc de type gaufre comportant un grand nombre des poches chez un manufacturier d'avions dans la région de Montréal, une augmentation des bris accidentels d'outils a été observée, ce qui a forcé finalement le manufacturier à se replier dans des régimes de coupe plus conservateurs et beaucoup moins productifs. À part la destruction complète de l'outil pendant l'usinage, un grand nombre d'outils a été retiré de la production au moment quand des ébréchures ont été observées sur le taillant des outils, avant que leur durée de vie selon les normes du manufacturier soit atteinte.

Les recherches entreprises pour élucider les causes de ces bris d'outils ont abouti dans l'élaboration d'une explication cohérente du phénomène qui conduit à l'usure prématuée des outils en carbure de tungstène avec du cobalt comme liant pendant l'usinage des alliages d'aluminium. À part de l'élucidation du mécanisme d'usure qui détruisait les outils, le mémoire inclut une analyse des outils disponibles sur le marché et propose des lignes directrices pour le choix des outils qui seraient mieux adaptés à ce genre d'usage.

### ***1.1 Motivation***

L'usinage à grande vitesse ou à grande productivité permettrait un changement radical des technologies utilisées à présent pour la fabrication des composantes monolithiques à forme complexe dans plusieurs industries. En effet, avec des machines à commande numérique capables à atteindre des vitesses de coupe qui montent jusqu'à 40000 tours par minute et un meilleur contrôle déjà disponible, qui permet la génération des surfaces et des volumes très complexes, il devient de plus en plus faisable de sculpter des pièces directement des blocs d'aluminium, par l'enlèvement du surplus de matériau qui se situe parfois à 70 % ou même plus de la masse du bloc. Toutefois, le passage aux nouvelles conditions de coupe n'est pas sans risques. Les conditions de coupe changent beaucoup avec l'augmentation de la vitesse et les outils habituels se comportent différemment, demandant des changements de géométrie et des matériaux pour résister.

À la demande d'un important manufacturier dans le domaine aéronautique on c'est penchés sur les problèmes de fiabilité des outils pendant l'usinage à grande vitesse des alliages d'aluminium, pour éliminer les bris inexplicables. Également on a cherché à donner une explication du phénomène, rencontré dans des situations très spécifiques mais rencontrés de plus en plus souvent dans l'industrie.

Les trois articles rédigés expliquent le mécanisme d'usure par diffusion observé, proposent une démarche scientifique pour élucider le mécanisme et analysent les effets de l'adhérence de l'aluminium à la surface de l'outil. Le travail effectué pendant le

programme a abordé deux autres aspects connexes, la protection des outils en carbure de l'usure par diffusion par l'application d'un revêtement protecteur en carbone similaire au diamant et l'influence des petites erreurs de géométrie des outils survenues pendant leur fabrication.

### ***1.2 Objectif et approche***

L'objectif principal de la recherche était d'expliquer le mécanisme d'usure qui conduisait à la destruction rapide des outils et par la suite suggérer des paramètres de coupe situés dans une zone de productivité et de fiabilité considérée convenable ou d'autres solutions pour l'élimination des bris accidentels des outils. Pour une meilleure compréhension des phénomènes, des modélisations des champs de température et des contraintes ont été effectués utilisant le logiciel AdvantEdge de Third Wave®. Des programmes ont été élaborés en Matlab pour analyser les forces de coupe enregistrées pendant les essais. Le démarche a été complété par les observations au microscope électronique à balayage (MEB), soit de l'imagerie ou des spectrogrammes pour déterminer la concentration des composants des échantillons prélevés.

### ***1.3 Structure du mémoire***

Le mémoire est structuré pour répondre aux exigences d'une maîtrise par publications et consiste en une étude bibliographique sur l'usure des outils en carbure de tungstène, une description de la démarche de l'ensemble du travail, d'un article de revue en voie de publication, ainsi que d'autres chapitres contenant deux articles acceptés pour publication dans les publications d'une conférence internationale. Aussi, on a inclus un chapitre discutant les avancées récentes des manufacturiers d'outils dans la fabrication des outils spécialisés pour l'usinage des alliages d'aluminium.

- Le premier chapitre est une introduction décrivant la nature du problème rencontré par l'industrie, ainsi que les motivations et les objectifs du présent mémoire et présente la structure par chapitres.
- Le Chapitre 2 présente une étude bibliographique sur les avancées dans le domaine des phénomènes d'usure, de la surveillance des outils afin d'éviter les bris des outils, ainsi que les nouvelles percées technologiques dans l'élaboration des carbures utilisés pour les outils ainsi que dans la conception des outils.
- Le Chapitre 3 présente quelques lignes d'outils spécialisés pour l'usinage de l'aluminium, fabriqués par quelques manufacturiers, qui pourraient mieux répondre aux exigences de l'utilisateur, ainsi que les principales technologies applicables pour améliorer leur qualité.
- Le Chapitre 4 présente l'article “Diffusion Wear Mechanism during High Speed Machining of 7475-T7351 Aluminium Alloy with Carbide End Mills”, qui est rédigé en anglais pour répondre aux exigences pour publication dans la revue internationale Wear.
- Le Chapitre 5 présente une discussion générale des articles inclus dans le mémoire, en le présentant dans le contexte général de la recherche menée.
- Le chapitre 6 présente les conclusions de la recherche menée et le travail à continuer, qui boucle la recherche d'une durée de plus de deux ans.
- En annexes sont présentés deux autres articles qui ont été envoyés pour présentation et publication au 21ème Congrès Canadien de Mécanique Appliquée à l'Université Ryerson, CANCAM '07, en juin 2007 à Toronto. Leurs titres sont

‘Method for Analyzing the Effects of Aluminum Build-Up on Tungsten Carbide Tools Behavior’ et ‘Aspects of the Tool Wear of Carbide Tools during High Speed Machining of Aluminum Alloys’. Le premier discute des observations faites pendant les essais de coupe et propose une méthodologie pour détecter les influences de l’adhésion de l’aluminium à la surface de l’outil sur les efforts de coupe. Le deuxième article lie le contenu de cobalt apparent à la surface de l’outil en carbure avec l’intensité de l’adhésion et l’évolution dans le temps de cette transformation.

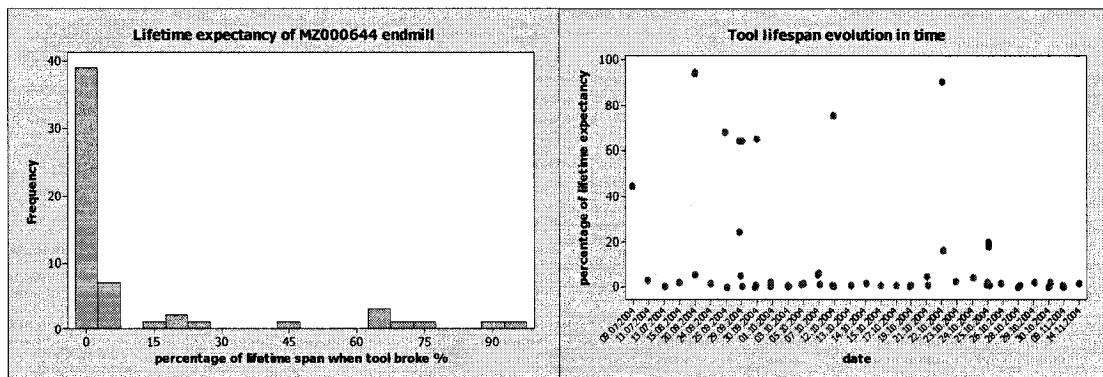
Les trois articles en anglais sont accompagnés de courts résumés en français. Le format a été ajusté pour une meilleure lisibilité. Les photographies ont été agrandies et groupées pour permettre une impression de qualité.

## Chapitre 2 Démarche de l'ensemble du travail

L'usinage des alliages d'aluminium occupe une partie importante des activités de fabrication dans l'industrie aéronautique. Pour augmenter la productivité, les manufacturiers dans le secteur essaient de tirer le maximum de profit des performances des nouvelles générations des machines à commande numérique, plus rapides, plus précises et plus puissantes qu'auparavant et d'augmenter la vitesse de coupe. Le changement des paramètres de coupe est quand même important, car des phénomènes liés à l'échauffement supplémentaire diminuent considérablement la durée de vie utile des outils. Un tel changement a été à l'origine des problèmes qui ont constitué la base de départ de la recherche de ce mémoire.

Pour réduire les coûts de fabrication et pour tirer le maximum de profit de leur machines, une compagnie aéronautique a augmenté la vitesse de rotation des fraises à 18000 tours par minute, l'équivalent d'une vitesse tangentielle de 1000 m/min, pendant le fraisage des poches dans des composantes de la structure des aéronefs avec des fraises en bout à trois taillants de  $\frac{3}{4}$  pouces de diamètre. La Figure 2-1 présente la distribution des durées de vie des outils tel que observée après l'augmentation des vitesses de coupe. On observe que la plupart des fraises étaient détruites peu après le début de leur utilisation, qui aurait dû être de 1400 minutes, selon l'indication du manufacturier des outils. La distribution temporelle des incidents (à droite dans la même figure) n'a pas permis de tirer la conclusion qu'il s'agissait d'un lot avec des problèmes de fabrication. Les essais de coupe effectués avant le changement effectif en production n'ont pas révélé la possibilité d'apparition du broutage ou d'autres causes potentielles du bris répété. Pour continuer la fabrication, le manufacturier a dû réduire d'une façon significative la vitesse de coupe, réduisant la vitesse de rotation des fraises à 11060 tours

par minute, avec une perte importante de productivité.



**Figure 2-1** – Durabilité réduite des outils suite au passage au régime d’usinage à grande vitesse. À gauche répartition de la durée de vie des outils, à droite distribution en temps des bris

Dans ces conditions, notre recherche devrait :

- Trouver les causes des bris d’outils pendant l’usinage à grande vitesse des poches dans des pièces d’aluminium
- Apporter une meilleure compréhension des phénomènes d’usure des outils en carbure
- Proposer des solutions pour éviter le bris des outils ou recommander des outils améliorés, permettant un meilleur contrôle de la durée de vie utile de l’outil

Les premières observations effectuées en usine et les données collectées au début nous ont permis d’émettre les hypothèses de la recherche suivantes :

- Une géométrie erronée ou non répétitive des outils
- Défauts dans la structure du matériau de l’outil
- Des paramètres de coupe non adaptés
- Autres causes inconnues jusqu’à date.

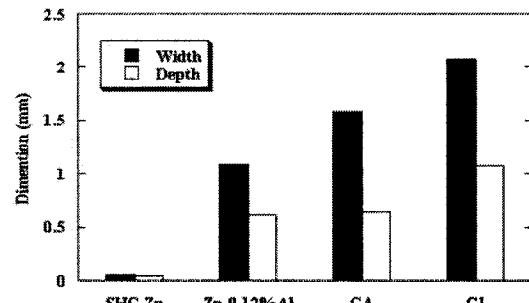
En effet, les mesures de la géométrie des outils prises ont révélé un manque d'uniformité dans les traits géométriques des outils appartenant au même lot ou au lots différents. Suite aux essais de coupe l'influence de la géométrie de l'outil a été trouvée moindre comme importance, mais l'attention a été attirée par un trait géométrique présent sur la plupart des fraises et qui est associé avec l'ébréchure du taillant dans un endroit spécifié avec une fréquence élevée. Cet aspect sera discuté un peu plus loin dans le chapitre.

En ce qui a trait avec les défauts de structure du matériau de l'outil, rien d'anormal n'a pas pu être observé en première instance. La recherche bibliographique a révélé quand même quelques aspects indiquant la possibilité d'apparition de l'usure par adhérence accélérée par le phénomène de diffusion entre le cobalt contenu dans l'outil comme liant et l'aluminium à usiner.

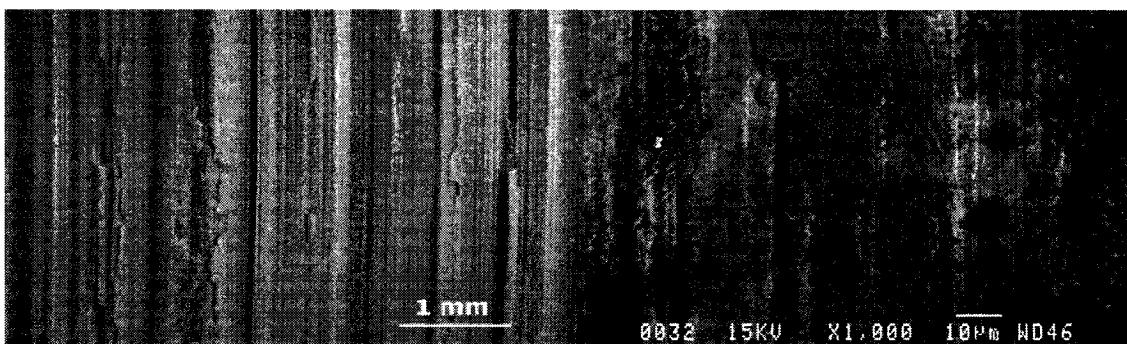
On a trouvé ainsi que pour les grandes vitesses de coupe le mécanisme d'usure prédominant est l'usure appelée d'habitude par diffusion, qui remplace l'usure par adhésion, observable surtout pour les vitesses de coupe réduites. En réalité, la diffusion par elle-même n'arrive pas à déplacer ou enlever des grandes quantités de matière (l'effet Kirkendall ne déplace que des quantités très petites de substance à travers d'une jonction commune), mais elle peut favoriser l'enlèvement de la matière par adhésion. On va donc appeler dès maintenant l'usure par adhérence accélérée par diffusion tout simplement usure par diffusion au travers de ce mémoire. L'usure par adhésion est d'une importance majeure pour les matériaux granulaires, comme c'est le cas des carbures, la forme et les dimensions des grains ainsi que l'intégrité et les caractéristiques du liant jouant un rôle très important dans le taux d'enlèvement de la matière.

Aussi, on a trouvé deux références sur une interaction entre l'aluminium contenu dans un bain de galvanisation et le cobalt présent dans des guidages en Stellite (Figure 2-2). L'effet destructif observé dans ce cas ressemble très bien aux traces laissées par l'aluminium utilisé pendant les essais de frottement qu'on a effectué (Figure 2-3).

Échant.	Composition
1	Pure (SHG) Zn
2	Zn-0.12%Al
3	Zn-0.12%Al-0.03%Fe (GA)
4	Zn-0.18%Al-0.02%Fe (GI)



**Figure 2-2** – Effet destructif de l'addition de l'aluminium dans des bains de galvanisation sur les guidages en Stellite, contenant du cobalt. Tiré de Zhang et Tang [7]

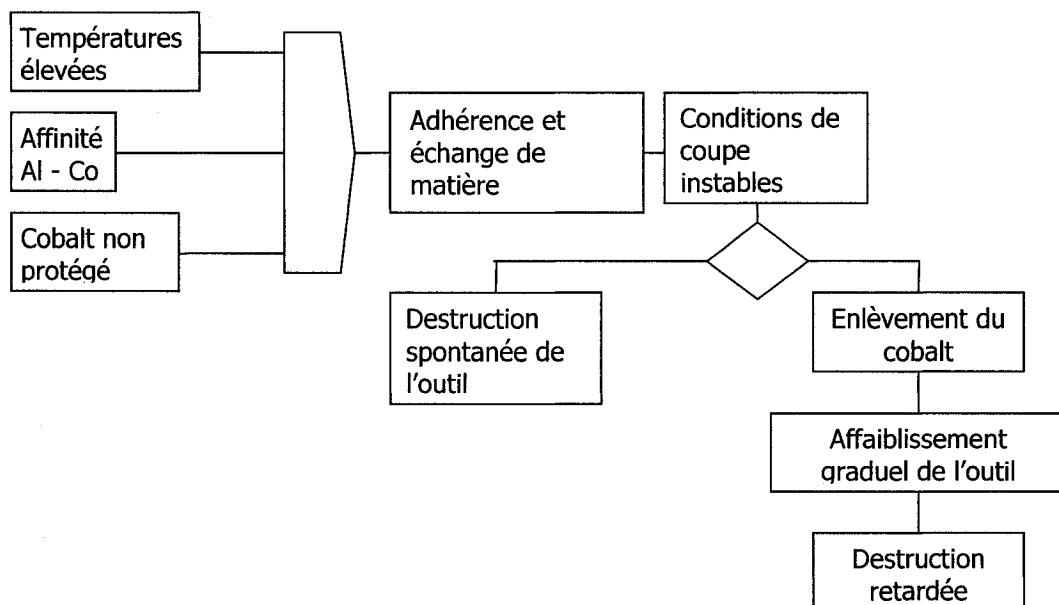


**Figure 2-3** – Apparence des traces d'usure pour les guidages en Stellite (a gauche), après Zhang et Tang [6] et microphotographie des surfaces des outils exposés à l'attaque de l'aluminium pendant les essais de frottement (à droite)

Les seules études sur l'interaction entre l'aluminium et le cobalt contenu comme liant dans les outils en carbure sont celles de Nouari (mentionnés dans l'étude bibliographique), qui parlent de la pénétration de l'aluminium dans l'outil. Un profile effectué par analyse PIXE (Particle Induced X-ray Emission) tiré du même article est présenté dans l'étude bibliographique et dans les articles.

Toutes ces références nous ont indiqué qu'il pourrait s'agir d'un mécanisme particulier d'usure causée par la diffusion de l'aluminium dans le cobalt servant de liant dans le matériau des outils, mécanisme qui est présenté sous forme de schéma dans la Figure 2-4. Comme initiateurs du processus conduisant à la défaillance on a identifié les températures élevées atteintes pendant l'UGV, l'affinité entre le cobalt et l'aluminium et la présence du cobalt non protégé sur la surface ou près de la surface des outils.

La destruction peut survenir tôt dans l'utilisation de l'outil, quand l'adhérence de l'aluminium sur la surface de l'outil sous forme d'arête rapportée (BUE – built-up edge) ou pellicule (BUL – built-up layer) peut causer des augmentations soudaines des efforts de coupe soit plus tard, quand, suite à l'enlèvement du cobalt ou à sa transformation en eutéctoïde formé de Al-Co et du cobalt, avec des propriétés nouvelles, la résistance mécanique du taillant est compromise et l'outil brise.

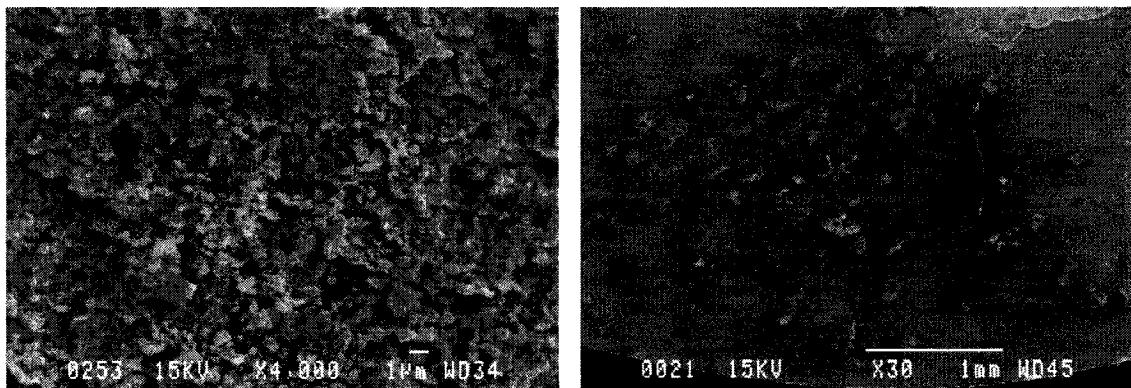


**Figure 2-4** – Mécanisme de défaillance des outils en carbures pendant l'UGV de l'aluminium

Nous pûmes démontrer, par une suite des expérimentes, que les trois conditions préliminaires à l'établissement de l'usure par diffusion sont rencontrés simultanément pendant l'usinage à grande vitesse des alliages d'aluminium, ce qui nous a permis d'avancer dans l'élucidation du mécanisme des outils et par la suite de tracer les étapes de la destruction des outils.

Pour établir l'effet de l'aluminium sur le cobalt utilisé comme liant dans le matériau des outils, on a effectué deux essais de diffusion. Le but du premier essai était de démontrer l'effet destructif de l'aluminium à haute température. L'essai a été effectué dans on four électrique, des parties d'outils étant immergés dans aluminium fondu, à 650 °C et 750 °C

pour 200 minutes, en atmosphère normale. On a constaté une destruction importante de la structure du matériau de l'outil, par la transformation du cobalt contenu comme liant. La transformation du cobalt comprend une transformation de volume à la suite de la formation de l'eutectoïde formé par le mélange d'aluminure de cobalt Al-Co, avec une densité de  $6,09 \text{ g/cm}^3$  et du cobalt, qui vient de remplacer le cobalt métallique, avec une densité de  $8,84 \text{ g/cm}^3$  pour  $\varepsilon$ -Co, à la température normale ou  $8,79 \text{ g/cm}^3$  pour  $\alpha$ -Co au dessus de  $300^\circ\text{C}$ , ce qui produit un gonflement du liant. En plus, l'aluminure de cobalt est un composé intermétallique, catégorie des produits qui sont notoirement fragiles, ce qui pourrait expliquer très bien la nature des dégâts observés pendant cet essai. Les résultats sont discutés dans l'article envoyé au journal Wear, présenté dans le chapitre 5 du mémoire.



**Figure 2-5 –** Effet de l'aluminium sur le matériau des outils à hautes températures. À gauche structure du carbure dans la couche affectée, à droite photographie de la surface de l'outil, où on observe les noyaux de cobalt attaqués

Un deuxième essai de diffusion a été effectué dans des conditions de température plus basses que le premier et avait comme but de mettre en évidence les transformations dans le matériau de l'outil et de l'aluminium en phase solide. L'essai a été effectué à des températures de  $350, 400, 450$  et  $500^\circ\text{C}$  pour 200, 400 et 600 minutes, dans un four électrique, en atmosphère d'azote. Les changements observés sont aussi présentés dans

l'article intitulé « Diffusion Wear Mechanism during High Speed Machining of 7475-T7351 Aluminum Alloy with Carbide End Mills », envoyé au journal Wear. On y trouve aussi l'explication du phénomène dans son ensemble, complétée avec d'autres observations au microscope électronique à balayage et analyses des résultats des essais métallographiques effectués en collaboration avec autres départements de l'université.

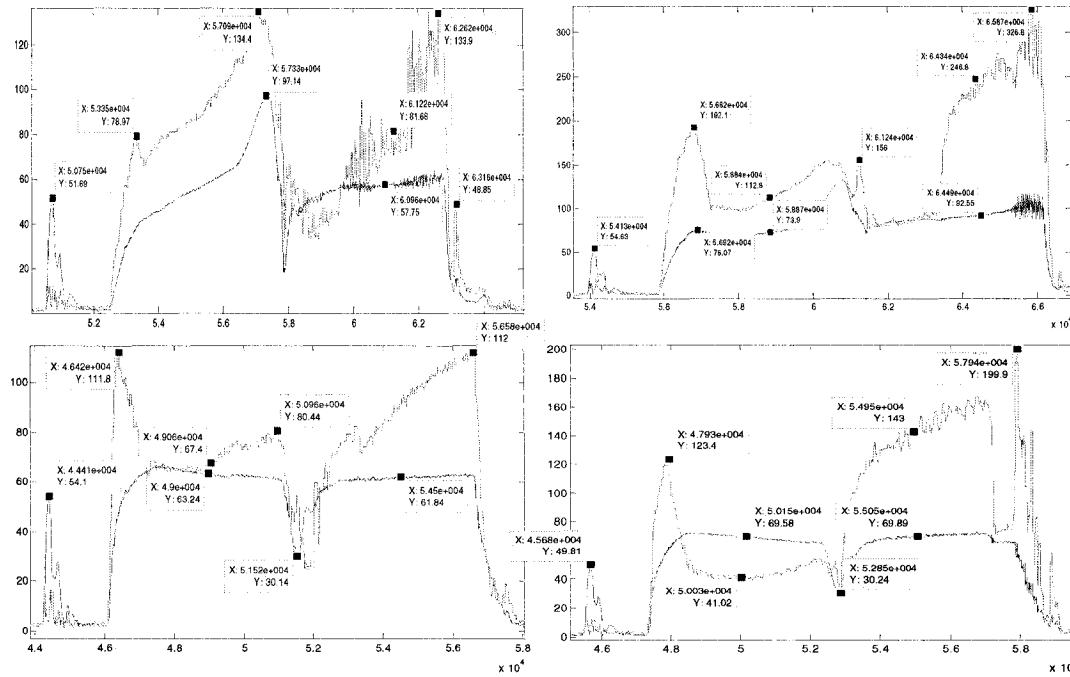
Pour se rapprocher plus des conditions réelles rencontrées pendant l'usinage à grande vitesse de l'aluminium, on a imaginé un essai de frottement, qui a été décrit dans l'article intitulé « Aspects of the Tool Wear of Carbide Tools during High Speed Machining of Aluminum Alloys ». On présente dans cet article des observations qui viennent de confirmer la théorie selon laquelle l'adhésion de l'aluminium à la surface des outils en carbure est un phénomène transitoire, qui apparaît seulement dans un domaine précis du temps d'exploitation de l'outil. Le moment de l'apparition de l'adhésion et la durée de manifestation est liée à la migration du cobalt vers la surface de l'outil et le départ de ce cobalt avec l'aluminium dans les copeaux ou dans la pièce usinée. L'apparition de ce phénomène est simulée par cet essai de frottement entre un échantillon cylindrique en carbures et une pièce en alliage 7475-T7351, poussée contre la surface cylindrique de l'échantillon jusqu'à ce que le contact entre les deux chauffe autant que pendant l'usinage, c'est à dire au dessus de 500 °C, tel que déterminé par la simulation avec le logiciel AdvantEdge de la compagnie ThirdWave. Les concentrations de cobalt sur la surface montent que, dans les premières minutes après le début de l'essai, on observe une augmentation de la concentration du cobalt visible à la surface de l'échantillon, accompagnée par une forte adhésion de l'aluminium à la surface de l'outil. Après 20 minutes cette concentration diminue de moitié, quand l'aluminium cesse d'adhérer à la surface de l'outil aussi. L'essai a permis de mettre en évidence ce phénomène même pour une température moyenne dans la proximité du contact de 425 °C. À cette température la barre en aluminium est devenue assez molle pour se déformer et on a dû limiter la pression, ayant comme effet la limitation de la température. Une photographie en infrarouge est présentée dans la Figure 2-6. Les températures ont été

mesurées sur le bout de l'échantillon, avec l'application des corrections de l'émissivité pour le matériau et pour l'état de surface de l'échantillon. Notre expérimente a simulé une régime de coupe très agressif, ce qui a fait que l'apparition de l'usure se produise très vite.



**Figure 2-6** – Températures pendant l'essai de frottement

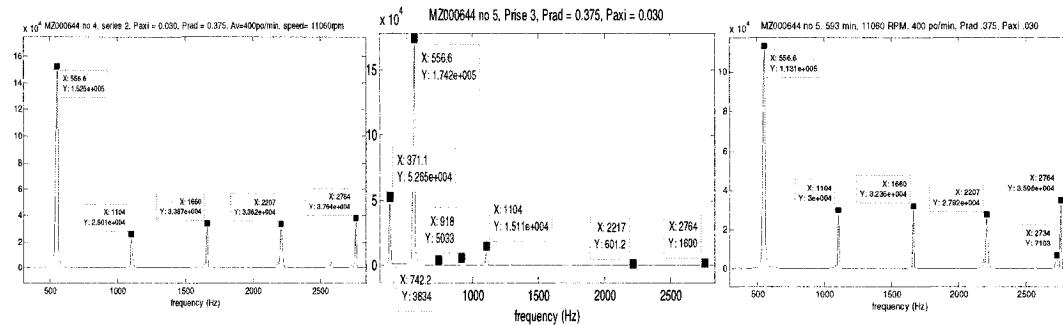
Dans le même article on discute les observations faites sur les essais de coupe, qui ont constitué le quatrième expérimente pour mettre en évidence ce type particulier d'usure. Le constat le plus important est que les forces de coupe présentent des importantes anomalies autour de 400 minutes d'usinage, une des quatre outils essayés étant détruite peu après cet intervalle de temps. Les anomalies constatées après 400 minutes d'usinage se présentent comme dans la Figure 2-7 et ont comme explication la forte adhésion à la surface de l'outil de l'aluminium. On observe l'augmentation périodique de la composante dynamique superposée à la résultante des forces de coupe. Parfois cette augmentation a une tendance d'augmenter aussi la force moyenne, mais ce n'est pas le cas dans toutes les situations. Une comparaison entre les forces de coupe pour un même outil dans des conditions similaires pour 0, 200, 400 et 600 minutes est présentée dans cet article. Il est donc évident que des paramètres de coupe plus intensifs influencent la vitesse et l'intensité avec laquelle l'usure va se manifester.



**Figure 2-7** – Anomalies des efforts de coupe observés pendant plusieurs essais de coupe après 400 minutes d’usinage.

L’effet a été mis en évidence utilisant un code Matlab personnel, la méthodologie utilisée pour l’acquisition et l’analyse des données étant présenté dans l’article ”Method for Analyzing the Effects of Aluminum Build-Up on Tungsten Carbide Tools Behavior”. On observe ainsi que l’information la plus utile pour l’analyse du comportement des outils qui pourrait expliquer le bris hâtif est recueillie de la composante variable (appelée aussi « dynamique » dans la littérature) et que l’enveloppe de ce signal présente des anomalies autour de 400 minutes d’utilisation, pour se stabiliser après. Le bris d’un outil peu après le constat des altérations dans le comportement de l’outil confirme que le point qui sépare le bris accéléré de l’outil du bris normal est relié à la formation de la couche d’aluminium sur la surface de l’outil, avec comme conséquence un régime de coupe instable, qui peut briser le taillant de l’outil sans avertissement. La formation d’une couche plastique d’aluminium sur la surface des outils est mise en évidence par l’absorption des harmoniques supérieures de la fréquence du passage des taillants des

outils (Figure 2-8, au milieu). Ce comportement a été reproduit pour d'autres essais, effectués dans autres conditions de coupe.



**Figure 2-8** – Diagrammes FFT des efforts de coupe pour 200, 400 et 600 minutes. Le signal a été prélevé dans les mêmes conditions pour les 3 essais

À part des ces quatre expérimentations pour mettre en évidence l'usure catastrophique induite par la diffusion de l'aluminium dans le cobalt, le mémoire propose quelques solutions pour palier ce problème. On a proposé un outil légèrement modifié, pour éliminer l'échauffement excessif qui était à l'origine des ébréchures du taillant dans un endroit spécifique. On a effectué des essais avec des outils recouverts de carbone similaire au diamant (DLC – Diamond-Like Carbon). On a démontré que, même si ce revêtement n'était pas parfait (un recouvrement DLC de bonne qualité est encore problématique, surtout à cause de la graphitisation du diamant déposé sur les taches de cobalt), il diminue l'apparition des ébréchures de moitié après 200 minutes d'usinage.

Une des hypothèses de recherche originales ne se vérifie pas, l'effet du manque d'uniformité dans la fabrication des outils n'ayant qu'une influence marginale sur les efforts de coupe. Quand même, une fabrication plus soignée de cette famille d'outils ajoutant les modifications proposées pourrait améliorer le nombre d'ébréchures sur le bout des outils, avec des influences positives sur la qualité de la surface usinée.

## **Chapitre 3 – Revue critique de la littérature**

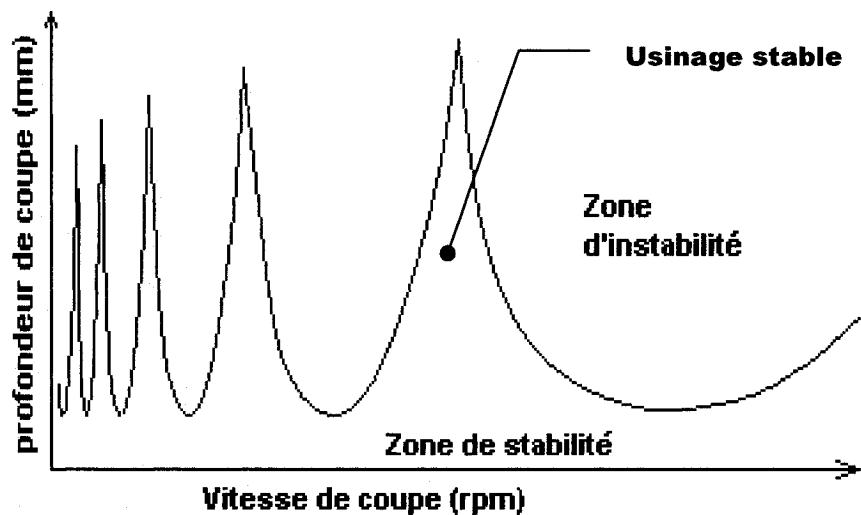
### ***3.1 Introduction***

Les alliages d'aluminium sont utilisés à grande échelle dans les industries telles que l'aéronautique et de l'automobile, pour leurs nombreuses qualités : légèreté, facilité à usiner, bonne résistance à la corrosion. L'industrie aéronautique en utilise beaucoup pour réaliser des structures monolithiques de type gaufre, en enlevant par fraisage à grande vitesse le surplus de matériau. L'aluminium aéronautique est un matériau ductile, qui permet l'usinage à de très haut taux d'enlèvement, parce que sa puissance spécifique est faible à environ  $0,75 \text{ W}/(\text{mm}^3)$  [2]. Sa conductibilité thermique étant très bonne ( $140 \text{ N/sec} \cdot ^\circ\text{C}$ ), beaucoup de la chaleur dégagée est enlevée de la zone de coupe par les copeaux. La température de fusion des alliages d'aluminium est basse, aux alentours de  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ . Cette température est parfois atteinte pendant l'usinage, avec des conséquences pour l'énergie requise pour l'usinage. Rao et Shin [63] ont observé pendant l'usinage à grande vitesse de l'alliage 7075-T6 un effort de cisaillement dans la plage de 250 à 300 MPa, la moitié de ce qu'on peut observer normalement à froid pour ce matériau (500 à 550 MPa). Toutes ces caractéristiques rendent l'usinage des alliages d'aluminium à grande vitesse très efficace.

Suite aux recherches récentes, il y a quelques tendances qui se dégagent pour l'amélioration des performances de l'usinage à grande vitesse de l'aluminium. L'aluminium offrant peu de résistance à la coupe par rapport aux autres groupes des matériaux, la

croissance de rendements du processus a été envisagée, surtout dans l'aéronautique. Cette augmentation des rendements a été possible par la maîtrise des vibrations, en utilisant des techniques des lobes de stabilité [20]. Il est possible d'éviter ainsi le broutage pour des vitesses de coupe et profondeurs de coupe plus grandes, ce qui vient améliorer le coefficient d'utilisation des machines. Avec le rendement plus élevé il est désormais économique d'enlever plus de matériau et de simplifier la forme des bruts, les nouvelles générations de machines étant conçues pour des vitesses plus élevées aussi. Jusqu'à 70 % du matériau peut être enlevé du brut pour obtenir une pièce aux formes complexes.

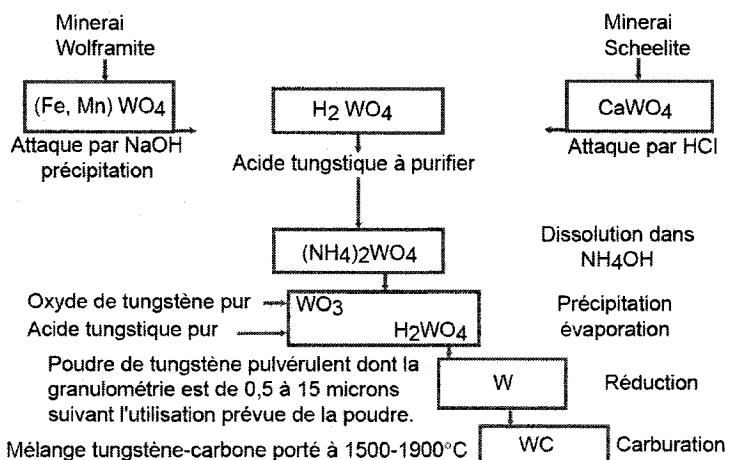
Grâce aux propriétés physico-mécaniques des alliages d'aluminium, dans la plupart des cas les limites imposées par le broutage sont atteintes avant les limites de puissance disponible [2]. La plupart des machines n'arrivent pas à utiliser pleinement leur puissance pour usiner l'aluminium à moins qu'on réussisse à se placer entre les lobes de stabilité comme à la Figure 3-1.



**Figure 3-1 – Diagramme typique des lobes de stabilité**

### 3.2 Fabrication des carbures de tungstène

Le tungstène ou le wolfram, tel qu'il est dénommé parfois est un métal pesant (d'où son nom suédois, tung-sten – métal pesant), couleur argent et luisant. Il présente la plus haute température de fusion des métaux, à 3410 °C et un point d'ébullition de 5660 °C, ce qui le fait idéal pour la fabrication des filaments des ampoules à incandescence. Il a été remarqué au XVII<sup>ème</sup> siècle par son affinité envers l'étain, ce qui lui a valu son nom d'origine allemande (wolfram – bave de loup). La production annuelle de tungstène est d'environ 40 000 tonnes et les réserves mondiales sont évaluées à 5 millions tonnes, avec une récupération de 30 %.



**Figure 3-2 -** Élaboration des carbures de tungstène WC (après une documentation électronique de la compagnie Safety, France)

En industrie les carbures de tungstène sont largement utilisés pour la fabrication des outils. Le tungstène est obtenu à partir de deux minéraux, le wolframite  $(Fe, Mn)WO_4$  et le Scheelite  $CaWO_4$  (baptisé en honneur du chimiste suédois Scheele qui a isolé le premier le  $WO_3$  - le trioxyde de tungstène). Figure 3-2 présente le procédé industriel d'élaboration des carbures de tungstène. L'acide tungstique  $H_2WO_4$  est purifié ensuite et, après la réduction à poudre de tungstène et la carburation de celle-là, on obtient les

carbures de tungstène. Des différentes procédés technologiques permettent l'obtention des carbures si petites que 0,1 µm.

**Tableau 3-1 – Influence des principaux additifs ajoutés aux carbures de tungstène**

Élément	Influence	
	Augmente ▲	Diminue ▼
<b>Cobalt</b> <b>Co</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La résistance à la flexion</li> <li>• La résistance aux chocs mécaniques</li> <li>• Le coefficient de dilatation thermique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La dureté</li> <li>• La résistance à l'abrasion</li> <li>• La résistance à la cratérisation</li> <li>• La résistance à la déformation plastique</li> <li>• Le coefficient de conductivité thermique</li> <li>• Le module d'élasticité</li> </ul>
<b>Carbure de titane</b> <b>TiC</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La résistance à l'oxydation à température élevée</li> <li>• La résistance à la cratérisation</li> <li>• La résistance à la déformation plastique</li> <li>• Le coefficient de dilatation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La résistance à la flexion</li> <li>• La conductibilité thermique</li> <li>• Le module d'élasticité</li> </ul>
<b>Carbure de tantale</b> <b>TaC</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La résistance à l'oxydation</li> <li>• La résistance aux chocs thermiques</li> <li>• La résistance à la déformation plastique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La résistance à la flexion</li> <li>• La résistance aux chocs mécaniques</li> <li>• L'usure en dépouille</li> </ul>

Les cristaux de carbure avec la granulation désirée sont ensuite broyés et mélangés avec du cobalt en poudre, en proportion de 5 % à 20 % et avec d'autres additifs (comme les carbures de titane, de tantale ou de niobium, de l'alcool et un plastifiant comme la paraffine ou le p.e.g. dans un malaxeur à billes), pour 20 à 50 heures. Plus on ajoute du cobalt, plus on augmente la ténacité des carbures, mais la résistance à l'usure diminue.

Le Tableau 3-1 présente l'influence des principaux éléments ajoutés à la mixture des carbures. En rouge sont présentés les influences défavorables, dont il faut tenir compte quand on choisit une composition pour la fabrication des outils.

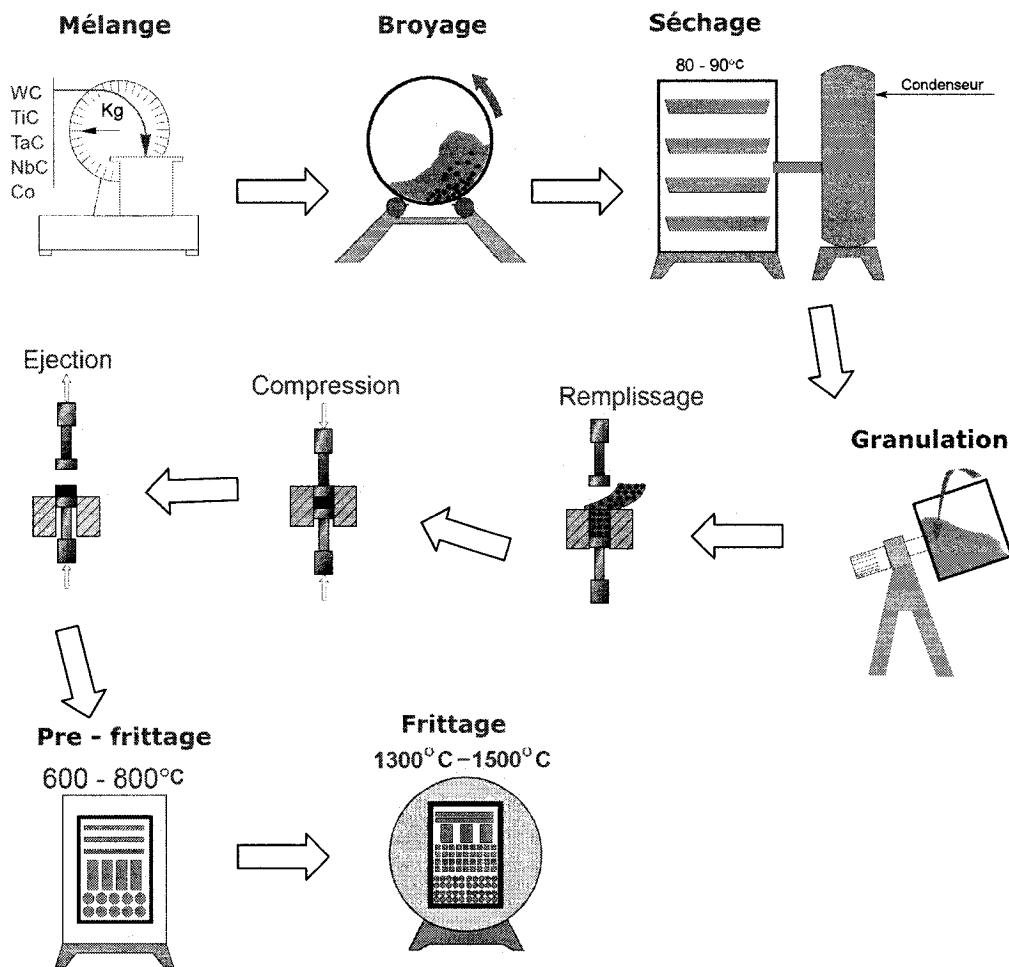


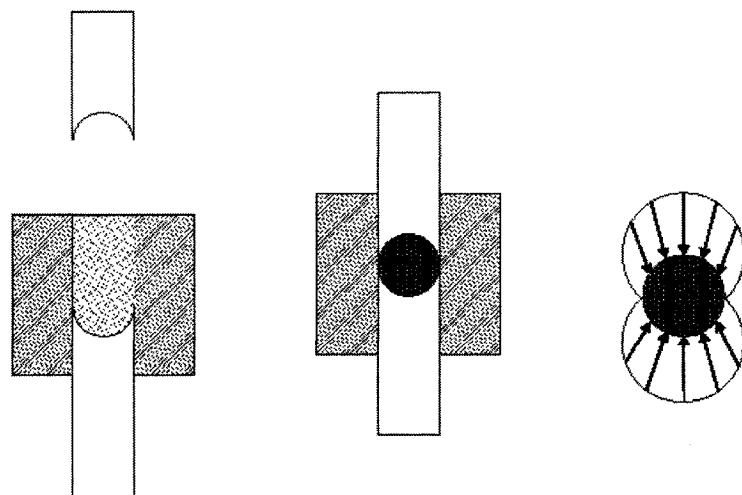
Figure 3-3 – Fabrication des pièces en carbures de tungstène

Après le broyage, la composition est séchée pour récupérer l'alcool utilisé et ensuite elle est granulée pour améliorer ses qualités (fluidité, granulométrie) en vue du pressage. En fonction du type des pièces qu'on désire à fabriquer, certaines variantes du processus de pressage sont possibles. On ajoute un plastifiant pour que les produits gardent leur forme entre le pressage et le frittage. Pendant le frittage qui se fait pendant plusieurs heures à des températures qui peuvent atteindre 1500 °C, le cobalt se plastifie et fond à 1495 °C,

fixant ainsi les grains de carbure. En Figure 3-3 sont présentés les principales étapes du cycle de fabrication des outils en carbures.

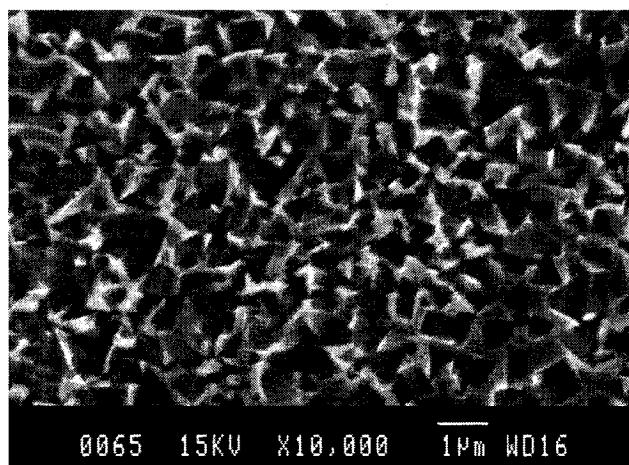
La fabrication des outils ou des plaquettes en carbure peut continuer avec d'autres opérations, comme le pressage isostatique à chaud (HIP), pour éliminer la porosité, surtout celle de surface, une rectification pour mieux contrôler la qualité des taillants et l'application optionnelle d'un revêtement. Pour les pièces pour lesquelles l'usinage par rectification à partir des bruts de forme régulière n'est pas convenable et la forme est trop complexe pour un pressage de qualité, on recourt à l'usinage entre le pressage et le frittage. Dans ce cas, les plastifiants doivent être éliminés par un frittage à 1500 °C.

Les pièces en forme de barre, qui sont utilisés pour la fabrication des outils de forme cylindrique, comme les forets et les fraises cylindriques, sont le plus souvent fabriqués par pressage tel que présenté dans Figure 3-4, ce qui résulte dans une application non uniforme de la pression sur la circonférence de la barre. L'application non uniforme de la pression accompagnée par des non uniformités dans la répartition du cobalt et possiblement du plastifiant dans le volume de la pièce sont à l'origine des manques d'uniformité dans la structure du matériau mises en évidence dans notre étude.

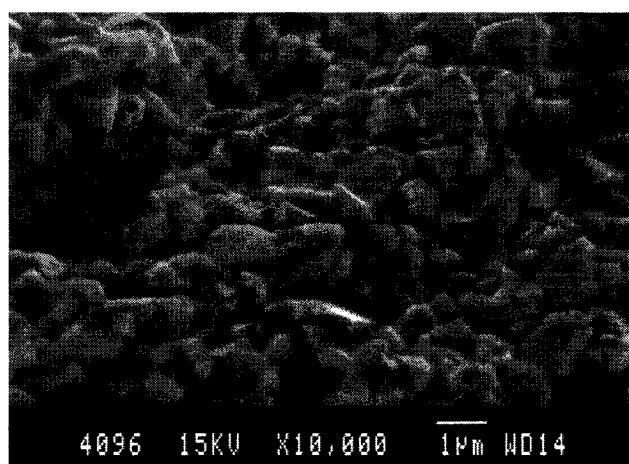


**Figure 3-4 – Pressage des pièces en forme de barre**

Suite au frittage, le cobalt se répandit parmi les grains de carbure en les fixant. L'image de cette matrice de cobalt relevée après l'attaque au réactif Murakami, qui dissout les carbures est présentée dans la Figure 3-5. On y voit les places occupées auparavant par les grains de carbure de tungstène, qui ont été dissoutes. Par contre, dans la Figure 3-6 on voit la disposition des grains de carbure de tungstène. La photographie a été prise au microscope électronique à balayage sur un échantillon sur lequel l'aluminium a enlevé le cobalt et qui a été nettoyé après avec un produit qui dissout l'aluminium. On observe l'aspect des grains de carbures empilés comme les cailloux.



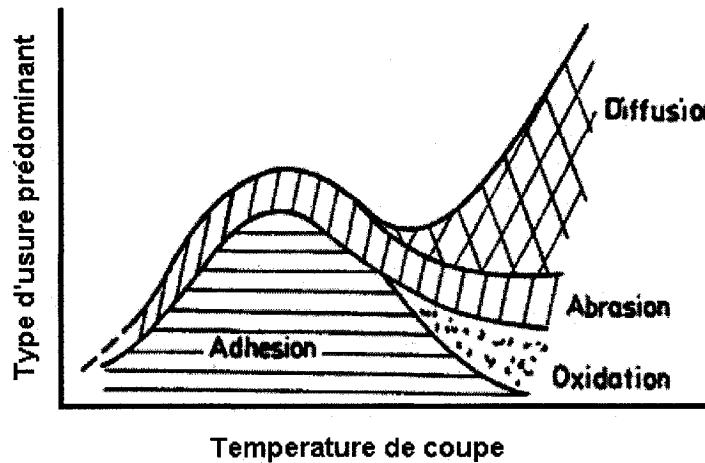
**Figure 3-5 – La matrice du cobalt**



**Figure 3-6 – Grains de carbures de tungstène après le frittage**

### 3.3 Phénomènes d'usure des outils pendant l'usinage de l'aluminium

Le mécanisme d'usure dominant change en fonction de la vitesse de coupe et du revêtement utilisé [8]. Les chercheurs d'ENSAM expliquent la destruction de l'outil par gripage par l'usure par diffusion [11] surtout en tenant compte du mécanisme d'adhésion de l'aluminium à l'outil. Ils constatent ainsi que pour contrôler le perçage de l'aluminium, il est nécessaire de limiter d'abord la génération de chaleur qui conduit à l'activation du processus de diffusion de l'aluminium et le cobalt dans l'outil et favoriser l'évacuation des copeaux de la zone de travail. Le réchauffement de l'outil dépend de sa géométrie, des conditions de coupe et du frottement entre le copeau et l'outil, qui est affecté à son tour par les conditions de coupe, par la température et par la nature des surfaces en contact. L'amélioration de la géométrie de l'outil ainsi que l'application d'un revêtement permettent une diminution de la température sur la face de coupe [10]. Une combinaison appropriée de conditions de coupe et de géométrie d'outil permet d'améliorer la stabilité du processus de perçage et le dégagement d'un copeau continu.



**Figure 3-7 – Types d'usure prédominants en fonction de la température (Hastings, 1976)**

La température générée par le frottement et la déformation plastique dans la zone de cisaillement secondaire contrôle le mécanisme prédominant d'usure de l'outil. Pour l'usinage à grande vitesse, avec l'augmentation de la température, l'usure par abrasion

et/ou par adhésion est remplacée par l'usure par diffusion. La Figure 3-7, qui provient d'un ouvrage de Hastings de 1976, citée par Schmidt et Yen [46] montre que dans le domaine des hautes températures, les mécanismes d'usure prédominants sont la diffusion et l'oxydation. Pour les usinages où la température de coupe est basse, l'adhésion domine comme mécanisme. L'usure par abrasion est plutôt constante pour tous les domaines de températures.

### 3.3.1 Usure par abrasion

L'usure par abrasion survient quand les conditions du contact entre l'outil et le copeau favorisent le glissement. Elle consiste en l'enlèvement mécanique du matériau de l'outil. L'usure par abrasion ne dépend pas grandement de la température des surfaces de l'outil et du copeau en contact, car elle est causée principalement par les composantes dures de l'alliage à usiner, par exemple par les renforts dans les matériaux composites. Cette forme d'usure est la plus commune pour l'usinage conventionnel, formant un cratère sur la face de coupe et une facette sur la face de dépouille, qui talonne la surface usinée.

L'utilisation des carbures avec des grains très fins pourrait réduire le développement de l'usure par abrasion. La plupart des fabricants d'outils utilisent encore des carbures bon marché avec des grains des carbures de tungstène d'environ un micromètre et des concentrations de cobalt entre 6 et 12 %. Suite au progrès dans la fabrication des carbures, il est possible maintenant d'obtenir couramment des grains de 0,2 à 0,5  $\mu\text{m}$  [43] et même des grains encore plus petits de 0,1  $\mu\text{m}$ . Les fabricants utilisent aussi pour ce genre de carbure plus de cobalt que d'habitude, allant jusqu'à 16%, sans que cela laisse le cobalt vulnérable à l'attaque de l'aluminium. De plus, les outils confectionnés avec ce genre de carbure sont plus tenaces à cause du supplément de cobalt. En utilisant des grains plus petits, il est possible de mieux compacter les grains à la surface ainsi que dans le volume, laissant ainsi moins de cobalt exposé. Aussi, comme le mécanisme d'usure principal est l'arrachement des grains de carbure suite à l'adhésion de l'aluminium à la surface de l'outil, l'utilisation des grains plus petits empêche ce

phénomène de se produire, parce que les grains plus petits sont plus difficiles à arracher. Une étude récente de Friedrichs [43] compare la ténacité et la dureté des carbures fins à celles des carbures réguliers, montre que les deux paramètres sont améliorés avec la diminution de la taille des grains et avec l'augmentation du contenu en cobalt.

Un aspect très important est l'uniformité de la distribution du cobalt entre les grains de carbure. Pour les carbures avec des grains très fins, les grains de cobalt sont aussi très petits et le mélange est plus uniforme. Une analyse fractographique permet d'avoir une information assez précise de la qualité du carbure utilisé dans la fabrication des outils.

### 3.3.2 Usure par adhésion

Une forme particulière d'usure se produit pour certaines combinaisons de matériaux d'outil et de la pièce usinée, lorsque des restes adhérents du copeau se détachent ensemble avec des particules du matériau de l'outil auxquels ils ont collés. On signale alors [8] la formation d'arêtes rapportées et donc de mécanismes d'usure par adhésion.

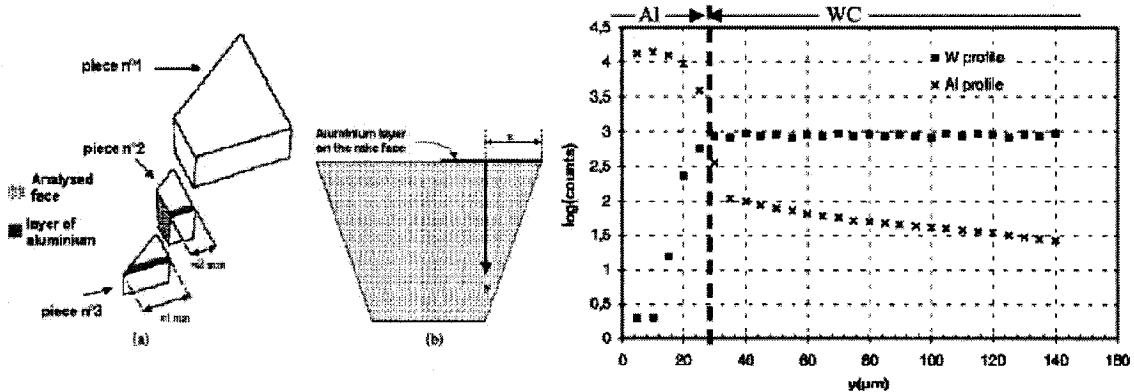
Plusieurs compagnies offrent des outils pour la coupe d'aluminium avec un fini miroir, indiquant que cette finition empêche l'adhérence de l'aluminium à la surface de l'outil. Les essais effectués dans le cadre de ce mémoire ont montré que par la réorientation des grains de carbure et par l'enlèvement du cobalt excédentaire, il est possible de diminuer de moitié la densité du cobalt exposé à la surface de l'outil. Cette diminution limite la possibilité de l'aluminium de se combiner avec le cobalt pour amorcer le processus d'adhérence de l'aluminium à la surface de l'outil et l'usure qui y est associée.

L'usure par adhésion peut se manifester à des températures plus élevées, étant favorisée par la diffusion, surtout pour des matériaux granulaires, comme c'est le cas des carbures, sous la forme de l'arrachement des grains de carbure par le matériau usiné, qui diffuse dans les composantes du matériau de l'outil, en les arrachant.

### 3.3.3 Usure par diffusion

Le mécanisme principal d'usure pendant l'usinage à grande vitesse – UGV des alliages d'aluminium est l'usure par diffusion. Comme déjà mentionné, il s'agit en effet de l'usure par adhérence favorisée par la diffusion de l'aluminium dans le cobalt et la formation de l'eutectoïde contenant du cobalt ( $\epsilon$ -Co à la température ambiante et  $\alpha$ -Co à des températures de plus de 422 °C) et d'aluminure de cobalt. Cette diffusion est causée par l'affinité de l'aluminium envers le cobalt, observée par plusieurs chercheurs, soit pendant l'usinage de l'aluminium avec des outils contenant du cobalt [8], [10] et [11] où tout simplement quand des alliages pour outils contenant du cobalt même en faible concentration entrent en contact avec l'aluminium [6], [7]. Pour des raisons de cohérence avec les références bibliographiques citées on va utiliser le terme d'usure par diffusion pour ce genre particulier d'usure par adhésion.

L'usure par diffusion survient quand les conditions rencontrées (pression, température, manque de lubrifiant) permettent la migration des atomes de l'outil vers le copeau et l'inverse. Ce mécanisme est prédominant pour l'usinage à grande vitesse. Avec l'augmentation de la température sur la face de coupe le mécanisme de diffusion de l'aluminium est activé. Des traces d'aluminium ont été retrouvées jusqu'à 80  $\mu\text{m}$  de profondeur dans l'outil comme dans la Figure 3-8 tirée de [8]. Girot et Géhin [10] mentionnent que l'aluminium diffuse significativement dans le cobalt dès 300°C pour former le mélange de eutectoïde et de cobalt, ce qui amorce l'adhérence de l'aluminium à la surface des outils. Ce processus est favorisé par une grande zone de contact entre le copeau et la face de coupe. Nouari et al. [8] notent que les grains de carbure de tungstène ne sont pas déformés, ce qui montre qu'il n'y a que très peu d'usure par abrasion dans le domaine des grandes vitesses. On a pu confirmer cette assertion par microscopie électronique, pour les essais de coupe qu'on a effectués.



**Figure 3-8** – Résultats de l’analyse PIXE sur la pénétration de l’aluminium dans les outils en carbure. Après Nouari et al. [7]

L’adhésion de l’aluminium à la surface de l’outil [8], [11], [17] s’installe très vite, avec la formation d’une couche adhérente (BUL, built-up layer) accompagnée d’une arête rapportée (BUE, built-up edge) parfois. La formation de la couche adhérente est due à la pression élevée dans la zone secondaire de déformation, dans une zone où se produit d’habitude un grippage du copeau et on y constate une forte déformation de la structure du matériau usiné. Dans notre cas, ce grippage est favorisé par l’affinité de l’aluminium envers le cobalt, qui tend de créer une liaison entre les deux matériaux. Un revêtement approprié aux outils peut empêcher efficacement cette adhérence [10].

Le Northwest Research Institute de Tacoma indique dans un article affiché sur leur site [56] que parfois ce qui apparaît comme de l’usure par abrasion pour les outils en carbure est en effet l’effet de l’arrachement des grains de carbure du matériau de l’outil, suite à la fatigue du cobalt utilisé comme liant, causée par les variations répétées des forces de coupe et à la diffusion survenant entre le matériau usiné et celui de l’outil. L’utilisation de grains plus petits rend l’arrachement moins probable et laisse le cobalt moins exposé. À part de l’adhésion de l’aluminium à la surface ouverte contenant du cobalt et de la diffusion des deux métaux, une autre forme d’erosion du cobalt est provoquée par l’acidité du liquide de refroidissement ou du matériau à couper [56].

La migration des particules entre le matériau de l'outil et le matériau usiné est connue depuis quelque temps pour l'usinage des aciers avec des outils en carbures contenant du cobalt, le cobalt ayant aussi une affinité pour le fer [8]. Un phénomène similaire de migration des particules se produit en phase solide entre différents métaux, phénomène qui est connu sur le nom d'effet Kirkendall [60]. Ce phénomène est observable entre les métaux du groupe du fer, cobalt inclus, et l'aluminium solide [61].

### 3.3.4 Ébréchure des taillants

L'apparition des fissures (cracking) et des ébréchures (chipping) sur le taillant des outils peut avoir des causes diverses et représente peut être une des plus importantes formes d'usure des outils en carbures pendant l'usinage des matériaux comme l'aluminium. En effet, l'usure produite par abrasion est presque négligeable, mais on a observé pendant notre étude des ébréchures systématiques ou aléatoires des taillants des outils utilisés. Cette forme d'usure conduit le plus souvent à l'enlèvement de l'outil de la ligne de fabrication dès qu'elle a été observée, même si des outils avec des petites ébréchures ont été maintenues en fabrication pour des centaines des minutes sans casser complètement.

Les causes qui conduisent à ces phénomènes ont été étudiées par Tlusty et Masood [1]. Le mécanisme de début et de propagation des fissures pour les matériaux friables comme les carbures, a été aussi étudié par Shaw, Takagi et Avery [3], [4]. Masuda, Kuroshima et Chujo [5] discutent du point de vue de la théorie de la fracture fragile l'usinage des matériaux plastiques renforcés à fibres de carbone avec des outils en carbure de tungstène et cobalt. Ils trouvent que l'usure des outils décroît avec l'augmentation de la dimension des grains de carbure, même si cela entraîne une décroissance de la dureté de l'outil. Aussi, une diminution du contenu de cobalt va entraîner une réduction de l'usure. Il faut quand même tenir compte du fait que pour le matériau usiné pendant ces tests, le problème de l'affinité chimique entre cobalt et aluminium n'existe pas. Dans le cas de l'usinage des matériaux renforcés avec des fibres de carbone, ils concluent que l'usure provient surtout de la perte des grains de carbure, le processus

étant bien expliqué par la probabilité de la fracture fragile.

Ramarj [21] discute des causes possibles de bris des outils en carbure de tungstène, montrant qu'un très peu nombre d'ébréchures sont produites pendant l'usinage stable ou à l'entrée de l'outil en contact avec la pièce usinée, mais qu'il y a une proportion assez élevée d'ébréchures qui apparaissent au moment de la sortie de l'outil du contact. Cette situation est causée probablement par l'arrachement de particules du matériau de l'outil au moment où les forces de coupe subissent un changement de direction. D'autres causes possibles seraient le mécanisme de formation et d'enlèvement de la bavure à la sortie de l'outil de l'engagement, avec l'apparition des forces négatives, qui arrachent les grains de carbure.

Une solution pour éviter la migration du cobalt vers la surface de l'outil est l'utilisation de la technologie HIP (Hot Isostatic Pressing). La technologie HIP consiste à exposer les bruts d'outils pendant leur fabrication à des pressions et températures élevées [43], typiquement entre 100 et 200 MPa, dans un gaz inerte, d'habitude l'argon. La température est déterminée par les matériaux utilisés, pour les carbures étant dans l'intervalle de 800 °C à 1330 °C. Une variante de ce procédé consiste en l'extrusion du brut d'outil au lieu du pressage unidirectionnel, ce qui vient uniformiser la pression sur la circonférence du brut. Cette uniformisation est très importante pour la qualité des parties situées à l'extérieur de l'outil, tel que les arêtes des fraises cylindriques et des forêts qui sont fabriqués d'un brut ayant presque le diamètre final de l'outil. Une autre variante du procédé consiste en l'utilisation d'une sorte d'enveloppe qui entoure le brut avant l'exposition à haute pression et qui fusionne avec le brut, en ajoutant une couche avec des propriétés modifiées.

Des études montrent que l'utilisation du procédé HIP augmente la résistance à la flexion et la ténacité des outils, qui sont désormais capables de supporter plus de chocs. La haute pression appliquée est aussi susceptible diminuer le nombre de cavités où le cobalt peut

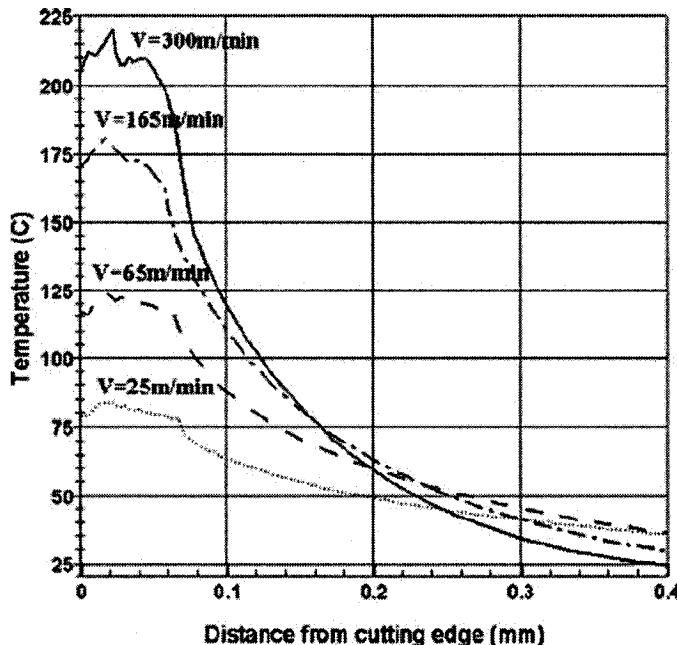
s'accumuler en noyaux pendant le pressage, uniformisant aussi la structure du matériau.

### 3.3.5 Influence de l'échauffement de l'outil et de la pièce sur l'usure

Pendant l'usinage de l'aluminium, l'échauffement de la pièce est un facteur non négligeable, à cause du fait que l'aluminium présente une température de fusion assez basse. De plus, l'usinage à grande vitesse a des particularités différentes du point de vue de la dynamique des processus thermiques. Les températures de coupe élevées influencent fortement le type d'usure des outils, la durée de vie utile de l'outil, l'intégrité de la surface usinée, le mécanisme de formation des copeaux et même la déformation thermique de l'outil [13]. Pendant l'usinage à grande vitesse, la vitesse de coupe influence fortement la température dans la zone de coupe et le mécanisme de transfert de chaleur, car, avec la croissance de la vitesse, le processus de coupe devient adiabatique. La chaleur générée pendant la déformation plastique ne peut pas être transférée si vite en dehors de cette zone, étant évacuée essentiellement avec le copeau. Abuksim et al. [13] font une analyse critique des méthodes utilisées couramment pour modéliser ou pour mesurer les phénomènes thermiques dans la zone de coupe. Ainsi, ils citent des sources ayant indiqué qu'en fonction de la vitesse de coupe, entre 17 % et 50 % (pour moindres vitesses de coupe) de la chaleur dégagée dans la zone de cisaillement primaire entre dans la pièce, touchant le taillant. La principale source de chaleur qui réchauffe l'outil reste le frottement dans la zone de cisaillement secondaire, située à la limite entre la face de coupe de l'outil et le copeau. La distribution de la température le long de la face de coupe n'est pas uniforme, présentant un maximum situé sur la partie où le copeau adhère à l'outil, zone où le copeau se déforme fortement, avant de commencer à glisser sur la face de coupe de l'outil. L'usure de l'outil peut modifier amplement les conditions de coupe et les températures dans la zone de coupe.

La Figure 3-9, tirée de Nouari et al. [8] présente la température calculée pour différentes vitesses de coupe. Il faut remarquer que la vitesse de coupe pendant nos essais de coupe était de 662 m/min, plus que le double de la vitesse maximale utilisée par les auteurs. Ils

trouvent que le mécanisme principal d'usure pour des outils en WC-Co sur des pièces en alliages d'aluminium est l'usure par diffusion, favorisée par la température accrue.



**Figure 3-9** – Distribution de la température calculée le long de la face de coupe pour le perçage à sec d'une pièce en aluminium AA2024 T351 avec un outil en WC-Co. Avance = 0,4 mm/rot. Après Nouari et al. [8].

Pour surveiller la température du taillant Olson et al. [29] proposent une approche différente, celle de calculer la température du contact outil–copeau par solution inverse, c'est-à-dire partant de la température et le flux thermique mesurés à l'aide de quatre capteurs placés sous une plaque en carbure de 3 mm d'épaisseur pendant le tournage. Les erreurs d'estimation se situent entre 11°C et 40 °C par rapport aux modèles directes.

En conclusion, la précision et le degré de confiance des modèles de calcul de la température pendant l'usinage à grande vitesse sont fortement contestées parce que les lois de frottement à l'intérieur du matériau ne sont pas bien connues. Il n'existe pas un système de certification de la validité des modèles proposés, autre que les déterminations expérimentales, ce qui pour le moment n'est pas possible dans tous les cas. Si pour l'analyse par éléments finis bidimensionnels les résultats sont conciliables, l'analyse de

la température pour une coupe avec un outil tridimensionnel, ou à hautes températures est encore problématique. Même s'il y a des propositions des modèles de calcul de la température dans la zone de coupe très intéressantes, il reste difficile à vérifier si les valeurs ainsi calculées reflètent la réalité.

### ***3.4 Modélisation des phénomènes de coupe pour l'usinage à grande vitesse de l'aluminium***

Un modèle de la variation de section du copeau pour un taillant qui présente un arrondi de coin entre deux taillants rectilinéaires (semblable aux outils couvertes par notre étude) est proposé par Ozdoganlar et Endres [35]. Ils développent ce modèle pour usiner avec des avances radiales et axiales superposés, situation qu'on retrouve dans la stratégie d'engagement en pente pendant l'usinage des poches à Bombardier. Ils arrivent à donner une valeur plus exacte à la section du copeau, calculée d'une manière plus générale.

Troy Marusich, le scientifique derrière le logiciel AdvantEdge a traité dans sa thèse de doctorat [44] les aspects spécifiques de l'usinage à grande vitesse, réalisant des modélisations mieux adaptées. Un modèle du processus de cisaillement pour les alliages d'aluminium a été élaboré par Khadke et al. [55], étant utile aussi pour la modélisation des phénomènes de glissement du copeau. Leur conclusion est que de tous les modèles étudiés, le modèle de la défaillance par cisaillement prédit mieux le comportement pendant le glissement du copeau.

Schmidt et Yen [46] modélisent les phénomènes d'usure des outils en carbure et les altérations de la géométrie des plaquettes, surtout à la suite de l'usure par abrasion, en calculant les coefficients d'usure après les modèles de Takeyama et Usui. Pour l'usure sur la face de dépouille et l'usure en cratère ils obtiennent une très bonne corrélation, mais leur modèle n'inclut pas l'effet de la diffusion.

### 3.5 *Surveillance des outils pendant l'usinage*

L'usinage à grande vitesse est presque toujours associé à des centres d'usinage. C'est le cas aussi pour l'usinage des composantes aéronautiques fait chez Bombardier. L'aspect le plus dérangeant n'était pas le fait que les outils s'usaient après quelque temps, mais plutôt qu'elles s'usaient d'une manière imprévisible, en se brisant à des moments aléatoires, ce qui produit des dégâts directes à la pièce usinée, à l'outil même ainsi qu'aux différentes parties exposés de la machine ou du bridage de la pièce. Dans ces conditions, il est facile de comprendre l'effort fait dernièrement pour surveiller l'état de l'outil et pour trouver le moment optimal du changement de l'outil. Parmi les paramètres les plus souvent surveillés on trouve les forces de coupe, l'émission acoustique (AE) et les vibrations. Wu et al. [22] mentionnent aussi la température de la coupe, le courant absorbé par les moteurs principal ou le moteur de l'avance, la pression sonore ainsi que la qualité de la surface. Les signaux de surveillance sont affectés par l'état de l'outil, les conditions de coupe variables et les bruits qui se superposent (comme par exemple la coupe d'un noyau plus dur dans le matériau). L'utilisation de la puissance du moteur principal pour surveiller l'état de l'outil a l'avantage d'être plus facile à implémenter en usine à cause des capteurs moins encombrants. Il faut considérer que le signal de puissance est un signal de basse fréquence, donc il faut d'abord bien le filtrer. Il existe une forte corrélation entre la somme cumulative des termes du spectre de la puissance et l'usure sur la face de dépouille de l'outil. Aussi, les résidus de la régression linéaire des sommes cumulatives du spectre de la puissance en fonction du temps de coupe ont été corrélés avec l'usure accélérée. Altintas [24] a utilisé le courant absorbé par le moteur d'avance pour détecter le bris de l'outil pendant le fraisage. Zhou et al. [28] utilisent un signal collecté par des jauge tensiométriques pour caractériser les contraintes mécaniques et thermiques de l'outil. Pour signaler en temps réel l'état de l'outil, le contenu du signal est analysé par la transformation dans des ondelettes (wavelet transform) et caractérisé par un réseau neuronal qui va détecter ensuite les limites d'alarme ainsi que la fréquence des dépassements de ces limites. L'analyse du signal

provenant des capteurs de force, comme une table dynamométrique est efficace pour détecter le broutage (Choi et Shin [30]). Pour réussir la détection automatique il est nécessaire de traiter les signaux obtenus et de tracer le diagramme FFT du signal et analyser les coefficients des petites formes d'ondes pour discriminer le début du broutage. Le rapport entre les forces de coupe statiques et dynamiques est à la base d'une méthode [34] pour la détection de l'usure de l'outil pendant le travail, où les forces statiques donnent des indications sur l'usure sur la face de dépouille et les forces dynamiques de l'usure en cratère, par l'établissement des relations entre les deux types de forces normalisés. L'étude de Youn et Yang [34] est entrepris pour le tournage, mais les conclusions pourraient être appliqués aussi pour le fraisage. Les changements observés sont explicables par le fait que les forces dynamiques sont plus accentuées à cause du cratère qui favorise la formation d'un arête rapportée variable. Quant à la largeur accrue de la face de dépouille, elle fait augmenter les forces statiques.

La logique floue est souvent utilisée pour la surveillance de l'état des outils, associée ou non aux réseaux neuronaux. Mesina et Langari [27] trouvent que la qualité de la prédiction de l'état de l'outil monte à 97 % si on associe les deux techniques et qu'on considère plusieurs facteurs comme les paramètres de coupe, l'émission acoustique et les forces de coupe.

### 3.5.1 Surveillance acoustique

Yu [45] propose dans sa thèse de doctorat l'utilisation de la valeur RMS du signal de l'émission acoustique pour diagnostiquer l'état des outils. Ce signal est proportionnel à la formation de l'arête rapportée sur la face de coupe. Il propose une configuration améliorée des capteurs pour limiter l'influence non désirée des bruits provenant des roulements de la broche. Aussi, il mentionne des recherches associant l'usure sur la face de dépouille avec l'augmentation de la valeur RMS de l'émission acoustique.

### 3.5.2 Surveillance des forces de coupe

La connaissance des forces de coupe et des températures est cruciale, parce que ces informations permettent de mieux maîtriser la durée de vie des outils, la qualité de la surface générée, la stabilité dynamique du processus ainsi que d'autres propriétés de l'usinabilité. Aussi, pour les opérations de fraisage, il existe une corrélation étroite entre différents aspects de la force de coupe et l'usure de l'outil.

Pour éviter le bris du taillant, il est envisageable d'avoir autant que possible une charge modérée et uniforme sur le taillant, afin d'éviter d'exposer le taillant aux forces qui pourraient le briser.

Il est généralement accepté que la charge thermique augmente avec la vitesse de coupe, à l'exception des cas où les propriétés de transfert thermique du matériau usiné où de celui de l'outil changent avec la température, dispersant ainsi plus facilement la chaleur générée. Il en résulte donc que les propriétés de transfert thermique du taillant sont un facteur important dans l'accumulation de la chaleur pendant l'UGV. L'échauffement des outils pendant l'UGV des alliages durs est discuté par El-Wardany et al. [40] pour les outils en céramiques et Dewes et al. [41] pour l'usinage des alliages pour des moules pour injection et pour pressage.

Un angle de coupe positif produit des forces de coupe moindres et moins d'usure en cratère, favorisant une vitesse relative plus élevée des copeaux par rapport à l'outil. Cependant, l'angle du taillant devient plus aigu, favorisant le bris de l'outil. Un angle de coupe négatif renforce mieux le taillant mais l'usure en cratère est plus intense et les forces de coupe augmentent. Ainsi, un angle de coupe proche de zéro est mieux adapté pour l'UGV des aciers pour outils [42].

Elbestawi et al. [37] et Sarhan [38] ont montré que certaines harmoniques des signaux des émissions acoustiques et des forces de coupe augmentent d'une manière significative avec l'usure en face de dépouille, par rapport aux autres harmoniques des mêmes

signaux, qui se maintiennent au même niveau. Ils ont analysé aussi les sources possibles pour les pointes survenues dans l'amplitude de la force de coupe pendant le fraisage à grande vitesse. Les forces totales de coupe représentent une superposition des composantes dynamiques sur une composante statique. Pour le fraisage on peut calculer les forces tangentielles, radiales et axiales en fonction des forces de coupe en direction des axes.

Mativenga et Hon [36] discutent des caractéristiques des forces dynamiques pendant l'usinage à grande vitesse de l'acier par des outils en carbure recouvert de TiN. L'article passe en revue le concept fondamental de modélisation des forces de coupe dynamiques basé sur la morphologie des copeaux et élabore un modèle des forces dynamiques basé sur les forces statiques et sur les contributions harmoniques.

### *3.6 Analyse et modélisation des phénomènes de coupe par fractals*

Les fractals sont des objets dans le sens mathématique qui présentent une similarité à toutes les échelles [51]. D'habitude on leur donne une représentation graphique, mais la propriété principale est la récursivité de leur définition. Une autre caractéristique importante est que les fractals, à cause de leur récursivité, se logent entre les dimensions, étant à la fois une courbe et une surface, par exemple, ce qui leur donne une dimension fractionnée.

Sahoo et Chowdhury [52] partent de l'hypothèse qu'entre les aspérités des surfaces qui glissent l'une par rapport à l'autre s'établissent des points de soudure, ce qui contribue à l'arrachement des particules et à l'usure par adhésion qui est perçue parfois comme de l'usure par abrasion. Suite à l'observation des particules arrachées même pour des forces de contact très faibles, les auteurs avancent l'hypothèse que l'apparition de l'usure par adhésion au niveau micrométrique serait due à l'apparition des zones d'usure par fatigue au niveau nanométrique. La recherche confirme aussi que le volume de matériau enlevé

par usure dépend des forces appliquées aux surfaces en contact. Raman et al. [54] proposent un modèle amélioré du frottement à l'interface outil–copeau basé aussi sur la théorie des fractals. Ainsi, ils considèrent que les modèles classiques, avec glissement uniforme ou adhésion complète ne répondent pas aux besoins et ils proposent un modèle avec des régions où il y a de l'adhérence, répandues dans une zone plus large où le copeau glisse sur la face de coupe, ce qui donne une meilleure approximation des coefficients de frottement et de la longueur de contact, qui influencent par la suite le calcul des forces de coupe, des températures et de la puissance consommée. Cette approche a été vérifiée et appliquée surtout pour l'usinage de l'aluminium 2024, qui adhère sous forme de taches à la surface de l'outil.

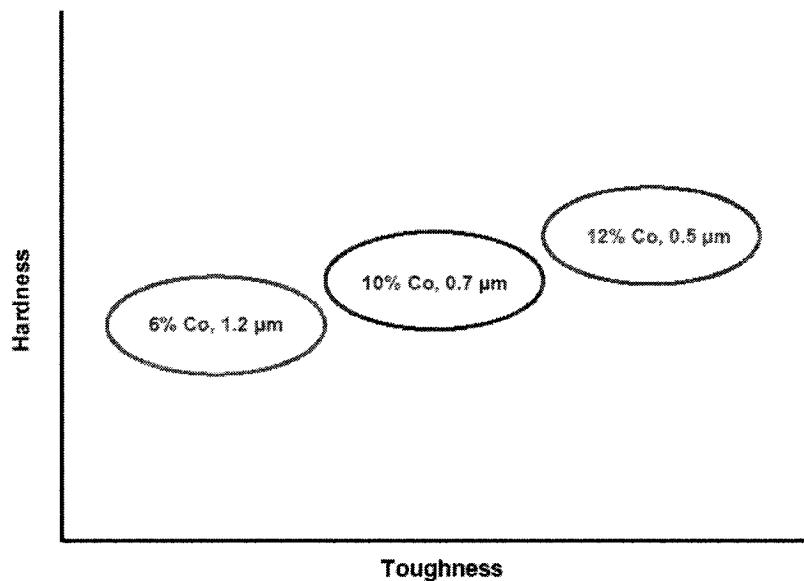
Une étude par la théorie des fractals de l'usure des outils recouverts a été fait par Kang et al. [53], ayant comme but la création d'un système pour la surveillance des outils pendant l'usinage. Un aspect très important est que la surface de l'outil en contact avec le copeau ne peut jamais être mesurée avec précision, à cause des aspérités qui pourraient se trouver ou non en contact avec le matériau usiné. Cette surface présente des traits spécifiques aux fractals et les auteurs utilisent des paramètres spécifiques, comme la dimension fractale pour caractériser la surface de l'outil et de la pièce, trouvant une relation entre la dimension fractale et la rugosité de la surface. Il est important de souligner que la dimension fractale peut être mesurée plus facilement, créant ainsi les prémisses pour une meilleure surveillance de l'outil.

### **3.7 Protection contre l'usure**

L'usure des outils en carbure de tungstène pendant l'usinage des alliages d'aluminium peut être contrôlée par l'introduction de quelques nouveautés techniques dans la fabrication des carbures, qu'on présente dans la sous-section suivant.

### 3.7.1 Nouveaux matériaux pour les outils, nouvelles technologies de fabrication des outils

Suite aux évolutions des technologies de fabrication, de nouveaux types de carbures ont été créés pour répondre aux besoins. Friedrichs [43] présente une classe nouvelle de carbures de tungstène, avec une granulométrie de 0,2 à 0,5 µm. Une influence importante est attribuée à la dimension des grains de cobalt et au pourcentage du cobalt dans le mélange. L'utilisation de la technologie d'extrusion par pressage des bruts d'outil permet l'application d'une pression isostatique, éliminant ainsi le risque d'apparition des non-uniformités sur les taillants des outils. Tel que présenté à la Figure 3-10, on voit que les nouveaux carbures avec des grains plus petits et plus de cobalt ont des qualités supérieures aux carbures traditionnels. La dureté de ce carbure est proche de 2000 HV<sub>30</sub> et une augmentation de la ténacité du matériau est aussi observée.



**Figure 3-10** – Dureté et résilience des quelques types de carbures de tungstène. Après Friedrichs [43]

Les propriétés supérieures des carbures de tungstène ultrafins ont été aussi étudiées par Doi [47] et Allen [50]. Ainsi, Doi trouve une augmentation significative de la dureté (2300 HV et  $K_{1c}$  de 15 MPa·m<sup>1/2</sup>) pour des grains de carbure si petits que 0,1 µm.

La fabrication des bruts des outils par la technologie HIP (Hot Isostatic Pressing) – pressage isostatique à chaud contribue aussi à l'amélioration des caractéristiques des outils en carbure. Ainsi, Laptev [48] et Rosen [49] présentent l'effet de la pression accrue et uniforme sur la densité des carbures dans des conditions de haute température. Il est intéressant de signaler que les grandes marques de manufacturiers d'outils, notamment Sandvik Coromant et Nippon Tungsten Co. Ltd. [57] commencent à commercialiser des outils fabriqués par technologie HIP, observant une augmentation significative de la résistance en flexion et à la fracturation. Une variante du procédé permet une encapsulation des poudres avant le pressage pour assurer une composition différente du matériau à l'extérieur que celle du noyau [57].

Un problème commun à la technologie HIP et au frittage traditionnel est la croissance des grains de carbure observée au dessus de 1100 °C, qui altère la qualité du matériau. Étant donné que le frittage peut se dérouler sur des dizaines d'heures, les grains de carbure commencent à fusionner et à augmenter. Pour éviter ce problème, l'utilisation des inhibiteurs de croissance est recommandée [43]. Récemment, l'utilisation des micro-ondes pour chauffer les poudres pendant la frittage ou pendant le HIP, a permis d'abréger le temps d'exposition à hautes températures, empêchant la croissance des grains. Un rapport du Microwave Processing and Engineering Center de l'Université Penn aux États Unis [58] montre que les pièces fabriquées ainsi présentent des résistances à l'abrasion, à la corrosion et à l'érosion accrues, ainsi qu'une ténacité plus élevée, et que, du point de vue métallographique, les grains ont gardé leurs dimensions initiales et le cobalt est plus uniformément réparti, sans compter les bénéfices économiques. VaradaRajan et al. [59] trouvent que la simple exposition des outils en carbure aux micro-ondes améliore leur durabilité pour l'usinage des matériaux composites. Agrawal et Roy [64] confirment les observations précédentes montrant que la résistance à la corrosion en acide nitrique est beaucoup améliorée, la perte de matière étant 19 fois moindre pour le carbure avec 13 % cobalt sintérisé aux micro-ondes que pour un

échantillon fabriqué des mêmes composantes mais par frittage HIP régulière. La résistance à l'érosion est améliorée de 15 % et généralement la résistance à l'usure a augmenté de 20 à 30 %.

### 3.7.2 Recouvrement des outils par des couches protectrices

Une solution convenable pour augmenter la durabilité des outils est celle d'appliquer une couche de revêtement sur les surfaces de travail des outils. Même si la différence de dureté entre le matériau de la pièce à usiner et l'outil est suffisante pour que les traces d'usure par abrasion ne soient pas visibles après 1500 minutes de coupe, il y a plusieurs arguments en faveur du recouvrement des outils : le recouvrement sert de barrière chimique, empêchant la diffusion de l'aluminium dans le matériau de l'outil, les forces de coupe peuvent diminuer grâce à la diminution du frottement et de l'adhésion de l'aluminium à la surface de l'outil, et finalement certains types de recouvrement peuvent constituer un bouclier thermique.

Il faut noter que les forces de frottement dans la zone secondaire de coupe peuvent diminuer d'une manière significative. Le coefficient de frottement entre les outils en WC-Co et les alliages d'aluminium est situé entre 0,6 et 0,7, mais pour certains revêtements il peut descendre jusqu'à 0,1 à 0,3. Étant donné qu'une bonne partie de la chaleur dégagée pendant l'usinage est causée par la frottement, cette réduction dans le coefficient de frottement diminuera les températures sur le taillant.

Compte tenu des propriétés lubrifiantes de certains revêtements [14, 15], qui font baisser la température sur l'interface outil-pièce à usiner ainsi que de l'écart entre la température de fusion de l'aluminium et des carbures, il est possible d'éliminer en partie ou complètement le liquide de refroidissement [8, 11, 12], engendrant ainsi des économies pendant l'usinage. On trouve beaucoup des informations sur l'analyse des performances des outils recouverts des couches protectrices dans des articles parus dans des revues scientifiques et dans des thèses récentes. Dans ce contexte il faut mentionner les

recherches du collectif de l'École Nationale Supérieure des Arts et Métiers de Bordeaux (France) [8, 10, 11] qui a travaillé surtout sur le perçage des alliages d'aluminium à sec.

Il y a une gamme assez large de revêtements disponibles pour les outils de coupe. Par exemple la compagnie Balzers ([www.balzers.com](http://www.balzers.com)) offrent des revêtements qui peuvent baisser le coefficient de friction à des valeurs de 0,1 à 0,2 comparés aux 0,6 à 0,7 valeur habituelle pour le contact entre les outils en WC-Co et les alliages d'aluminium.

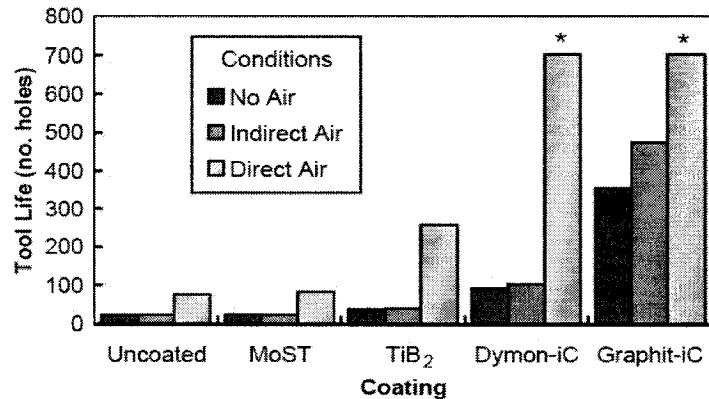
Le recouvrement le plus utilisé pour les outils en carbure pour l'usinage de l'aluminium est le DLC (Diamond-Like Carbon). Ce recouvrement consiste en de très petits grains de diamant, déposées sur la surface coupante de l'outil. À cause des petites dimensions des grains de diamant (environ 0,1 microns), il est nécessaire que la surface sur laquelle on dépose le recouvrement soit très lisse. Un problème qui a été observé par des scientifiques est la graphitisation des cristaux de diamant s'ils entrent en contact avec le cobalt. Même si les grains de diamant peuvent se déposer sur le graphite ainsi formé, l'adhérence de la couche de DLC va être réduite là où on a des taches de cobalt sur la surface qu'on désire recouvrir. Ce phénomène a été observé à l'École Polytechnique pour les outils recouverts de DLC par la compagnie Balzers. L'enlèvement du cobalt par des moyens chimiques est effectué pour éliminer le cobalt qui sort entre les grains de carbure mais cette méthode est inefficace contre les noyaux de cobalt sur la surface qui peuvent avoir des profondeurs de l'ordre de quelques microns. Pour éviter que cela ne se produise il est nécessaire de déposer une couche intermédiaire (par exemple CrN), qui n'affecte pas les cristaux de diamant et qui adhère également bien aux grains de carbures au cobalt ainsi qu'à la couche de DLC. La compagnie Balzers développe maintenant un recouvrement multicoche ayant ces propriétés. Il est très important que le recouvrement soit inerte à l'aluminium et au cobalt. Par exemple, les recouvrements contenant du titane sont aussi à éviter pour l'usinage de l'aluminium à cause de la réactivité chimique.

Nouari et al. [11] ont effectué des essais qui consistent à percer 500 trous de 6 mm de

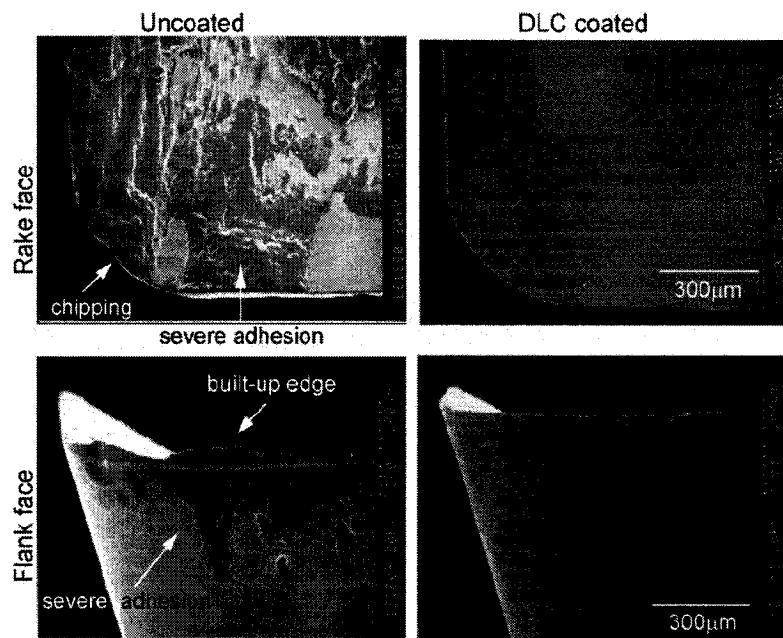
diamètre, avec une profondeur de 25 mm, sans lubrifiant. L'utilisation d'un revêtement de diamant [10] permet d'éliminer l'utilisation du liquide de refroidissement ou lubrifiant, tout en augmentant la durée de vie de l'outil de 500 à 2000 trous dans un alliage d'aluminium-cuivre 2024 en gardant les mêmes conditions de coupe. Dans une autre étude [8] les vitesses de coupe essayées étaient 25, 65 et 165 m/min et l'avance de 0,04 mm/tour. Les auteurs constatent que le revêtement de l'outil n'influence que la durabilité de l'outil qui est étendue par un facteur de presque 4. Des résultats similaires sont confirmés en [10]. La qualité de surface est semblable à celle obtenue sans recouvrement. Pour le perçage des trous dans des alliages d'aluminium pour l'aéronautique séries 20XX avec un outil optimisé, pour un taux d'avance fixé, des performances meilleures en ce qui concerne la qualité de surface ont été observées pour une vitesse de coupe de 170 m/min. Au dessus de cette vitesse et pour une avance assez petite, la qualité de surface se détériore. Aussi, l'optimum de vitesse de coupe augmentait de 25 m/min pour les outils non recouverts à 65 m/min pour les outils revêtus de TiAlN+WC/C. Il a été constaté que les revêtements qui permettent la meilleure qualité de surface sont ceux à base de TiN+Ag, de WC/C et de diamant (HEMI, BALINIT HARDLUBE et diamant) [10].

Wain et al. [16] notent que pour les forets qu'ils ont essayés pour le perçage des trous dans l'alliage A319 (un alliage d'aluminium utilisé dans l'automobile, contenant près de 6% de silicium et 3,5 % de cuivre) la destruction des outils arrivait suite le bris causée par le blocage de l'outil par les copeaux non évacués. Ce phénomène se produit en parallèle avec l'échauffement de l'outil. La Figure 3-11 présente la durée de vie utile de l'outil recouverte par quelques types de revêtements commerciaux. On observe que le revêtement de type Graphit-iC™ assure la plus longue durée de vie utile de l'outil dans toutes les conditions d'essai : refroidissement à l'air sous pression 60 psi dirigé vers l'outil (directe), à l'air sous pression 20 psi dirigé vers la pièce de façon à enlever les copeaux accumulés (indirecte), mais sans beaucoup la refroidir et sans refroidissement. Le revêtement en Dymon-iC™ donne aussi de bons résultats, étant d'ailleurs le

seul autre type qui ait dépassé le seuil de 700 trous pour le refroidissement directe.



**Figure 3-11** – L'effet du revêtement d'un foret et des conditions de perçage sur la durée de vie utile de l'outil pour l'alliage A319 ; (\*) indique un outil qui n'a pas brisé pendant les essais. Après Wain et al. [16]

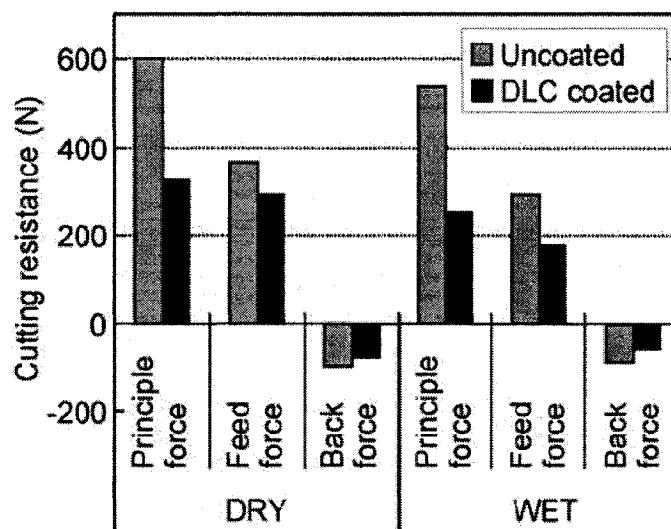


**Figure 3-12** – Images MEB des faces de coupe et de dépouille d'une plaquette utilisée pour fraiser une pièce en alliage d'aluminium AlCu2.5Si18 (après 36 m usinés). Après Fukui et al. [17].

Fukui et al. [17] ont étudié le comportement en fraisage des outils recouverts de carbone

similaire au diamant (DLC), un des plus prometteurs revêtements signalés dans la littérature. On peut observer à la Figure 3-12 qu'après seulement 36 mètres de coupe les surfaces de coupe et de dépouille de la plaquette en WC-Co K10 sont recouvertes d'une couche d'aluminium, et qu'elle présente déjà un bris.

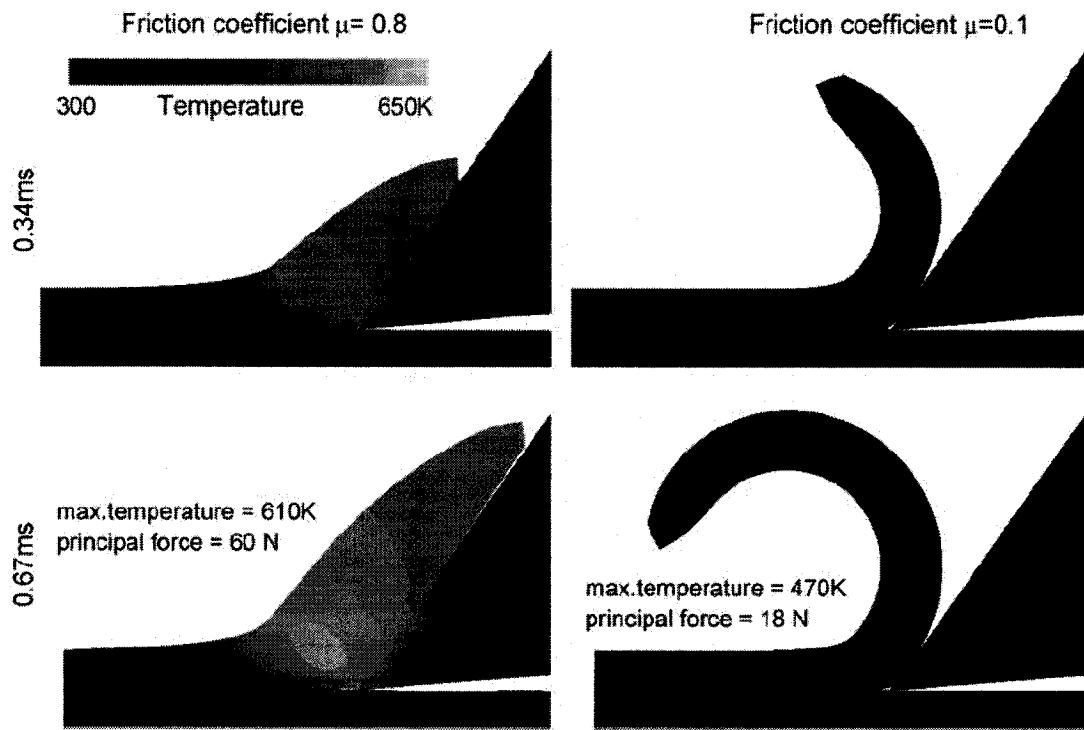
Les forces de coupe, présentés sur la Figure 3-13, ne sont pas beaucoup plus grandes pour l'usinage à sec par rapport à l'usinage avec lubrification. Le recouvrement permet de réduire de moitié la force de coupe. La rugosité de la surface est aussi améliorée. Les meilleurs résultats sont obtenus pour une épaisseur du film déposé de moins d'un demi micron, parce que la surface de l'outil reste plus lisse.



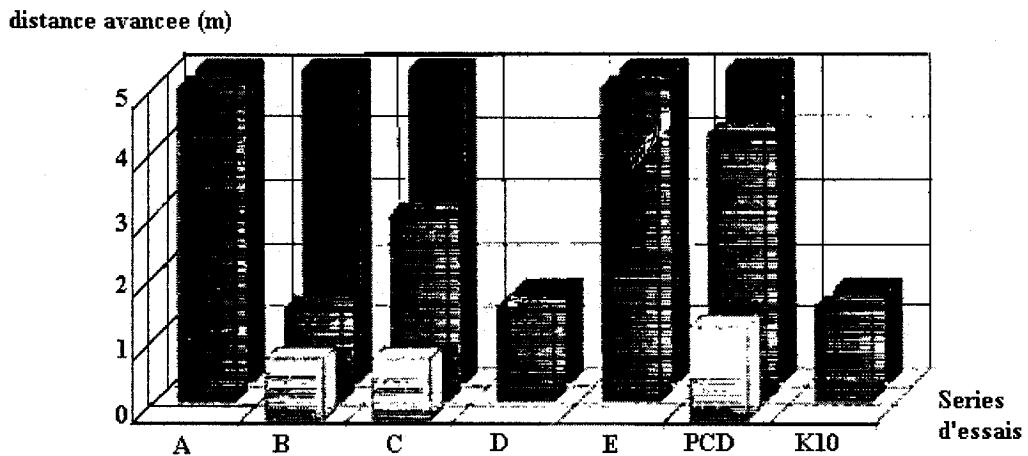
**Figure 3-13** – Forces de coupe mesurées pour le fraisage d'une pièce en AlMg2.5 à 300 m/min,  $f=0,15$  mm/rev,  $Ad=Rd=5$  mm. Après Fukui et al. [17].

Les modélisations par éléments finis montrent que les résultats obtenus sont explicables par une réduction du coefficient de frottement initial de 0,8 pour le frottement carbure-alliage d'aluminium à seulement 0,1 pour les outils recouvertes, tel qu'illustré à la Figure 3-14.

Le diamant déposé par évaporation chimique (CVD) sur des substrats en carbure de tungstène (WC-Co) est une autre possibilité intéressante. Lahres et Jørgensen [18] ont étudié les propriétés des outils de ce type, trouvant que la durée utile de l'outil de ces outils pendant le fraisage à sec des pièces en alliage d'aluminium AlSi10Mg est beaucoup améliorée par rapport aux outils en carbure non recouverts (Figure 3-15). La longueur totale coupée pendant l'essai était de 5 m. Il faut noter aussi que les résultats sont dispersés, la qualité du revêtement étant inégale. Un essai de dureté Rockwell permet de mettre en évidence une zone avec des craquelures, qui est plus grande pour les outils qui présenteront par la suite une durabilité réduite. Des causes possibles citées sont surtout la ségrégation du cobalt à cause des températures élevées durant la préparation des outils ainsi que la texture du film déposé et l'épaisseur de la couche déposée, la déposition chimique en phase vapeurs (CVD) se faisant à 1000 °C.



**Figure 3-14** – Modélisation des champs de température par éléments finis pour le fraisage à sec de l'alliage AlMg2.5 (V=300m/min, f=0,15 mm/rév, DOC=1mm). Après Fukui et al. [17].



**Figure 3-15** – Comparaison entre les durées de vie utiles des outils des différents types de recouvrement en diamant, déposé par vaporisation chimique, le diamant polycristallin et le carbure de type K10 non recouvert. Après Lahres et Jörgensen [18].

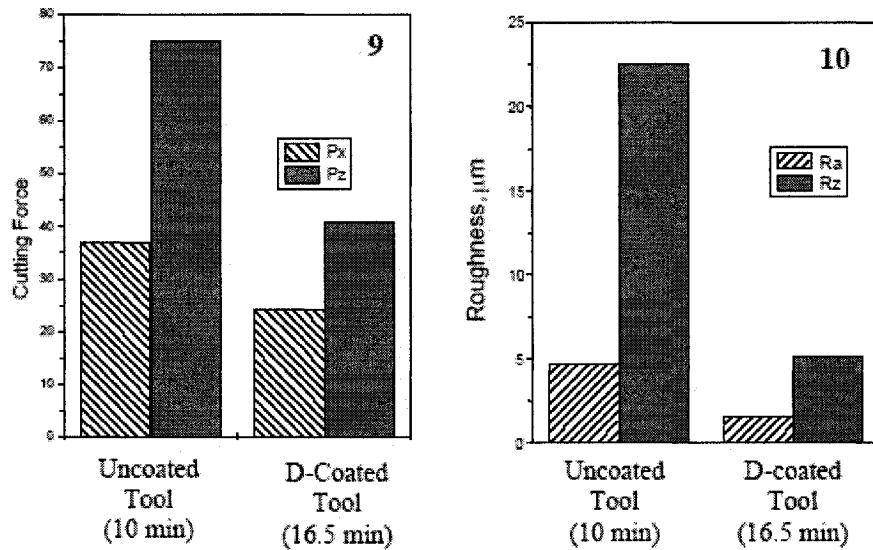
La liste des outils utilisés dans cette étude est présentée dans le Tableau 3-2.

**Tableau 3-2** – Liste des échantillons pour les essais présentés dans Figure 3-15. Après [18].

Type	Fournisseur	Matériau de substrat	Épaisseur du revêtement
CVD diamant	A	WC+Co (<3%)	6 µm
	B	WC + TiC + Co	5 µm
	C	WC +Co (6%)	4 µm
	D	WC+CO (6%)	3 µm
	E	WC+Co (6%)	9 µm
PCD - diamant polycristallin	PCD	PCD + Co (6%)	-
carbures cémentés	K 10	WC + Co (6%)	-

Le problème de l'adhérence de la couche de diamants à la surface en carbure est signalé aussi par Sahoo et al. [19], qui considèrent que les performances de coupe des outils recouverts de diamant sont essentiellement influencées par le prétraitement du substrat

en carbure avant le recouvrement. Il est important de noter que pour appliquer une couche de diamant par CVD, il faut réduire le contenu en cobalt sur la surface de l'outil qui doit être recouverte. Le cobalt est enlevé à l'aide d'une solution de  $\text{HNO}_3 + \text{HCl} + \text{H}_2\text{O}$  (1 :1 :1).



**Figure 3-16** – Comparaison entre les forces de coupe et la rugosité obtenue pour le tournage à sec d'un alliage d'aluminium avec 11% Si. Le substrat est un carbure de type K10. Après Sahoo et al. [19]

Même si les essais visent le tournage d'un alliage d'aluminium avec 11% de silicium, les résultats présentés dans [19] sont intéressants du point de vue des attentes qu'on peut avoir d'un outil recouvert de diamant.

Parmi plusieurs types de recouvrement, Coldwell et al. [14] trouvent aussi que le Graphit-iC™ est moins susceptible de former une arête rapportée pendant le perçage à sec de l'aluminium BS L168 par rapport aux autres types de recouvrement pris à l'essai, qui contenaient ZrN, MoST, MoZrN et CrTiAlN. Par exemple, CrN, MoS<sub>2</sub>, TiN, TiAlN sont susceptibles de former une arête rapportée à cause des affinités de Cr, Mo et Ti envers Al, Zn, Mg et Cu qu'on retrouve dans ces alliages. Pour les essais de perçage, très peu de différence avait été décelée entre la qualité de surface des trous. L'utilisation

d'une couche dure sous la couche lubrifiante peut améliorer les performances, car elle constitue une barrière chimique supplémentaire et permet de donner à l'outil une surface plus lisse.

**Tableau 3-3** - Comparaison entre les propriétés des certains revêtements. Après [14].

Revêtement	Dureté (GPa)	Module de Young (GPa)	Coefficient de frottement	Limite d'oxydation (°C)
TiN	20–24	276	0.5–0.6	600
TiCN	22–26	229	0.4–0.6	400
TiAlN	26–30	279	0.4	800
CrTiAlN	31	279	0.4	600
ZrN	28	276	0.6	650
MoZrN	28	287	0.4	900
CrC	23	193	0.5	700
MoST	10–15	138	0.02–0.1	600
Dymon-iC	14	145	0.03–1.0	350
Graphit-iC	16	179	0.05–0.09	350

Pour augmenter la durabilité de l'outil pendant le perçage il faut [10] :

- 1 – limiter la génération de chaleur ainsi que la diffusion des espèces chimiques entre le copeau, l'outil et la pièce ;
- 2 – assurer une coupe stable ;
- 3 – faciliter l'évacuation des copeaux.

Même s'il est peu applicable pour l'usinage des pièces pour aéronautique couramment en production, l'utilisation des outils en diamant monocristallin [32], [33] permet d'étudier les phénomènes de coupe, à part de l'utilisation pour la fabrication des composantes très petites ou avec un fini de surface type miroir. Ainsi, Ng et al. [32] observent que le copeau est continu pour toutes les profondeurs de coupe de 10 à 2000 nm, ce qui est explicable par un faible coefficient de friction qui permet un dégagement des copeaux à grande vitesse et peu de déformation. Le coefficient de friction décroît

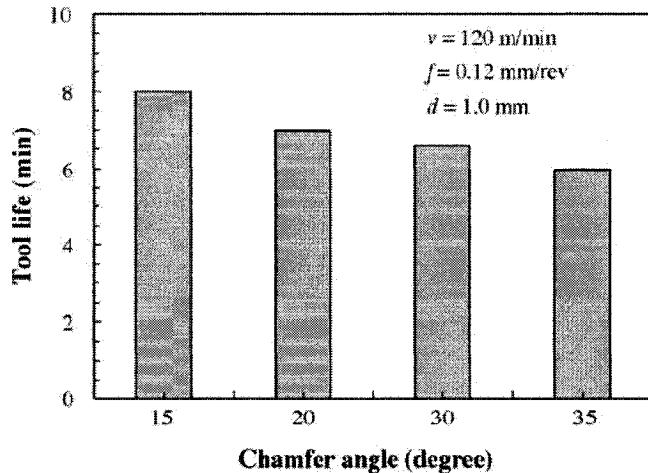
avec la profondeur de coupe, à cause de l'échauffement de l'aluminium, qui devient plus plastique. Kim et Kang [33] ont obtenu des finis miroir par fraisage avec une fraise en diamant, la qualité de surface augmentant avec la vitesse de coupe et baissant avec la profondeur de coupe axiale et l'avance par dent.

### **3.8 Géométrie des outils améliorée**

Un autre aspect à étudier est l'influence de la géométrie de l'outil sur la durabilité de celui-ci. La géométrie particulière de l'outil, avec une face de coupe avec un angle de coupe petit, d'une largeur variant de 0,15 à 0,3 mm et située avant la face de coupe générée par le canal pour l'évacuation des copeaux, fait penser à un chanfrein. On connaît les effets bénéfiques sur la durabilité du taillant des taillants arrondis ou chanfreinés. En cherchant à expliquer la fragilité de certaines portions du taillant, on a essayé de trouver quelle serait l'influence des traits géométriques plus discrètes, comme la largeur de la face de coupe intermédiaire. Yen et al. [23] observe une croissance des efforts de coupe proportionnelle aux déformations plastiques avec la croissance du rayon de l'arrondi du taillant, mais l'effet sur la température du taillant est en quelque sorte diminué par la dissipation meilleure de la chaleur avec les gros rayons. Pour les chanfreins, les effets sont plus importants avec la largeur de la facette chanfreinée, et il y a une tendance à déplacer le point le plus chaud du taillant vers la pointe de l'outil. Le chanfrein renforce aussi le taillant. Les essais ont été effectués pour acier. Une étude similaire mais pour les alliages d'aluminium a été fait par Fang et Wu [25]. Ils constatent que la présence d'une portion de la face de coupe ayant un angle négatif augmente les forces de coupe et d'avance pour la coupe orthogonale. Pour les outils arrondis, la relation entre les forces de coupe et la profondeur de coupe est non-linéaire et le rapport entre les forces de coupe et d'avance pour les outils avec arrondi et avec chanfrein est différent.

Le type d'aluminium influence aussi les résultats pas seulement par les caractéristiques

mécaniques mais surtout par les caractéristiques thermodynamiques. Choudhury et al. [26] observent aussi une légère croissance des forces de coupe et d'avance avec la largeur du chanfrein.



**Figure 3-17** – Variation de la durée de vie de l'outil avec l'angle du chanfrein. Après Choudhury et al. [26].

L'existence du chanfrein diminue la durée de vie de l'outil surtout pour des angles plus grands du chanfrein (Figure 3-17). L'influence du chanfrein est réduite pour des largeurs de moins de 0,14 mm, mais les outils étudiés se situent au dessus de cette limite.

### 3.9 Outils spécialisés pour l'usinage d'aluminium à sec

Une des tendances actuelles dans l'usinage des alliages d'aluminium est de renoncer à l'utilisation d'un liquide de refroidissement ou au moins de diminuer la quantité du liquide de refroidissement utilisé, par arrosage en gouttelettes dans la zone de coupe [42]. Beaucoup d'études montrent que le coût du recyclage du liquide de refroidissement devient excessif, représentant 16 % des coûts de fabrication, jusqu'à 4 fois plus que le coût des outils. C'est une raison pour laquelle on trouve de plus en plus d'études, surtout en Europe, portant sur l'usinage à sec, notamment sur le perçage [8].

### ***3.10 Conclusions***

À cause de l'importance croissante accordée à l'usinage à grande vitesse des alliages légers à base d'aluminium, il y a un bon nombre d'articles ou de livres qui traitent du sujet. Les principales directions de recherche dans le domaine ont été mises en évidence dans cette étude bibliographique. On a fait une recherche des phénomènes d'usure des outils, qui fournit la base de départ pour notre recherche. On a pu constater ainsi que l'usure par diffusion des outils en carbure de tungstène avec du cobalt a été très peu étudiée. Seulement un nombre très réduit de références bibliographiques, émanant d'un seul centre de recherche ont été trouvées. Différents aspects de ce mécanisme ont été quand même répertoriés dans les travaux d'autres spécialistes.

On a accordé une attention particulière aux techniques de surveillance des outils, ce qui nous a beaucoup aidé dans la planification des essais de coupe. Un chapitre est dédié aux méthodes de protection des outils et aux performances des outils recouverts, qui pourrait fournir la plus rapide modalité d'augmenter la durée de vie de l'outil.

Comme conclusion, on constate de ce recherche bibliographique que, malgré les efforts déployés jusqu'à date, il reste encore beaucoup à étudier pour améliorer les performances de l'usinage à grande vitesse des alliages d'aluminium avec des outils en carbure. L'amélioration pourrait venir des nouvelles technologies de fabrication des carbures encore en développement ou par le choix d'un recouvrement adéquat pour les outils fabriqués par des méthodes plus traditionnelles. Aussi, à cause des particularités de l'usinage à grande vitesse, ceci pourrait aider le déplacement vers l'usinage à sec ou avec de quantités moindres de lubrifiant.

## Chapitre 4 – Outils spécialisés pour l’usinage de l’aluminium

Le passage à l’usinage à grande vitesse de l’aluminium impose un changement des outils en carbure de tungstène utilisés pour ce but. L’étude des nouveaux catalogues d’outils des manufacturiers montre que même les petites compagnies ont considéré les particularités de ce processus et se sont adaptés au marché, en offrant des produits spécialisés. Les particularités des outils pour l’UGV de l’aluminium peuvent toucher tous les aspects de l’outil : type de carbure utilisé, traitement de surface (recouvrement ou polissage fin) et géométrie. Souvent on trouve que les outils qui ont un rendement optimal pour des alliages de titane ou pour des aciers inoxydables ne sont pas du tout recommandés pour l’usinage de l’aluminium.

Ce chapitre est une exploration des outils pour l’usinage de l’aluminium offerts par quelques compagnies importantes. On peut noter que la plupart des gammes d’outils pour l’usinage de l’aluminium ont été introduites récemment, depuis une année ou deux.

Les compagnies qui ont offert des informations ou pour lesquelles des informations étaient disponibles sont les suivantes : Sandvik Coromant, Gühring, OSG, SOWA, Dormer et Kennametal. Les données proviennent des plus récents catalogues de produits des compagnies mentionnées.

### 4.1 Outils fabriqués par Sandvik Coromant

La compagnie suédoise Sandvik Coromant offre dans son catalogue 2006 quelques outils pour la coupe de l’aluminium. Il faut aussi remarquer que ces outils sont apparus pour la première fois dans un supplément du catalogue pour 2005. Trois séries d’outils sont offertes : des fraises haute performance ISO N (code débutant par R216.33) pour dégrossissage, avec géométrie Kordell (bords ondulés des taillants), une série d’outils à bout sphérique (débutant par R216.42) et une série standard, à deux taillants (débutant

par R216.32). Toutes les trois séries sont en système métrique. Les types de matériaux recommandés pour l'usinage de l'aluminium sont CD10 (diamant polycristallin), CT530 (cermet recommandé surtout pour usinage à grande vitesse, parce qu'il ne forme pas d'arête rapportée), GC1025 (carbure recouverte par PVD - Physical Vapor Deposition), H10, H10F et H13A (carbures non revêtues à grain fin, adaptés à l'usinage de l'aluminium, permettant des arêtes vives). Les vitesses de coupe recommandées pour les carbures varient entre 2500 pieds/min pour les carbures et 7000 pieds/min pour le diamant polycristallin CD10, ce qui couvre la gamme d'applications spécifique à Bombardier. Il est possible d'utiliser des systèmes d'outils avec des plaquettes détachables, comme les séries CoroMill 300, 390 et 210. Il faut mentionner de nouveau que les outils pour usage général (comme les séries R216.34 et similaires) ne sont pas du tout recommandés pour l'usinage de l'aluminium.

#### ***4.2 Outils fabriqués par Gühring***

La compagnie allemande Gühring produit des séries spéciales d'outils pour l'aéronautique et pour l'usinage de l'aluminium. On peut constater dans leur catalogue de fraises en bout de haute performance en carbures que les outils optimisés pour l'usinage de l'aluminium sont rarement utilisables pour autres types d'usinage. Pareillement, les outils pour usinage général ne produisent que des résultats médiocres pour l'usinage de l'aluminium. Comme dans d'autres catalogues, les outils pour aluminium sont le plus souvent utilisés pour alliages de magnésium et/ou de cuivre. Les séries pour aluminium, appelées ALUMI-TECH, ALUMI-TECH LR et ROUGH-TECH ALU sont identifiées dans le catalogue comme 3175, 3177 et 3144 pour le système impérial et 3358, 3367 et 3127 pour le système métrique. Il est intéressant de remarquer que le revêtement en Firex (recouvrement en couches alternatives multiples de TiN et TiAlN avec une dureté dépassant 90 HRC) n'est pas offert d'habitude pour les outils pour l'aluminium. Aussi, il faut préciser que le SFM (surface feet/minute, vitesse surfacique en pieds par minute) maximal indiqué par le manufacturier est 900 pour les outils fini éclair, ce qui correspond, pour les outils de  $\frac{3}{4}$  pouces à une vitesse de coupe d'environ 4500 rpm.

Quand même, le revêtement en Firex peut augmenter la vitesse de coupe SFM à 1100-1600 pour l'usinage de l'aluminium. La série RF 100 "S" pour alliages d'aluminium se caractérise par l'angle de l'hélice variable (35/38 degrés), pour diminuer les vibrations. Les outils sont disponibles au Canada. Tous les outils pour aluminium sont des produits nouveaux pour l'année 2006.

Une autre recommandation faite par le manufacturier est de diminuer l'avance de l'outil de 20 % pour les outils standard et de 30 % pour les outils longs pour la descente en rampe de 30° et de 15 % pour l'usinage à pleine coupe. Pour la pénétration à 90° (perpendiculaire à la surface) une diminution de 60 % de l'avance est indiquée. Aussi, pour des matériaux usinés avec une dureté de plus de 44 HRC, une diminution de 50 % de l'avance est recommandé.

#### **4.3 *Outils fabriqués par OSG***

La compagnie OSG offre dans son catalogue des outils haute technologie pour 2006 des fraises en bout en HSS (acier rapide) au Vanadium pour l'usinage de l'aluminium (série HY-PRO V, liste 573 - avec deux dents et liste 574 avec 4 ou 6 dents), qui est également utilisable pour d'autres matériaux, mais pas pour les alliages de titane ou aciers inoxydables ou très durs. Aussi, des fraises en HSS au cobalt pour dégrossissage (Liste 430) et régulières (liste 530 pour les fraises normales et 535 pour les fraises longues) sont offertes pour l'usinage de l'aluminium. Les outils en carbures dans les listes 7020, 7120 et 7040, 7041, 7042, 7072, 7010, 7110, 7030, 7031 et suivantes ont de meilleurs rendements pour l'aluminium, le cuivre et le graphite, mais le diamètre de l'outil est limité à  $\frac{1}{2}$  pouce ou moins. Les fraises de la série EXOCARB-AÉRO en bout à deux taillants de la liste 2021 sont fabriquées aussi pour des diamètres plus grands. L'équivalent de la fraise MZ000644 (fraise en bout normale à 3 dents, diamètre  $\frac{3}{4}$  pouce, longueur normale, coins arrondis), qui fait l'objet d'une étude de durabilité, serait le 202158 (ou 202159 ou 202160 pour des rayons de coin plus grands), et coûterait 212,41 CAD en version fini éclair ou 301,48 CAD recouvert de DLC (Diamond Like

Carbon – carbone pareil au diamant). Il faut préciser que le fini éclair est un polissage fin pour empêcher l'adhérence de l'aluminium à la surface de l'outil et favoriser l'écoulement des copeaux. Les outils de la liste 2041, 2042, 2043, 2048, 8120, 8070 et 8170 ont trois taillants et sont légèrement plus chères que les précédents. Il faut remarquer aussi qu'une bonne partie des outils de la série EXOCARB- AÉRO sont des produits nouveaux dans le catalogue 2006. Les paramètres de coupe recommandés pour les outils mentionnés sont une vitesse de 6100 rpm pour un diamètre de  $\frac{1}{2}$  pouce, une avance de 195 po/min et une profondeur de coupe jusqu'à un pouce, en rainurage.

Il est intéressant de mentionner que des fraises en carbure de tungstène de la série Haute Performance ne sont pas du tout recommandés pour l'usinage de l'aluminium. La plupart des autres fraises en carbure sont acceptables pour l'usinage de l'aluminium, mais sans exceller. Il n'y a pas d'outils en carbures spéciaux pour l'usinage de l'aluminium dans ce catalogue.

#### ***4.4 Outils fabriqués par SOWA***

La compagnie SOWA fabrique des fraises en bout pour UGV des alliages d'aluminium, avec des plaquettes en carbure KTM10U. Les vitesses de coupe en SFM pour les alliages d'aluminium varient entre 750 et 2000 pieds par minute pour des avances entre 0,002 et 0,010 po/dent. Les deux types d'outils dans le catalogue AME 4125R et AME 4150 ont des diamètres de 1,250 et 1,500 pouces respectivement, mais il y a des systèmes d'outils aux plaquettes amovibles qui pourraient couvrir la gamme des petits diamètres aussi, comme par exemple les séries AP11/AP16 et AP10/AD15. Les plaquettes utilisées sont de type VCKT 43.57.5N-MA pour les deux premières fraises. Aussi, il existe des plaquettes conçues spécialement pour le tournage de l'aluminium, avec angle de coupe accru, briseur des copeaux adapté pour la coupe de l'aluminium et une qualité de surface empêchant l'adhésion de l'aluminium à la surface de la plaquette. Le recouvrement le plus souvent appliqué est le diamant.

Dans les outils en carbure massif, il y a une série « verte », spécialement conçue pour l'usinage de l'aluminium. La géométrie est optimisée pour l'aluminium, ce qui permet l'utilisation à un SFM de 660 (4000 tours par minute pour un outil de  $\frac{3}{4}$  po, pour rainurage, avec une profondeur de coupe de  $\frac{3}{8}$  po et une avance de 32 po/min). Le prix pour ces outils est de 200 \$ pour une longueur du taillant de  $1\frac{1}{2}$  po et de 250 \$ pour  $2\frac{1}{4}$  po.

#### ***4.5 Outils fabriqués par Dormer***

La compagnie Dormer, qui est associée au groupe Sandvik Coromant fabrique aussi des outils pour l'usinage de l'aluminium, sans avoir des séries dédiées à ce but. Dans les fraises en bout avec queue cylindrique les séries S642, S602, S662, S622, S672, S678, S688, S689 et S682 sont indiqués comme ayant un comportement excellent pendant l'usinage de l'aluminium et de ses alliages. Le recouvrement habituel pour les outils ayant un bon rendement pour aluminium est le TiCN, à part du fini éclair. Aussi, il y a les séries C160, C161 et C162 en acier rapide, fini éclair qui est optimisée pour la coupe de l'aluminium.

#### ***4.6 Outils fabriqués par Kennametal***

La compagnie Kennametal produit des fraises en bout pour matériaux non-ferreux (les alliages d'aluminium sont souvent associés aux alliages du cuivre et similaires comme paramètres d'usinage) en carbures solides. Les fraises à 2 dents sont utilisables pour l'usinage des poches profondes, avec des coins de moins de  $90^\circ$  et les fraises à 3 dents et angle de l'hélice de  $45^\circ$  sont optimisés pour finissages des parois minces. Les séries commençant par HPFA ont une géométrie à double face de coupe, pour éliminer le broutage, et améliorer la finition. Les fraises revêtues de diamant, de la série KDF, commençant par BNEC sont recommandées pour composites, ayant une durabilité 50 fois plus grande et des vitesses de coupe 3 fois plus grandes que les fraises en carbure non-recouverte. Les séries pour aluminium similaires à ceux-ci commencent par F2AA, F3AA et F3BA.

#### 4.7 Conclusion

En conclusion, il y a eu beaucoup de changement dernièrement dans la compréhension des particularités de la coupe à grande vitesse des alliages d'aluminium. Certaines compagnies ont introduit depuis peu de temps des outils optimisés. D'autres compagnies n'ont pas encore suivi les tendances et continuent de classer l'usinage de l'aluminium parmi d'autres catégories de coupes. Il est préférable de choisir des outils produits par des compagnies qui ont investigué ce type de coupe particulier, des outils permettant des vitesses de coupe élevées et qui sont offerts avec des traitements de surface diminuant les effets de l'attaque par diffusion.

Le Tableau 4-1 présente les manufacturiers étudiés avec les séries d'outils spécialisés pour aluminium qu'ils fabriquent.

**Tableau 4-1- Liste des outils recommandés pour l'usinage de l'aluminium**

Manufacturier	Séries d'outils
Sandvik Coromant	Outils en carbure recouvert CD10, cermet CT530, GC1025, carbures non recouverts H10, H10F, H13A Outils à plaquettes détachables CoroMill 210, 300, 390
Gühring	Séries ALUMI-TECH, ALUMI-TECH LR, ROUGH-TECH ALU (3175, 3177, 3144, 3358, 3367, 3127)
OSG	Séries EXOCARB AERO (2021, 2041, 2042, 2043, 2048, 8120, 8070, 8170)
SOWA	Outils avec des plaquettes en carbure KTM10U Série verte pour l'usinage de l'aluminium
Dormer	S642, S602, S662, S622, S672, S678, S688, S689, S682
Kennametal	Séries débutant par F2AA, F3AA et F3BA notamment

## **Chapitre 5 – Diffusion Wear Mechanism during High Speed Machining of 7475-T7351 Aluminum Alloy with Carbide End Mills**

L'article présenté dans ce chapitre a été soumis en Février 2007 pour publication dans la revue International Journal of Wear. Il présente les arguments qui viennent à l'appui de l'hypothèse formulée pendant la recherche, celle que l'usure catastrophique des outils en carbure de tungstène pendant l'usinage à grande vitesse des alliages d'aluminium est causée par la diffusion chimique de l'aluminium dans le cobalt. Cette diffusion est favorisée à son tour par les hautes températures atteintes pendant l'usinage, à cause de la compression adiabatique du matériau dans la zone de déformation plastique, et à une distribution non uniforme du cobalt dans la masse du matériau de l'outil.

On présente notamment des photos prises au microscope électronique à balayage montrant les défauts d'uniformité dans la distribution du cobalt, l'accumulation du cobalt proche de la surface de l'outil à cause du réchauffement pendant la fabrication de l'outil et les résultats d'une simulation faite à l'aide du logiciel AdvantEdge® de Third Wave inc. où on peut constater des températures autour du point de fusion de l'aluminium dans la zone de formation du copeau. Aussi, on présente les résultats des essais effectués pour vérifier l'interaction de l'aluminium avec le matériau de l'outil. On observe des transformations dans la structure de l'aluminium en contact avec le cobalt contenu dans le matériau de l'outil qui s'installent progressivement avec la température et le temps d'exposition.

L'article est présenté dans sa forme finale, sans aucune différence par rapport au texte soumis. Il y a de petites modifications de format en ce qui concerne la numérotation des figures et leurs dimensions et la mise en page pour améliorer la lisibilité de l'article et de le rendre compatible avec le format utilisé pour le reste de ce mémoire. La page de titre contient la confirmation de réception de l'article par le journal.

# Diffusion Wear Mechanism during High Speed Machining of 7475-T7351 Aluminum Alloy with Carbide End Mills

*V.D. Călătoru<sup>\*</sup>, M. Balazinski<sup>\*</sup>, J.R.R. Mayer<sup>\*</sup>, H. Paris<sup>\*\*</sup>, G. L'Espérance<sup>\*\*\*</sup>*

*<sup>\*</sup>Dept. of Mechanical Engineering, École Polytechnique de Montréal, Québec, Canada*

*<sup>\*\*</sup>G-SCOP Laboratory, University of Grenoble, France*

*<sup>\*\*\*</sup>Dept. of Industrial Engineering, École Polytechnique de Montréal, Québec, Canada*

## Abstract

During high speed end milling of aeronautical grade aluminum alloy 7475-T7351 parts using tungsten carbide with cobalt binding (WC-Co) tools, unexpected chipping followed by catastrophic failure of the end mills was observed, while abrasive wear traces were absent. The tool breakage occurs usually with no warning and involves large portions of the tool tip. Broken tools presented extensive damage on all flutes. Results of the tests, Finite Element Analysis (FEA) and Scanning Electron Microscope (SEM) observations show that high temperatures generated during the cutting process activate the diffusion of aluminum into the tool material and the formation of an eutectoid containing cobalt aluminide (Al-Co) with the cobalt used as binder. This hard and brittle eutectoid is compromising cobalt's role as binder between the carbide grains. The penetration of the aluminum in the tool material becomes deeper with the exposure time

and temperature of the contact, until the whole tool tip becomes brittle and subject to chipping and next to heavy damage. The paper presents this unusual and yet ignored form of wear which is preventing manufacturers to make full use of the tungsten carbide tools for aeronautical aluminum in a particularly attractive area of cutting parameters domain.

## **Keywords**

Diffusion wear, aluminum alloys machining, cobalt, tungsten carbide tools, end mills

## **Introduction**

High speed machining of aluminum alloy is growing both in terms of volume and performance, and the trend is likely to be maintained for the years to come. Aerospace and automotive industries are using high speed machining of aluminum to manufacture parts that represent only a fraction of the original massive aluminum alloy blocks volume. Due to high volume of material to be removed, increased productivity can be achieved only by increasing cutting speed and feed.

The increase in productivity is not always preceded by a deep evaluation process of all the factors involved, based on the preconceived idea that the aluminum alloys are easy to cut with carbide tools, even if the speed and feed are increased well above traditional limits.

Thus, in a major aeronautical company the cutting speed of the tools was substantially increased on the assumption that, by controlling the chatter, the cutting forces and the power consumption could be increased up to machine and tool limits. Whereas the process was stable during cutting tests and the tool performed well, on the long run a severe problem with sudden and unpredictable failure occurred.

Following the investigations, it has been found that one of the causes for the chipping and sudden breakage of the tools was a complex mechanism of diffusion wear accelerated by higher temperatures than direct measurements would have indicated and by poor uniformity of cobalt distribution.

The accumulation of cobalt close to the surface is prone to the formation of cobalt aluminide, which can develop at very small percentages of aluminum in cobalt. In addition, the aluminum is penetrating in the depth of the tool material. This penetration is documented by Nouari et al. [1] using the Particle Induced X-ray Emission (PIXE) analysis and we were able to prove it indirectly in our experiments. The gradual and profound change in properties of the material is ultimately responsible for extensive chipping of the tool tip, leading to sudden failure and breakage of the tool.

The aim of this study is to offer a congruent explanation for the unexpected catastrophic wear of the tools observed and to prove it by a series of experiments. The first experiment was intended to prove if there is a clear destructive influence of aluminum on the cobalt binder in the carbide at high temperatures. It consisted in SEM observations of carbide samples, previously maintained for 200 minutes in liquid aluminum and/or aluminum vapors, heated at 650 °C and 750 °C. Electronic imagery showed an alteration of the structure of the carbide, which became more porous and brittle, to a depth of 350 µm, even if presence of Al was not detected.

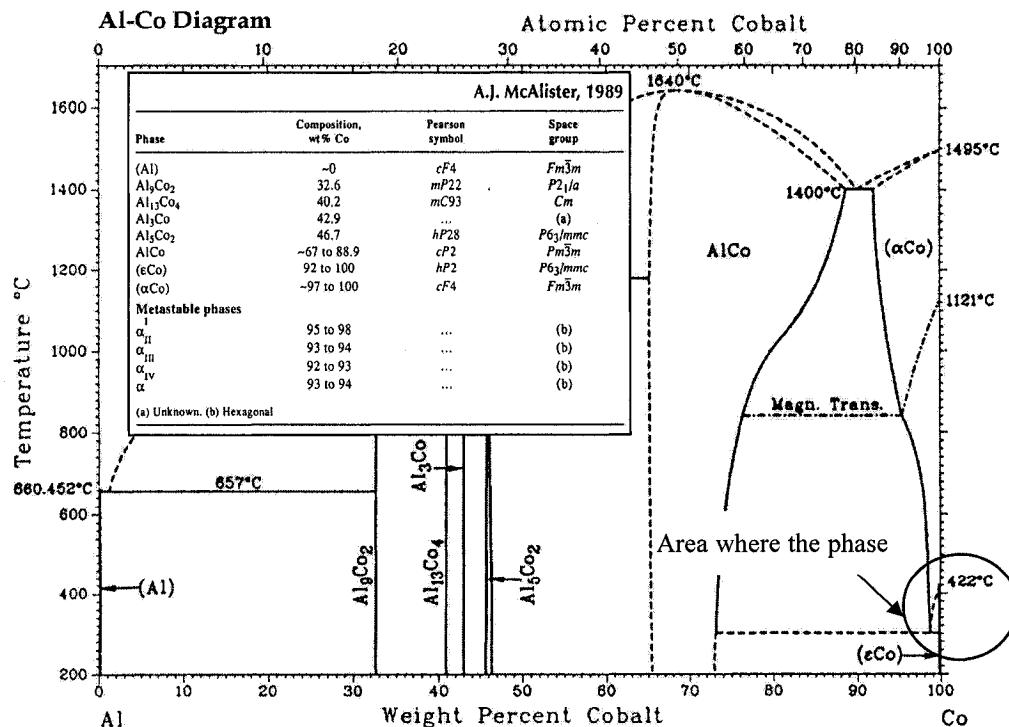
Simulations of the cutting process were performed to provide more precise information about the temperatures in the cutting zone. These simulations came after finding traces of excessive heating and other side effects on the tool surfaces, indicating that higher than expected temperatures were generated during the process.

A second series of diffusion tests were performed in controlled atmosphere, matching the temperatures reached during cutting process simulations for durations of exposure to

aluminum similar to the industrial manufacturing test performed earlier. Samples were checked for the occurrence of diffusion phenomena. Though the complexity of the cutting process could not be reproduced entirely by these experiments, the results confirm that there is an exchange of substance between the carbide and the aluminum layer deposited on the surface of the samples.

## Affinity and diffusion phenomena between aluminum and cobalt

The affinity of aluminum towards cobalt is commonly known [2]. Figure 5-1 presents the Al-Co diagram and the list of chemical compounds of aluminum and cobalt. For pure cobalt the phase transformation of cobalt's  $\epsilon$ -structure into  $\alpha$ -structure the temperature of is 422 °C. This transformation occurs at temperatures as low as 300 °C [2] in the eutectoid forming at concentrations of aluminum of less than 3 % in cobalt. The cobalt aluminide formed in the process is brittle [3], dramatically deteriorating the characteristics of the material in which it forms.



**Figure 5-1** – Al-Co diagram and the list of chemical compounds of aluminum and cobalt (medallion) After ASM Handbook, 1999 [2]

The diffusion of aluminum in cobalt was also observed and described by Zhang and Tang [4], [5]. The affinity of the two metals was so strong that it occurred to bushing and sleeve bearings made out of cobalt-based Stellite® 6 Superalloy submerged in galvanizing baths containing only 0.18 % Al in zinc. They quote studies showing that even in a galvanizing bath with 0.015 % Al in zinc at 460 °C the AlCo compound was forming.

### **Temperature and Heat Fluxes in High Speed Machining**

High speed machining differs in many aspects from classical machining. Among the most noticeable differences is the way the heat is generated and partitioned between chips, tool and machined part. It is generally acknowledged that, due to the adiabatic character of the cut at speeds and feeds exceeding the speed of propagation of the heat through the material, most of the heat does not disperse in the depth of the workpiece, remaining mainly in the chips [7]. The presence of a close thermal contact between chip and tool, favored by the mixture of solid and liquid phases of the aluminum, may indicate that the tool can heat up quite rapidly to the melting point of aluminum. FEA simulations confirmed that possibility. According to Abukshim et al. [6], the heat generated in the secondary deformation zone accounts for only 20 to 35 % of the heat in the primary zone. Richardson et al. [7] noted an important reduction of the heat passed to the machined part by as much as a factor of 6 when the cutting speed is increased from 300 to 3000 m/min. Increasing feed from 0.1 to 0.3 mm per tooth at 3000 m/min would reduce the proportion of heat transmitted to the machined part by 64 %, from a partition ratio of 3.6 % of the total heat generated to 1.3 %. Globally, the total heat flux increases dramatically with the speed. For a speed increase from 500 to 5000 m/min, the heat flux increases roughly threefold. The extra heat generated is passed to chips and tool, heating intensively the rake face at the contact area.

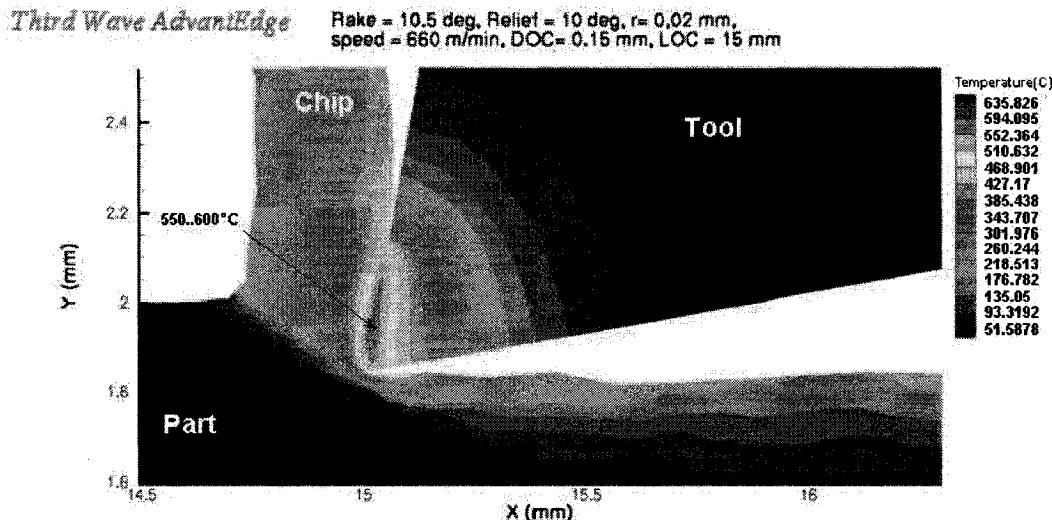
The difficulties of modeling the temperatures in the cutting zone are emphasized by Abukshim et al. [6], pointing out that, whereas 2D modeling for common cutting speeds,

generating moderate heat, is quite well handled by most of FEA programs, the modeling of high speed cutting and three dimensional complex cutting, where high temperatures reached alter properties of the material is distorted by highly non-linear phenomena. Among these, the authors mention the predominant effect of the cutting speed on the cutting temperature and heat transfer mechanism, as the cutting process becomes more adiabatic with the increase in the cutting speed. The authors also assert that, due to local high temperature, stress, chip velocity and variable friction, the steady state may never be reached. While there are successful applications of 2D analysis, the 3D analysis is very problematic.

Another factor further complicating modeling and analysis is the dependency of properties of materials with temperature. The aluminum alloy 7475-T7351 melts at temperatures between 477°C and 635°C, meaning that between these limits solid and liquid phases coexist. These temperatures are in the range of temperatures observed at the tool-chip interface in the analysis performed in Third Wave AdvantEdge® Figure 5-2. Under these circumstances, it is expected that molten and chemically active components of the alloy are in contact with the active tool surfaces, especially along cutting edges, during the cutting process.

On the other hand, we found the method proposed by Olson et al. [10] to calculate the temperatures on the tool-chip interface by the inverse approach for purpose of process monitoring inapplicable in the case of high speed milling because the propagation of heat more than 0.2 mm in the depth of part material is insignificant. Figure 5-2 shows the results of a simulation of temperatures developed on the cutting edge of the tool, during orthogonal cutting. The temperatures go up roughly to 600 °C at the tool-chip interface (short peaks due to shortcomings of the computing algorithms used by the software were ignored), in the range of melting temperatures of the aluminum and with flashes above that limit. As for the temperatures that can be measured, we can see from Figure 5-2, which is a slide taken after roughly 13 mm from the initial contact tool-

workpiece, that the temperatures at the exterior of the chip or 1 mm behind the cutting edge are below 300 °C, meaning that infrared or other direct temperature measurements would be inapplicable.



**Figure 5-2** – Distribution of temperatures during orthogonal cutting of aluminum with a tool with the same characteristics as a section through the tool studied (rake angle = 10.5 deg, primary clearance angle 10 deg, edge radius 0.02 mm). Simulation performed with AdvantEdge® from Third Wave Inc.

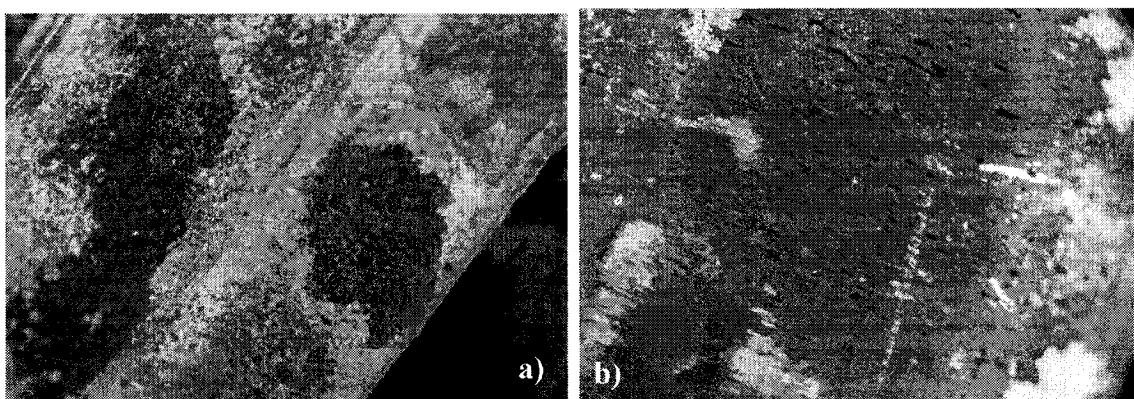
The high temperatures observed on the rake face of the tool can be the result of the combined effect of heat generated in the primary deformation zone and the secondary deformation zone. During the simulations performed, the temperatures on the rake face and tip area of the tool differed little with the decrease of the friction coefficient or with coolant flooding the cutting area with the exception of the tool tip, indicating that most of the heat is actually generated in the primary deformation zone, with little influence from the friction between tool and chip.

#### Interaction of aluminum and cobalt at high temperatures

The first experiment was set up to determine if there is an interaction between the cobalt serving as bonding element in the tool material and the aluminum in the workpiece

material. To show that, samples of tool material and workpiece material were put together in melting pots in an oven, at 650 °C and 750 °C for 200 minutes. The high temperatures melt the aluminum and, as no inert gas was used, immediately oxidized, forming a thick skin of aluminum oxides on the surface of the molten aluminum. Despite this barrier, the chemical reaction was obvious on the surface of the tool samples at both temperatures and it affected even the samples which were not in direct contact with the molten aluminum.

As seen in Figure 5-3 the surface of the tool is severely damaged, becoming porous and brittle, for both temperatures. A yellow compound formed on the tools surfaces in contact with aluminum. The outer layer with a thickness of approximately 350  $\mu\text{m}$  detached from the attacked surface was investigated by SEM.

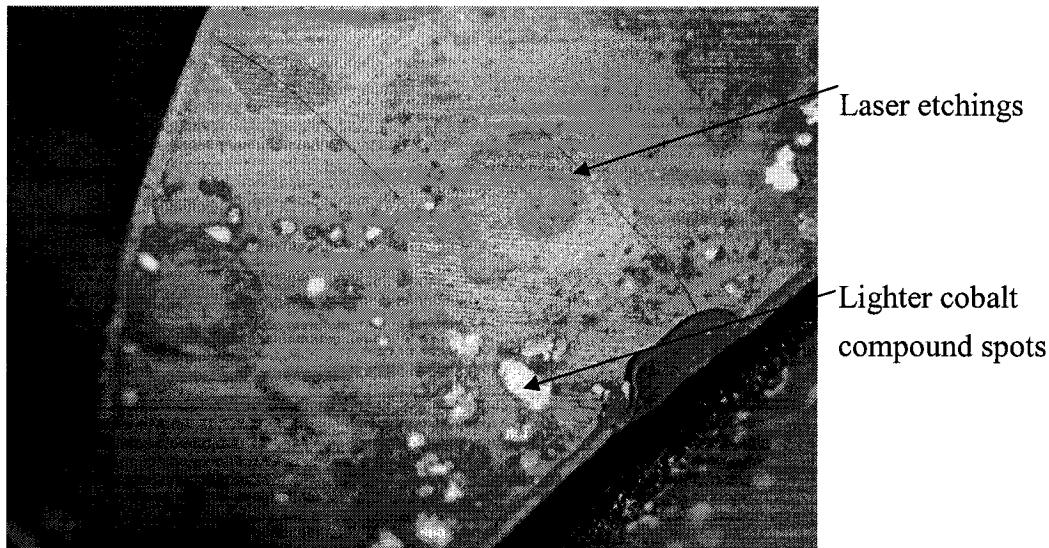


**Figure 5-3** – Attacked surface of the tool, at a) 650 °C, b) 750 °C, for 200 min, samples in contact with aluminum

After 200 minutes of contact time with aluminum at high temperature, the structural transformation of the carbide was visible in SEM observations. The 350  $\mu\text{m}$  layer that detached from the surface of the tool was different in that the structure seemed more porous and grains of carbide were covered with a fine dust, resulting from precipitation of cobalt aluminide.

**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** presents a sample that was exposed to the fumes in the oven, containing aluminum vapors, but which was not directly in contact with molten aluminum. As the samples came from the tool tail where some laser

were performed, it is possible to see that there is a difference of attack over the laser etched surface, where cobalt was evaporated preferentially, due to its lower melting point. It is possible to notice the yellow spots (lighter shade in Figure 5-4), similar in shape and dimension with accumulations of cobalt in kernels, as further discussed. The edges of the samples show traces of fracture and initiation of peeling of the surface layer affected by exposure to aluminum, a sign of volume change. Figure 5-5 - left presents the structure of the modified layer, which can be compared with pictures of normal structure of the carbide presented in the same picture, on the right side.

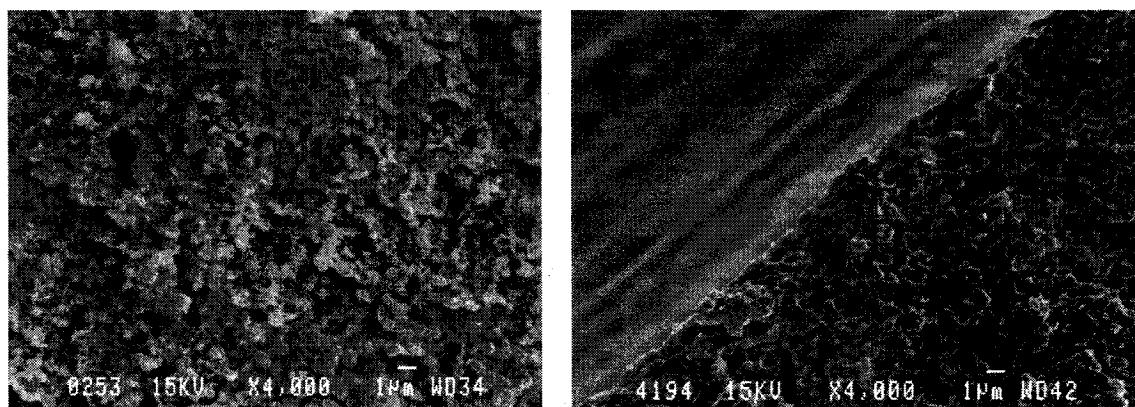


**Figure 5-4** – Surface of the tool affected by aluminum vapors.

The volume change is due to significantly lower density of the cobalt aluminide (Al-Co), of only  $6.08 \text{ g/cm}^3$ , compared to  $8.84 \text{ g/cm}^3$  for  $\epsilon$ -Co at room temperature and  $8.79$  for  $\alpha$ -Co at temperatures where this phase exists. During the electron microscopic observation conducted to identify the causes of the peeling on the surface of the samples, structural modifications were noticed on both sides of the  $350 \mu\text{m}$  thick detached layer. The spectral analysis performed on resulting chips showed that on the darker surfaces only tungsten was detectable while on the yellow spots concentrations of cobalt up to 40 % were detected, with some aluminum. On the interior surface of the peeled off chips,

% were detected, with some aluminum. On the interior surface of the peeled off chips, cobalt was present in normal percentage.

Higher porosity than for the original carbide was clearly visible on freshly broken surfaces. Another sample was heated in the same oven at 650 °C for 200 minutes, with no aluminum present. The sample presented a burned appearance but physical properties and structure were not altered in depth.



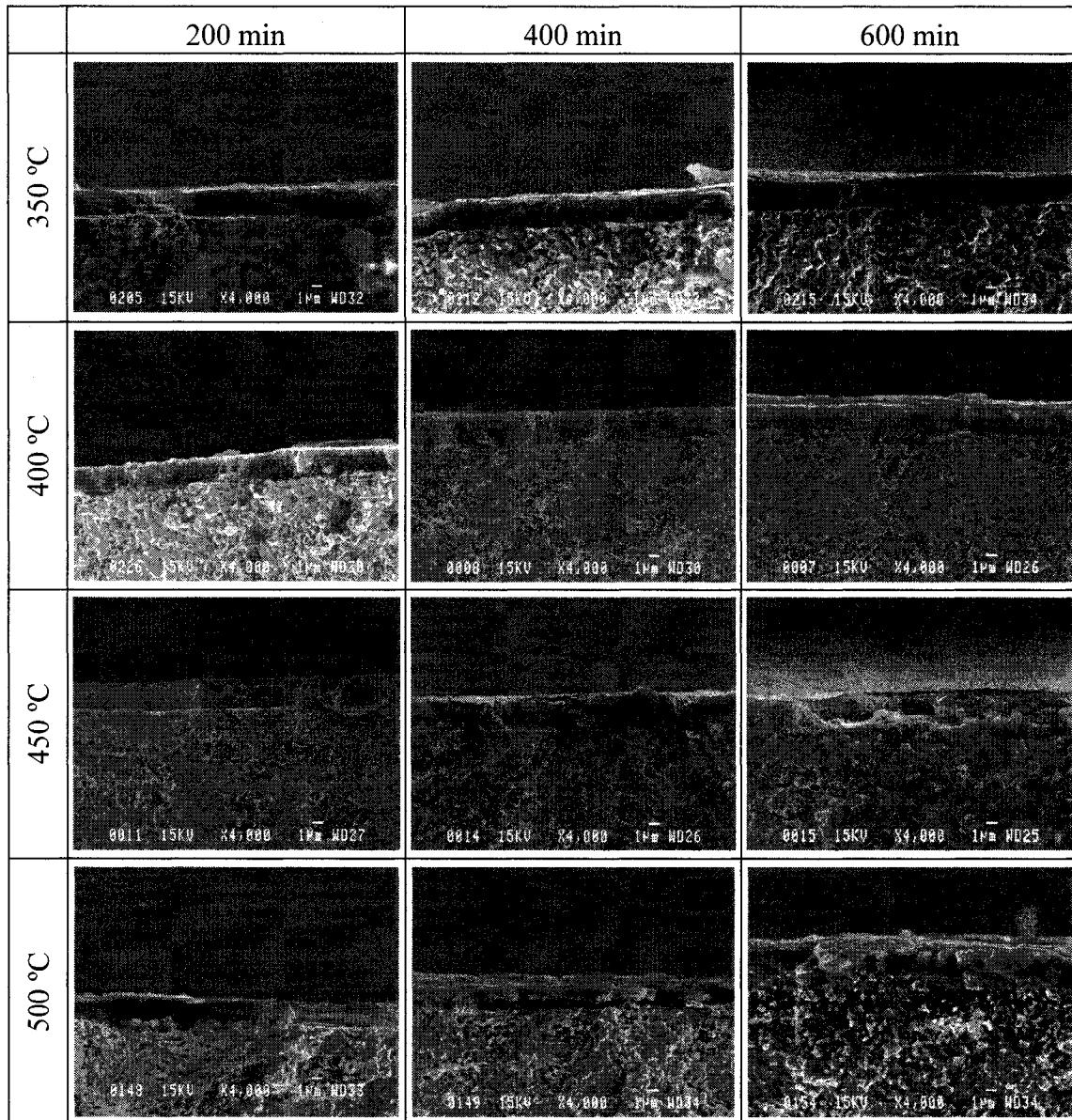
**Figure 5-5** – Altered structure of the carbide exposed to high temperature, prolonged contact with aluminum alloy (left). Normal structure (right)

The presence of aluminum was not detected other than by formation of the AlCo compound. This is due to the limited sensitivity of the equipment used. However, much precise techniques, such as PIXE (Particle Induced X-ray Emission) are capable of detecting the presence of aluminum absorbed in the mass of the carbide [1], [8] even in concentrations of hundredths of percent.

#### **Diffusion tests at 350 °C – 500 °C**

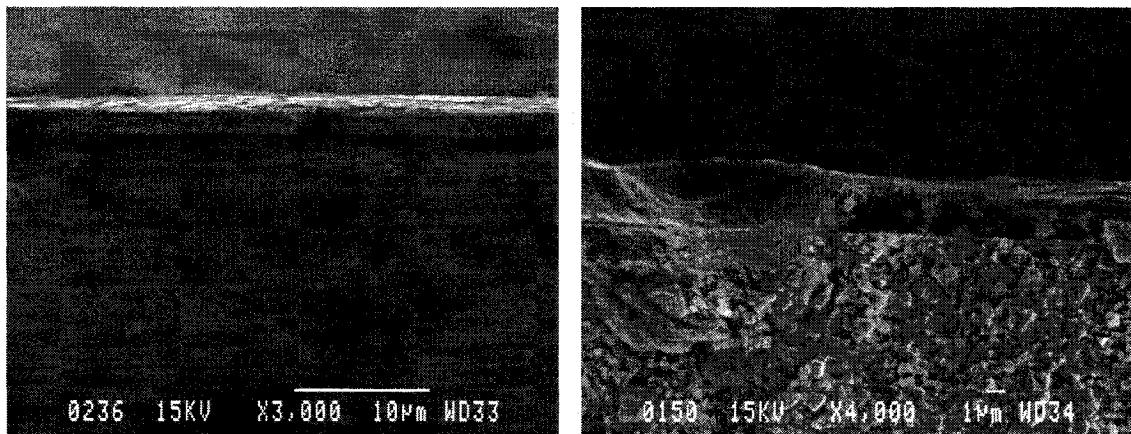
A separate experiment was conducted to show that aluminum is absorbed in the porous structure of the tool material. In order to provide better contact between the tool material samples and aluminum, a layer of 3.2 μm of aluminum was deposited by physical vapor deposition (PVD) sputtering on the surface of the carbide samples. The first analysis was

performed in order to identify changes in the structure of the aluminum layer. For that, the samples were cut from the side opposite to aluminum layer and fractured when less than few tenths of a millimeter were left uncut, enough only to avoid sample breakage during the cutting process. The cutting was conducted at slow speeds, using a diamond coated disk, in order to keep structures intact.



**Figure 5-6 – Changes in the layer of aluminum with temperature and exposure time**

The experiment was carried at 350 °C, 400°C, 450 °C and 500 °C for 200, 400 and 600 minutes respectively, in order to determine structural modifications in the layer of deposited aluminum and/or in the adjacent layer of the carbide sample. It is to be noted that the choice of temperatures corresponds to the range of temperatures observed during modeling of the cutting process using FEM software. The choice of exposure intervals is in line with the timing of the cutting tests performed during the study. The structure of the aluminum layer changes, as shown in Figure 5-6, from the compact, well adhered and relatively not modified structure at 350 °C and 200 minutes of exposure to a porous, thinner layer visible for higher temperatures. Another characteristic is the fact that the aluminum layer seems to bear within its structure grains of what looks like an intermetallic compound.



**Figure 5-7** – Absorption of aluminum on the bottom side of the layer (left). Collapsed aluminum layer over what looks like a cobalt accumulation to the surface (right). Both samples were exposed at 500 °C for 400 minutes.

The process of aluminum absorption is affected by the presence of cobalt close to the surface. When this situation occurs, the aluminum layer is shrunk to the surface of the tool material sample, as shown on the right side of the sample exposed at 500 °C for 200 minutes. Also, cavities develop in the aluminum layer deposited on the carbide samples

on the side facing the carbide and a modification of the structure of the aluminum layer is visible. The process is similar to Kirkendall voiding [11], a process of migration of atoms across a common junction, observed already for other bi-metallic systems like Al-Au, Al-Ag or Au-Cu.

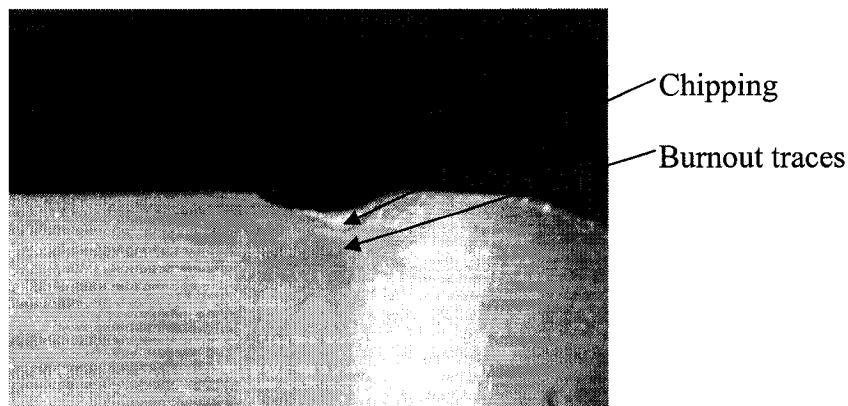
The special preparations of the samples allowed viewing the aluminum layer without being deformed by cutting. Figure 5-7 shows on the left such a sample, where absorption of the molten aluminum occurred on the side facing tool material. Small asperities on both sides prevented the aluminum to shrink over the tool material. On the right side, since we have a fractured sample, the aluminum layer collapsed over a small kernel of cobalt located right on the surface of the tool sample. The structure of the aluminum layer is altered in that place, as it is the structure of the tool material. This reaction is used to chemically inactivate the cobalt found on the tool surface, as the proposed tool preparation procedure before coating it with diamond coatings [12].

Machining process temperature has a major impact on how fast the tools will be affected. Determining the temperature on the cutting edge is quite difficult during high speed machining, due to the increase in heat generation, small contact areas between tool, workpiece and chip, to non-linear behavior of the materials and fast passage of the tool tip on the machined surface, the process being mostly adiabatic. The temperature in the cutting area reaches the melting range of temperatures for the alloy considered and simulations have shown that cooling or reducing friction does not improve the situation significantly. The temperature is currently over 300 °C, which is the activation threshold for transformation of  $\epsilon$ -structure into  $\alpha$ -structure of cobalt, which has increased affinity towards aluminum. The fact that the aluminum can reach temperatures in the melting range especially at the contact with the rake face of the tool accelerates the phenomenon.

As a consequence of the contact between the tool material and the aluminum alloy, subjected to high pressures and temperatures, as well as to permanent replacement of aluminum, the aluminum adheres, first forming a built-up layer (BUL) and next a built-

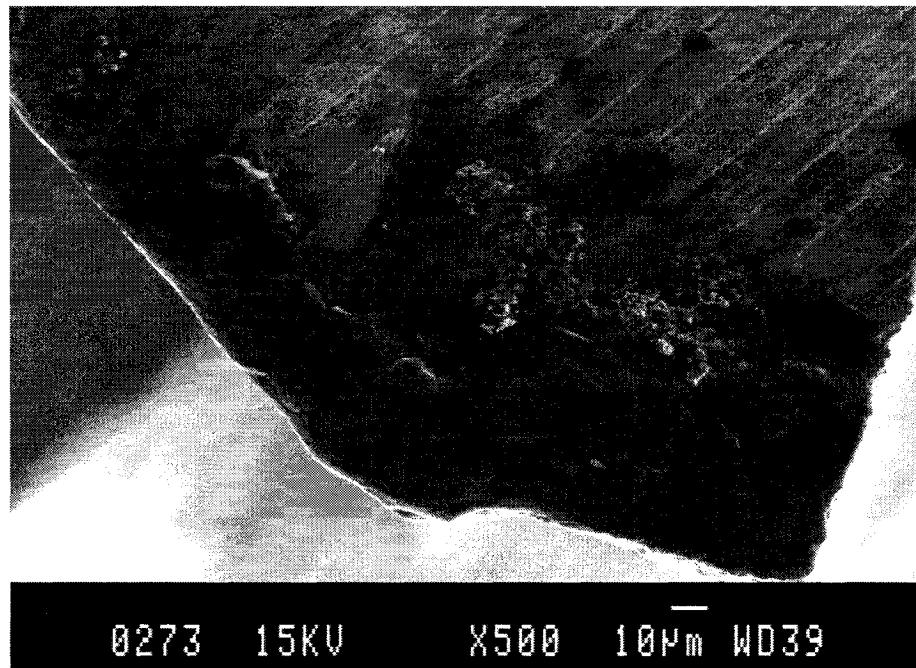
up edge (BUE). Next, the aluminum diffuses in the mass of the tool material, forming an eutectoid with the cobalt found there. The aluminum can penetrate by diffusion in cobalt up to considerable depth. The effect of the formation of cobalt aluminide is of rendering brittle the material of the tool tip.

Figure 5-8 presents traces of burning and the most common form of chipping that occurs for the tools used for the study. Due to particular geometry, the chip section becomes complex at the intersection of the three surfaces on the edge of the tool lip, curling into two perpendicular directions, generating thus more heat when deformed. Traces of burning are observed long time before chipping on the clearance face. These traces signal high temperatures on the surface of the tool.



**Figure 5-8** – The most common form of chipping observed on the tools. Burnout of the tool material is visible around the chipping. A shiny plaque of aluminum adhered to the rough surface of the chipping.

Figure 5-9 shows aluminum deposits on a surface that cuts through aluminum only occasionally. The form of the deposits resembles very much to melt material. The dark spots on the tool are places where cobalt made its way to the surface of the tool and remain visible after cleaning the tool. Similar darkened spots were visible on all ground or wore surfaces of the tools studied.



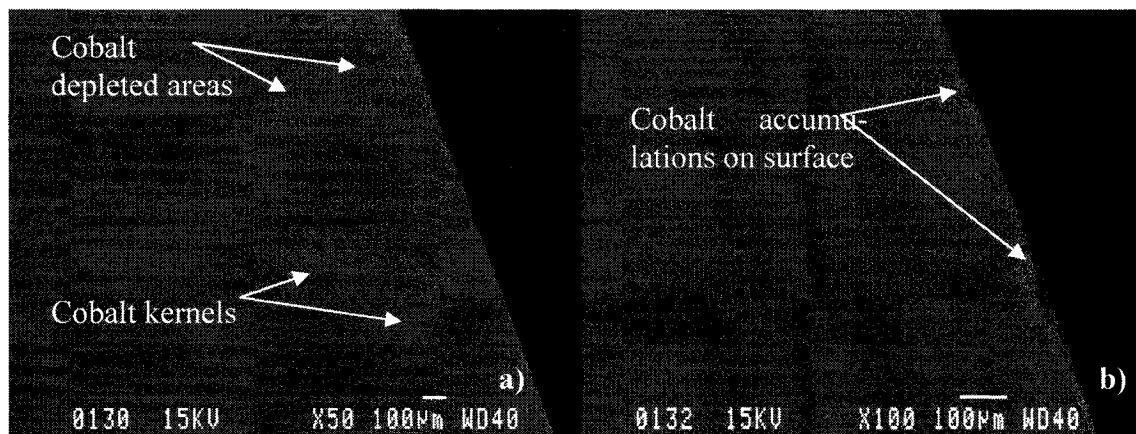
**Figure 5-9** – Aluminum adherences to the tool cutting edge. The form of deposits indicates melting.

#### **Influences of tool material and tool manufacturing process on the diffusion wear**

The tool material structure is one of the major causes for the tool failure. The way the cobalt is distributed within the carbide prior to use greatly influences the time the tool will stand the attack by diffusion. A SEM observation of freshly fractured samples of new cutting edges shows particular patterns of distribution of cobalt within the structure of the tool material.

Two major types of non-uniformities were observed, first a migration of the cobalt towards the ground surface of the tool, due most likely to the overheating of the tool during the process of fabrication or during use and second, a kernel type accumulation of cobalt in the midst of a cobalt-depleted area.

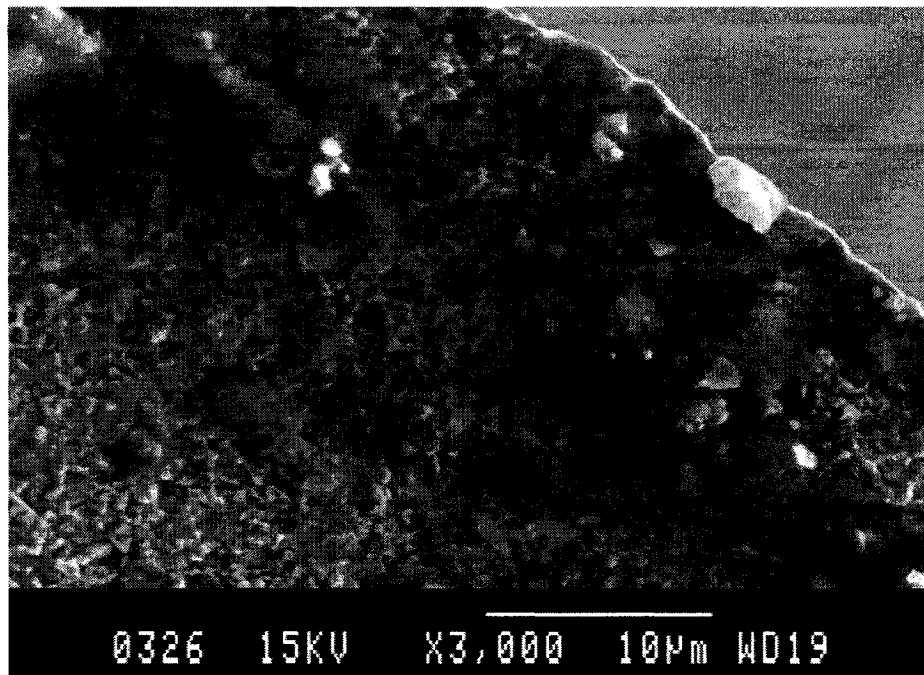
These non-uniformities are related to thermally activated migrations of cobalt during sintering and/or grinding and also to the specific forces and pressures to which the tool or the blank is subjected during fabrication process. The most important is the accumulation of cobalt close under the surface of the tool due to short temperature rise and the reorientation of the carbide grains, due to pressure and friction during grinding the cutting surfaces of the tool. While this alteration could be beneficial sometimes because it allows the tool to be more resilient and is often induced by mirror-like surface polishing, it can also be harmful, because it can lead to unwanted exposure of the cobalt deposits to aluminum attack. This accumulation was observed as shown in Figure 5-10 b) on all samples that were subjected to grinding, coming from different manufacturers. French researchers at ENSAM at Bordeaux were able to detect traces of aluminum up to a depth of 80  $\mu\text{m}$  in the tool material, providing evidence about the exchange of substance between the tool and workpiece material [9], as a form of wear by diffusion. Some companies induce a similar change through HIP technique (Hot Isostatic Pressing).



**Figure 5-10** – Non-uniformities in the distribution of cobalt in the mass of carbide tool; a) kernel type and b) accumulation at the surface

Under the pressure and the friction forces during grinding, the carbide grains tend to get repositioned in such a way that they provide a kind of shield to the active surface of the

tool. Spots with a higher concentration of cobalt were also observed on the surface of the samples. The fact that the structure is similar to the kernels observed in the volume, surrounded by the halo of the cobalt depleted area, show that cobalt was also subjected to migration at high temperatures.



**Figure 5-11** – Important non-uniformity of cobalt distribution close to the ground surface of the tool

On the SEM pictures in back scattered electron mode, the cobalt appears darker than the carbide and the poorer the carbide is in cobalt, the lighter it appears on the pictures. For the kernel type non-uniformities Figure 5-10 a), we can easily observe the dark kernel of cobalt surrounded by a lighter zone, where we found a lower concentration on cobalt than in the rest of the carbide. The explanation could be linked to the technology used for fabrication of the carbide tools. Small hollow spaces left after pressing the material into forms are filled by capillarity with liquid or semi-liquid cobalt drained from the surrounding areas. Same effect can occur at the surface of the tool, due to heat generated

during grinding. A detail of this kind of accumulation is presented in Figure 5-11. The extension on the surface and the depth of these non-uniformities are quite important, prompting to consider that, function of their localization, they can significantly affect tool resistance.

It is possible that, depending on cutting conditions and the heat generated in the cutting process, the redistribution of cobalt can continue during the exploitation of the tool.

### Conclusions

The mechanism of destruction of WC-Co tools during high speed machining of aluminum alloys has certain particularities, which need to be addressed for the next generation of dedicated tools for this kind of machining.

Temperatures higher than those measured directly in the cutting area [10] occur at the contact between tool and chip, due to the adiabatic character of the process. According to the data collected, observations made, such as burnout traces and specific aluminum deposits and simulations performed, we strongly believe that temperatures at the contact chip-rake face of the tool are much higher than supposed until now, perhaps in the melting temperature range of the alloy. The fact that aluminum melts is not necessarily bad, as long as the tool can work at temperatures above 600 °C. The diffusion process, mainly of aluminum in the cobalt of the tool material, is the principal form of wear, by deteriorating the mechanical properties of the cutting edges. The process affects large surfaces on the cutting edges as well as the rake face and the secondary relief face situated on the top of the tool, which are exposed to contact with hot or molten aluminum. Since little physical evidence is visible of that process by optical inspection, the tools are used even after the point where the structure of tool material is degraded.

To protect the tools, a coating should be applied. Many researches indicate that DLC, diamond, aluminum oxide and TiAlN are best suited. Application of these coatings

diminish friction and hence heat generation, providing also the needed chemical barrier between the tool and the aluminum alloy. Even though the durability observed with commercially available coatings like Balzers Balinit Triton® and Balzers Balinit DLC Star® was less than expected, from the industrial process point of view, the application of a chemically inertial coating makes the process safer, since, even if removed from the cutting edges, the coating will protect the rest of the tool tip from the diffusion of aluminum in the cobalt, maintaining keeping the carbide stronger. Since milling offers rather good access to the cutting area and liquid coolant immersion does not seem very effective, mist, compressed air or cryogenic cooling could be searched as part of an optimized solution.

## Bibliography

- [1] Nouari, M., List, G., Girot, F., Coupard, D. – Experimental analysis and optimization of tool wear in dry machining of aluminum alloys, Wear 255 (2003) pp. 1359 – 1368
- [2] \*\*\* - ASM Handbook, Volume 3, Alloy Phase Diagrams, ASM International, 1999
- [3] Boltz, C.L. – Fulmer - Contract research in a competitive world, Internet reference <http://ej.iop.org/links/rcn0YrCTA/vp2HAp1U2xG9ffp4av5vpA/ptv2i1p39.pdf>
- [4] K Zhang, N.-Y. Tang – Research and Development of Pot Bearings in Continuous Galvanizing, F.E. Goodwin, International Lead Zinc Research Organization, 2525 Meridian Parkway, P.O. Box 12036, Research Triangle Park, North Carolina, 27709-2036
- [5] K Zhang, N.-Y. Tang – On the wear of a Cobalt-Based Superalloy in Zinc Baths, Teck Cominco Ltd. Product Technology Centre, 2380 Speakman Drive, Mississauga, Ontario, L5K 1B4, Canada

- [6] Abukshim, N.A., Mativenga, P.T., Sheikh, M.A. – Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining, *Int. J. of Mach. Tools & Manuf.* XX (2005), pp. 1-19
- [7] Richardson, D.J., Keavey, M.A., Dailami, F. – Modelling of cutting induced workpiece temperatures for dry milling, *Int. J. of Mach. Tools & Manuf.*, xx (2005) pp. 1-7
- [8] Calligaro, T. – Analyse chimique par la méthode PIXE, Internet reference <http://www.culture.gouv.fr/culture/conservation/fr/methodes/pixe.htm>
- [9] Nouari, M., List, G., Girot, F., Géhin, D. – Effect of machining parameters and coating on wear mechanisms in dry drilling of aluminum alloys *Int. J. Mach. Tools & Manuf.*, 45 (2005) pp. 1436-1442
- [10] Olson, L., Throne, R., Rost, E. – Improved Inverse Solutions for On-Line Machine Tool Monitoring, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 126, May 2004, pp. 311-316
- [11] Aloke, P. - The Kirkendall Effect in Solid State Diffusion, Ph.D. thesis, Technische Universiteit Eindhoven, 2004, ISBN 90-386-2646-0
- [12] Cremer, R., Mertens, R., Neuschütz, D., Lemmer, O., Frank, M., Leydendecker, T. – Formation of intermetallic cobalt phases in the near surface region of cemented carbides for improved diamond layer deposition, *Thin Solid Films*, 355-356 (1999), pp.127-133

## Chapitre 6 – Discussion générale

Le mémoire présente les résultats d'une recherche déroulée sur une période de plus de deux ans, visant au début de trouver vite une explication pertinente pour les bris répétés des outils pendant l'usinage à grande vitesse des poches dans pièces en aluminium. Les recherches ont conduit par la suite à la découverte du mécanisme d'usure qui était à l'origine des bris des outils qui survenait après peu d'temps d'utilisation.

Ce mécanisme d'usure par adhésion accéléré par la diffusion de l'aluminium dans le matériau de l'outil, où il se combine avec le cobalt est peu étudié, mais une fois dévoilé, peut être évité, prolongeant ainsi la vie des outils et la fiabilité de l'usinage. Les expérimentations mises en œuvre ont produit des résultats convergents avec les hypothèses de la recherche émises des observations avec l'explication élaborée.

La complexité des phénomènes rencontrés pendant la recherche nous a motivé dans la continuation de l'étude, et ont abouti dans la publication d'un article de revue et de deux articles de conférence internationale.

Les trois articles pas seulement qu'expliquent ce phénomène qui nuit beaucoup à la fabrication des pièces en aluminium par usinage à grande vitesse, mais offrent aussi des indications sur les possibilités d'élimination de ses conséquences indésirables. Les articles présentés dans ce mémoire forment une suite, en se complétant réciproquement. Si l'article inclus dans le mémoire est centré sur la confirmation du mécanisme d'usure et présente les essais et les observations faites par microscopie électronique, les articles présentés dans les annexes s'occupent de l'analyse de l'influence de l'adhérence de l'aluminium à la surface des outils, sous forme de couche ou arête rapportée.

Pour intégrer les trois articles, un chapitre appart décrit toutes les expérimentations conduites pendant la recherche, même celles qui n'ont pas été incluses dans les articles publiés. Un sous-chapitre de l'étude bibliographique présente les avances de date récente dans la fabrication des outils pour l'usinage de l'aluminium, ainsi que la technologie de fabrication des carbures, présentant les aspects qui nuisent à la qualité des outils en carbures. Comme plusieurs compagnies ont introduit récemment des outils conçus pour l'usinage à grande vitesse des alliages d'aluminium, on a considéré que une présentation de ces outils est très utile.

Comme mentionné déjà, à part l'usure par diffusion et réaction chimique, d'autres pistes ont été investiguées pendant cette recherche, comme l'influence des stratégies d'entrée des outils de coupe dans le matériau usiné utilisées en production, de la géométrie spécifique de l'outil, des imprécisions pendant la fabrication de l'outil, des efforts de coupe dans des différentes phases d'usure. Aussi, présente les résultats d'un essai effectué avec des outils recouverts de carbone similaire au diamant (DLC).

## Chapitre 7 – Conclusions et recommandations

Le présent mémoire a comme principal but d'éclaircir un mécanisme d'usure moins connu par l'entremise de trois articles publiés dans des revues ou présentés dans des conférences internationales.

Les articles présentés visent une problématique très actuelle, contribuant aux connaissances sur les phénomènes qui accompagnent l'usure pendant l'usinage à grande vitesse des alliages d'aluminium.

On a trouvé ainsi que :

- Il existe une affinité chimique entre le cobalt et l'aluminium, connue par les chimistes mais malheureusement ignorée par les manufacturiers d'outils. À cause du fait que cette affinité se manifeste dans des conditions assez précises, s'agissant d'une transformation de phase du cobalt suivie par la combinaison avec l'aluminium pour former l'aluminure de cobalt (Al-Co), elle n'a été remarquée qu'après le passage à l'usinage à grande vitesse des alliages d'aluminium avec des outils en carbure de tungstène avec du cobalt comme liant (WC-Co). Les températures au contact de l'outil avec le copeau sont plus élevées pendant l'usinage à grande vitesse que pendant l'usinage conventionnel, dans le domaine d'activation de la formation de l'eutectoïde formé du cobalt avec l'aluminure de cobalt.
- L'explication proposée du mécanisme d'usure par adhésion accélérée par la diffusion de l'aluminium dans le cobalt qui sert de liant est pertinente et vient d'être confirmée par les observations du phénomène, en laboratoire et en

production. L'affaiblissement du bout de l'outil causé par l'annihilation de l'effet de liant du cobalt après sa combinaison avec l'aluminium, associée à une distribution non homogène du cobalt sur la surface de l'outil explique les bris d'outils aléatoires, sans observation préliminaire d'usure physique.

- La diffusion de l'aluminium dans le cobalt a été mise en évidence par ses effets, mais une confirmation par analyse quantitative n'a pas été possible encore. Les effets observés montrent que la diffusion de l'aluminium et du cobalt augmente avec la température et le temps d'exposition.
- L'effet destructif du contact avec l'aluminium fondu et même avec les vapeurs d'aluminium a été prouvé pendant des essais. Cet effet est dû surtout à la variation de volume, suite à la formation de l'eutectoïde contenant du cobalt et de l'aluminure de cobalt Al-Co à des températures élevées. La densité du cobalt avec une densité est de  $8,84 \text{ g/cm}^3$  pour  $\varepsilon\text{-Co}$ , à la température normale ou  $8,79 \text{ g/cm}^3$  pour  $\alpha\text{-Co}$  au dessus de  $300^\circ\text{C}$ . La densité de l'aluminure de cobalt est de  $6,09 \text{ g/cm}^3$ . Cette transformation produit un gonflement du liant important, qui détruit le cobalt comme liant. En plus, l'aluminure de cobalt est un composé intermétallique, catégorie des produits qui sont notoirement fragiles.
- Les conditions pour l'apparition de l'usure par diffusion sont rencontrées pendant l'usinage à grande vitesse des alliages d'aluminium. La température à l'interface entre l'outil et le copeau est estimée à près de  $600^\circ\text{C}$ , proche du point de fusion de l'alliage. Cette température a été calculée par des modélisations par éléments finis et constatée par les traces laissées sur l'outil par l'échauffement. L'augmentation de la température est significative avec l'augmentation de la vitesse de coupe et le liquide de refroidissement n'atteint pas les zones plus exposées, ce qui le rend inutile.

- La tendance actuelle est d'éliminer le liquide de refroidissement, qui est coûteux et inutile dans la situation mentionnée. Cette élimination pourrait entraîner des économies qui compenseraient l'investissement dans les outils de nouvelle génération, fabriqués utilisant des technologies de pointe, très récentes.
- Dans les conditions quand on pense à augmenter la vitesse de coupe, l'utilisation des outils d'ancienne génération implique des risques importants pour l'intégrité des machines et des personnes et de pertes de productivité significatives à cause des bris répétés.

Des résultats de ce mémoire peuvent bénéficier notamment :

- les manufacturiers d'outils, qui pourraient fabriquer des outils améliorés tenant compte des recommandations issues de cette recherche.
- les utilisateurs des outils de coupe en carbure, qui fabriquent des pièces en aluminium, qui pourraient choisir maintenant des outils qui seraient plus durables que les outils d'ancienne génération.
- Les ingénieurs des bureaux des méthodes, qui pourraient choisir de outils et des paramètres de coupe permettant des moindres coûts et une durée de vie optimale de l'outil.

Le domaine de cette recherche n'est pas clos et beaucoup reste à faire. Parmi les plus importantes et les plus urgentes, j'aimerais mentionner :

- une étude plus poussée sur la pénétration de l'aluminium dans le matériau de l'outil. Les chercheurs qui ont retrouvé l'aluminium jusqu'à 80  $\mu\text{m}$  de profondeur dans le matériau de l'outil ont utilisé une technique très spéciale et coûteuse, appelée PIXE (Particle Induced X-ray Emission), qui n'est pas disponible à Montréal. À cause du fait que le contenu en aluminium est très faible par rapport au cobalt (le Al-Co se forme à moins de 3 % d'aluminium dans

le cobalt) et qu'à son tour le cobalt ne représente que 10-12 % du de la composition des carbures utilisés pour la fabrication des outils, la radiation reflétée par l'aluminium pénétré dans la masse du matériau de l'outil reste sous le seuil de détection pour les installations disponibles pendant cette recherche. Par contre, on a pu observer les cavités laissées par le départ de l'aluminium, par un mécanisme similaire à l'effet Kirkendall.

- L'étude de l'influence des stratégies d'entrée de l'outil dans la matière à usiner, qui est déjà entamée et qui doit être finalisée dans un autre article de revue.
- Une étude plus approfondie sur les recouvrements qui pourraient être appliqués sur la surface de l'outil pour la protéger de l'usure par diffusion. Aussi, cette étude devrait couvrir l'usinage à sec, qui est une tendance qui s'imposera dans le futur proche.
- Une étude sur la qualité de surface pour l'usinage à sec à grande vitesse, tenant compte des modifications de la géométrie de l'outil qu'on pourrait apporter.

## Bibliographie

- [1] Tlusty, J., Masood, Z. – Chipping and Breakage of carbide tools, ASME Journal of Engineering for Ind., Vol. 100, 1978, pp. 403-412
- [2] Smith, Scott – High Speed Aluminum machining, notes de conference, IMTS 08-09 2000
- [3] Takagi, J., Shaw, M.C. – Tensile Fracture Loci for Brittle Materials Containing Spherical Voids, ASME Journal of Engineering Materials and Technology, vol. 105, 1983, pp 143-149
- [4] Avery, J.P., Shaw, M.C. – Tensile fracture loci for brittle materials containing spherical voids, ASME J. of Eng. Mat. & Tech., vol. 108, 1986, pp. 403-412
- [5] Masuda, M., Kuroshima, Y., Chujo, Y. – Failure of tungsten carbide alloy tools in machining of carbon materials, Wear, vol. 169 (2), Oct. 1993 pp. 135-140
- [6] K Zhang, N.-Y. Tang – Research and Development of Pot Bearings in Continuous Galvanizing, F.E. Goodwin, International Lead Zinc Research Organization, 2525 Meridian Parkway, P.O. Box 12036, Research Triangle Park, North Carolina, 27709-2036
- [7] K Zhang, N.-Y. Tang – On the wear of a Cobalt-Based Superalloy in Zinc Baths, Teck Cominco Ltd. Product Technology Centre, 2380 Speakman Drive, Missisauga, Ontario, L5K 1B4, Canada
- [8] Nouari, M., List, G., Girot, F., Géhin, D. – Effect of machining parameters and coating on wear mechanisms in dry drilling of aluminum alloys Int. J. Mach. Tools & Manuf., 45 (2005) pp. 1436-1442
- [9] Sato, N. *et al.* – Adhesion of Aluminum to Tungsten Carbide-Cobalt Tools (Fuji Die Co, Hadano, Japan) J. Jpn. Soc. Powder, Powder Metallurgy, vol. 44, No. 4, 1997, 365-368

- [10] Girot, F., Géhin, D. – Perçage à sec des alliages d'aluminium aéronautiques, Mécanique et Industries 3 (2002) pp. 301-313
- [11] Nouari, M., List, G., Girot, F., Coupard, D. – Experimental analysis and optimization of tool wear in dry machining of aluminum alloys, Wear 255 (2003) pp. 1359 – 1368
- [12] Richardson, D.J., Keavey, M.A., Dailami, F. - Modeling of cutting induced workpiece temperatures for dry milling, Int. J. of Machine Tools & Manuf. XX (2005) pp. 1-7
- [13] Abuksim, N.A., Mativenga, P.T., Sheikh, M.A. – Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining, Int. J. of Mach. Tools & Manuf. XX (2005), pp. 1-19
- [14] Coldwell, H.L., Dewes, R.C., Aspinwall, D.K., Renevier, N.M., Teer, D.G. – The use of soft/lubricating coatings when dry drilling BS L168 aluminum alloy, Surface & Coatings Technology, 177-178 (2004), pp. 716-726
- [15] Dasch, J., Ang, C.C., Wong, Cheng, Y.T., Weiner, A.M., Lev, L.C., Konca, E. – A comparison of five categories of carbon-based tool coatings for dry drilling of aluminum, Surface & Coatings Technology, 200 (2006), pp.2970-2997
- [16] Wain, N., Thomas, N.R., Hickman, S., Wallbank, J., Teer, D.G. – Performance of Low Friction Coatings in the Dry Drilling of Automotive Al-Si Alloys, Surface & Coatings Technology 200 (2005) pp. 1885-1892
- [17] Fukui, H., Okida, J., Omori, N., Moriguchi, H., Tsuda, K. – Cutting performance of DLC coated tools in dry machining aluminum alloys, Surface & Coatings Technology, 187 (2004) pp.70-76
- [18] Lahres, M., Jörgensen, G. – Properties and dry cutting performance of diamond-coated tools, Surface & Coatings Technology, 96 (1997), pp. 198-204
- [19] Sahoo, B., Chattopadhyay A.K., Chattopadhyay, A.B. – Development of diamond coated

- tool and its performance in machining Al-11Si% alloy, *Bull. Mater. Sci.*, vol. 25, No. 6, November 2002, pp. 487-491
- [20] Altintas, Y. *Manufacturing Automation - Metal Cutting Mechanics, Machine Tools Vibrations and CNC Design*, Cambridge University Press, 2000
- [21] Ramarj, T.C. – Tool and workpiece fracture in interrupted cutting - *These de doctorat, Université d'état d'Arizona*, 1987, document Proquest 8722026
- [22] Wu, Y., Escandre, P., Du, R. – A new method for real-time tool condition monitoring in transfer machining stations, *J. of Manuf. Sci & Eng.*, vol. 123 (May 2001), pp. 339-347
- [23] Yen, Y-C., Jain, A., Altan, T. – A finite element analysis of orthogonal machining using different tool edge geometries, *J. of Mat. Process. Tech.*, 146 (2004), pp72-81
- [24] Altintas, Y. – Prediction of cutting force and tool breakage in milling from feed drive current measurements, *ASME J. Eng. Ind.*, vol. 114 (1992), no. 4, pp. 386-392
- [25] Fang, N., Wu, Q. – The effects of chamfered and honed tool edge geometry in machining of three aluminum alloys, *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, 45 (2005), pp. 1178-1187
- [26] Choudhury, I.A., See, N.L., Zukhairi, M. – Machining with chamfered tools, *J. of Mat. Process. Tech.*, 170 (2005), pp. 115-120
- [27] Mesina, O.S., Langari, R. – A neuro-fuzzy system for tool condition monitoring in metal cutting, *ASME J. of Manuf. Sci. & Eng.*, Vol. 123 (May 2001), pp. 312-318
- [28] Zhou, J.M., Andersson, M., Ståhl, J.E. – A system for monitoring cutting tool spontaneous failure based on stress estimation, *J. of Mat. Proc. Tech.*, vol. 48 (1995), pp.231-237
- [29] Olson, L., Throne, R., Rost, E. – Improved inverse solutions for on-line machine tool monitoring, *J. Manuf. Sci. & Eng.* Vol. 126 (May 2004), pp. 311-316

- [30] Choi, T., Shin, Y.C. – On-line chatter detection using wavelet-based parameter estimation, J. Manuf. Sci. & Eng. Vol. 125 (Feb 2003), pp. 21-28
- [31] Choi, Y.H. – Process monitoring in end milling, doctorate these, Iowa State University, 2003
- [32] Ng, C.K., Melkote, S.N., Rahman, M., Kumar A.S. – Experimental study of micro- and nano-scale cutting of aluminum 7075-T6, Int. J. of Mach. Tools & Manuf., xx (2005), pp.1-8
- [33] Kim, J.D., Kang, Y.H. – High Speed Machining of Aluminum Using Diamond Endmills, Int. J. Mach. Tools Manuf. Vol. 37 (1997), no. 8, pp. 1155-1165
- [34] Youn, J.-W., Yang, M.-Y. – A Study on the Relationships Between Static/Dynamic Cutting Force components and Tool Wear, J. Manuf. Sc. Eng. Vol. 123, (2001), pp. 196-205
- [35] Ozdoganlar, O.B., Endres, W.J. – An Analytical Representation of Chip Area for Corner-Radiused Tools under Both Depth-of-Cut and Feed Variations, J. Manuf. Sc. Eng. , vol. 122, Nov. 2000, pp. 251-261
- [36] Mativenga, P.T., Hon, K.K.B. – An Experimental Study of Cutting Forces in High Speed End Milling and Implications for Dynamic Force Modeling, J. Manuf. Sc. Eng. Vol. 127, Mai 2000, pp. 251-261
- [37] Elbestawi, M.A., Papazafiou, T.A., Du, R.X. – In-Process Monitoring of Tool Wear in Milling Using Cutting Force Signature, Int. J. Mach. Tool Manuf., 31(1), 1991, pp 55-73
- [38] Sarhan, A., Sayed, R., Nassr, A.A., El-Zahry, R.M. – Interrelationships between Cutting Force Variation and Tool Wear in End Milling, J. Mater. Proc. Tech. 109, 2001 pp. 229-235

- [39] McGee, F.J., High Speed Machining Study: Methods for Aluminum Work-pieces, Am. Machinist, 12, March 1979
- [40] El-Wardany, T.I., Mohammed, E., Elbestawi, M.A. – Cutting Temperatures of Ceramic tools in High Speed Machining of Difficult-to-Cut Materials, Int. J. Mach. Tools Manuf., 1996, 35(5), pp 611-634
- [41] Dewes, R.C., Ng, E., Chua, K.S., Newton, P.G., Aspinwall, D.K., Temperature Measurement When High Speed Machining (HSM) Hardened Mould and Die Steel, Adv. Mater. Proc. Technol., 1997, 2, pp. 514-521
- [42] Schultz, H. High Speed Machining, Carl Hanser Verlag, Munich, 1996, pp. 43-45
- [43] Friedrichs, K., New Carbide Materials for Difficult Cutting Operations, accepted paper to CIRP 2nd International Conference on High Performance Cutting, 2006
- [44] Marusich, T.D., Finite Element Simulation of High-Speed Machining Processes, Ph.D. Dissertation, Brown University, USA, 1993
- [45] Yu, Q.H., Acoustic Emission: Measurement and Analysis for Metal Cutting, Ph.D. Dissertation, Washington State University, USA, 1988
- [46] Schmidt, C., Yen, E., Tool Wear Prediction and Verification in Orthogonal Cutting, papers of 6<sup>th</sup> CIRP Tool Wear Conference, Toronto, May 2003
- [47] Doi, Y., Properties of carburized ultra fine tungsten carbide, Metal Powder Report, Vol. 53, N. 6, June 1998, Elsevier
- [48] Laptev, A.V., Strength and toughness of tungsten carbide-cobalt, Metal Powder Report, Vol. 53, N. 6, June 1998, Elsevier
- [49] Rosen, A., Sinter-HIP treatment of nanocrystalline tungsten carbide, Metal Powder Report, Vol. 53, N. 6, June 1998, Elsevier

- [50] Allen, C., Toughness of nanocrystalline tungsten carbide-cobalt, Metal Powder Report, Vol. 53, N. 6, June 1998, Elsevier
- [51] Martinez, J.L., The nature of fractals, article présenté sur <http://www.fractovia.org>
- [52] Sahoo, P., Chowdhury, S.K.R, A fractal analysis of adhesive wear at the contact between rough solids, Int'l Journal of Wear, 253 (2002), pp. 924-934
- [53] Kang, M.C., Kim, J.S., Kim, K.H., Fractal dimension analysis of machined surface depending on coated tool wear, Int'l Journal of Wear, 193 (2005), pp. 259-265
- [54] Raman, S., Longstreet, A., Guha, D., A fractal view of tool-chip interfacial friction in machining, Int'l Journal of Wear, 253 (2002), pp. 1111-1120
- [55] Khadke, A., Ghosh, S., Li, M., Numerical simulations and Design of Shearing Process for Aluminum Alloys, Transactions of ASME, Vol. 127, August 2005, pp. 612-621
- [56] Référence Internet : <http://www.therightcarbide.com/superc.htm>
- [57] Référence Internet : <http://www.nittan.co.jp/en/tech/techinfo/hip.html>
- [58] Référence Internet : [http://204.154.137.14/technologies/oil-gas/publications/EPreports/DCS/41023\\_PPTReport.pdf](http://204.154.137.14/technologies/oil-gas/publications/EPreports/DCS/41023_PPTReport.pdf)
- [59] VaradaRajan, Y.S., Vijayaraghavan, L., Krishnamurthy, R., Bhanuprasad, V.V., Performance enhancement through microwave irradiation of K20 carbide tool machining Al/SiC metal matrix composite, Journal of Materials Processing Technology , Vol. 173, Issue 2 , 10 April 2006, pp. 185-193
- [60] Aloke, P. - The Kirkendall Effect in Solid State Diffusion, Ph.D. thesis, Technische Universiteit Eindhoven, 2004, ISBN 90-386-2646-0

- [61] Eremenko, V.N., Lesnik, N.D., Ivanova, T.S. – Contact Reactions of the Iron-Group Metals with Aluminum-Base Melts, Institute of Materials Science, Academy of the Ukrainian SSR, No. 7 (175), pp. 46-50, July 1977, UDC 541.532.264:669.71
- [62] Référence Internet : [http://meweb.ecn.purdue.edu/~simlink/hsm\\_web.pdf](http://meweb.ecn.purdue.edu/~simlink/hsm_web.pdf)
- [63] Rao, B., Shin, Y. C., Analysis on high-speed face-milling of 7075-T6 aluminum using carbide and diamond cutters, Intl. J. of Mach. Tools & Manuf. 41 (2001) pp. 1763–1781
- [64] Agrawal, D. and Roy, R., Development of Advanced Drill Components for BHA Using Microwave Technology Incorporating Carbide, Diamond Composites and Functionally Graded Materials, Research Contract DE-FC26-97FT34366, Microwave Processing and Engineering Center, Materials Research Laboratory, The Pennsylvania State University, Final report, November 2000

**Annexes**

## **Annexe 1 – Method for Analyzing the Effects of Aluminum Build-Up on Tungsten Carbide Tools Behavior**

Ce chapitre présente une méthodologie pour analyser les efforts de coupe pour le fraisage des poches pour un trajet reproduisant un coin d'une poche usinée selon les spécifications en vigueur à Bombardier Aéronautique.

Les efforts de coupe sont difficiles à interpréter, dans la forme qu'on enregistre à la sortie de l'équipement d'acquisition des données. Pour traiter les données on a élaboré des programmes en Matlab® qui permettent la mise en évidence de la force moyenne et de la composante variable du signal.

Cette méthodologie a permis déjà l'identification de l'influence de l'adhérence de l'aluminium sur les efforts de coupe, ainsi que la compréhension des phénomènes transitoires qui se produisent à l'entrée et à la sortie de l'outil. Ces observations nous ont permis de conclure que l'arête rapportée sur les outils en carbure est à l'origine de l'augmentation des efforts de coupe et que leur influence est située au niveau de la composante variable. L'adhésion est très forte car il prend beaucoup de passages de la dent pour se former et pour se détacher. Une autre conclusion importante est que la rentrée et surtout la sortie de l'outil du contact avec la pièce usinée produit une composante dynamique plus importante que celle qui apparaît pendant l'usinage de l'arrondi du coin où le ralentissement de la machine contribue à la diminution des efforts de coupe.

L'article a été envoyé pour présentation et publication dans le compte-rendu du 21<sup>ème</sup> Congrès Canadien de Mécanique Appliquée CANCAM '07, à l'Université Ryerson à Toronto. Seulement le format du article a été changé pour améliorer la lisibilité.

## **Method for Analyzing the Effects of Aluminum Build-Up on Tungsten Carbide Tools Behavior**

*Victor Dorel Călătoru<sup>1</sup>, Marek Balazinski<sup>2</sup>, René Mayer<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>École Polytechnique de Montréal, victor-dorel.calatoru@polymtl.ca

<sup>2</sup> École Polytechnique de Montréal, marek.balazinski@polymtl.ca

<sup>3</sup> École Polytechnique de Montréal, rene.mayer@polymtl.ca

### **1. Introduction**

The aeronautical industry is looking with much interest to high speed machining of aluminum because of the need to carve more efficiently large aircraft structural components out of solid aluminum alloys blocks. Regularly the operation is performed by pocketing, on CNC machining centers, using tungsten carbide with cobalt as binder (WC-Co) end mills.

Several problems arise from the quick shift to a new technology, due to the novelty of the technology and to the fact that tool manufacturers need to adapt themselves to the change. Thus, a critical situation was reported by a large aeronautical company, when carbide tools broke completely or chipped earlier than their life expectancy, becoming thus unusable. Due to the random occurrence of the chipping, tools were either kept in service until they broke completely or replaced as soon as the chipping was observed, which occurred sometime very early in the process. The situation occurred after an important increase of the cutting speed of the tools, which was in the limits suggested by manufacturer. No other trace of surface wear on the rake or relief surfaces was observable at microphotography or microscopic observation than the tungsten carbide (WC) grains affected during grinding. After decreasing the cutting speed from 18000 rpm down to 11060 rpm, with the subsequent loss in productivity, the catastrophic

failure ceased, but the chipping continued. Most frequently, the chipping occurred in the place shown in

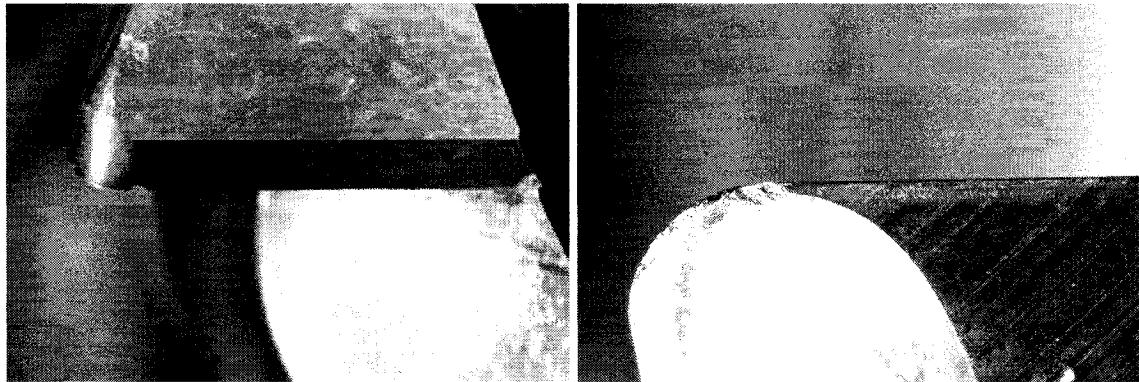


Figure A1-0-1.

**Figure A1-0-1** – Typical chipping of the cutting edge of the tool, axial view (left), rake face view (right)

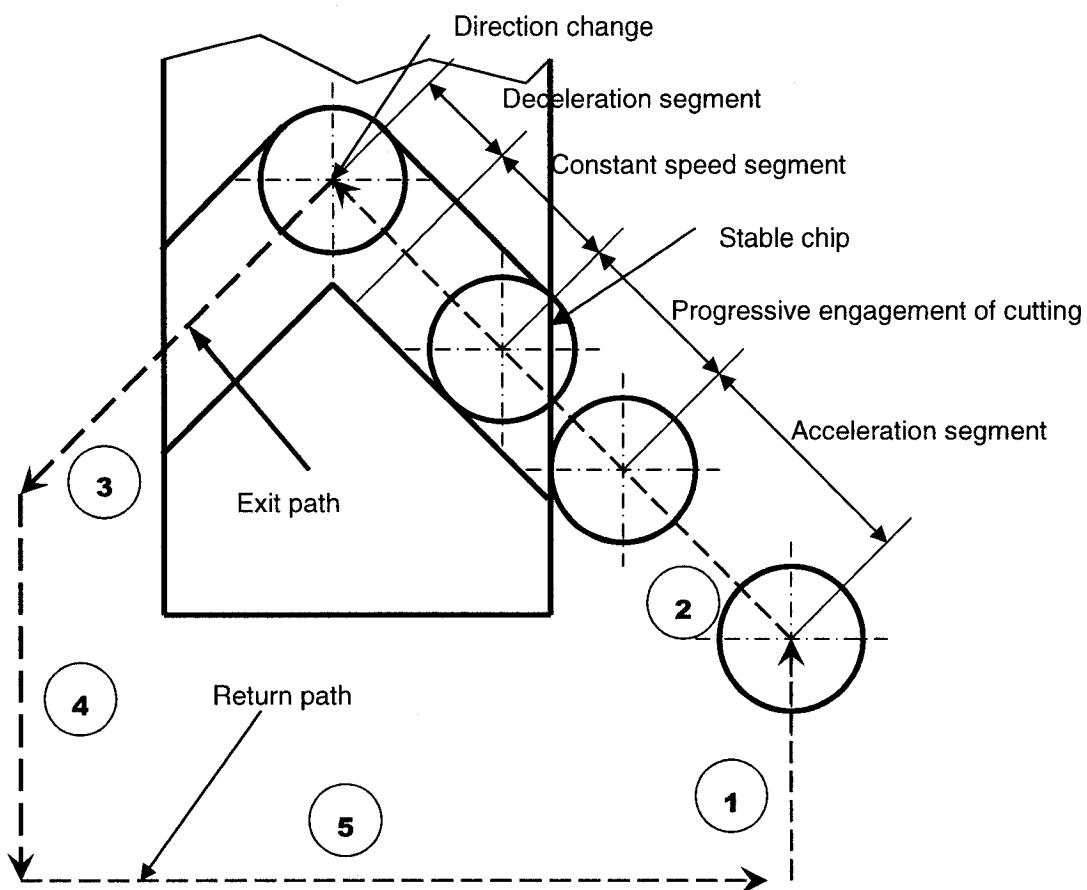
The objective of the study was to determine the causes of these failures and find ways to eliminate them. But before any consistent observation could be made, a method to compare behavior of different tools considered identical had to be set up. This paper presents the method used to monitor the tool behavior and some of the results of the observations made. The method is complementary to that presented in [1] in that the analysis of transitory regimes was also covered.

## 2. Method used

The tools included in the study were 4 end mills with 3 flutes, 19.05 mm diameter, with rounded corners with a radius of 1.6 mm. The speed tested was 11,060 rpm.

Because the main operation performed was pocketing, a path in the form of the letter “V” was chosen as in Figure A1-0-2. This involved a full speed engagement at  $45^\circ$ , a  $90^\circ$  turn with a radius of 12.5 mm with no programmed feed decrease, following the strategy used for pocket corners at the manufacturer and a full speed exit at  $45^\circ$ . The

feed used was 10 m/min with axial depths of cut of 0.381 mm and 0.762 mm, full immersion and half immersion. The depths of cut, smaller than the ones found currently in production, were selected on purpose, to highlight the effect of the tool tip geometry, especially the narrow rake face extended in the portion where tool chipped, on the cutting forces. The width of the sample was 125 mm, allowing straight lines long enough to reach stability at maximum feed both before and after the corner.



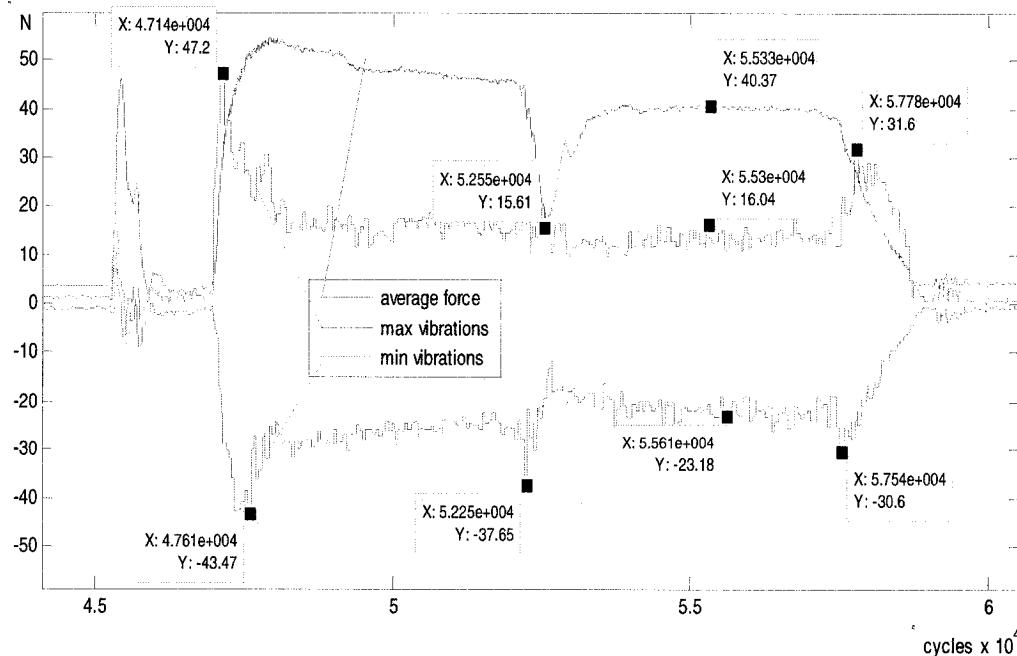
**Figure A1-0-2 - Tool path for cutting tests**

A dynamometric table Kistler 9255 was used to measure cutting forces. The force signals were treated using a multi-channel charge amplifier Kistler 5017 that transferred the signal to a NI PXI 1042 chassis equipped with a NI PXI 4472 data acquisition card. The signals for the forces on the three axes were recorded separate for each channel using a program built in Labview. Also, signals for acoustic emission, vibration and

sonic pressure were recorded, but the most reliable data came from force signals. Data was processed using original Matlab encoding, in order to measure average forces on all segments of the cut and the variable component overlapped to the average force. The FFT spectra for force variation were also produced, to verify the distribution of harmonics of flute passages.

### 3. Results

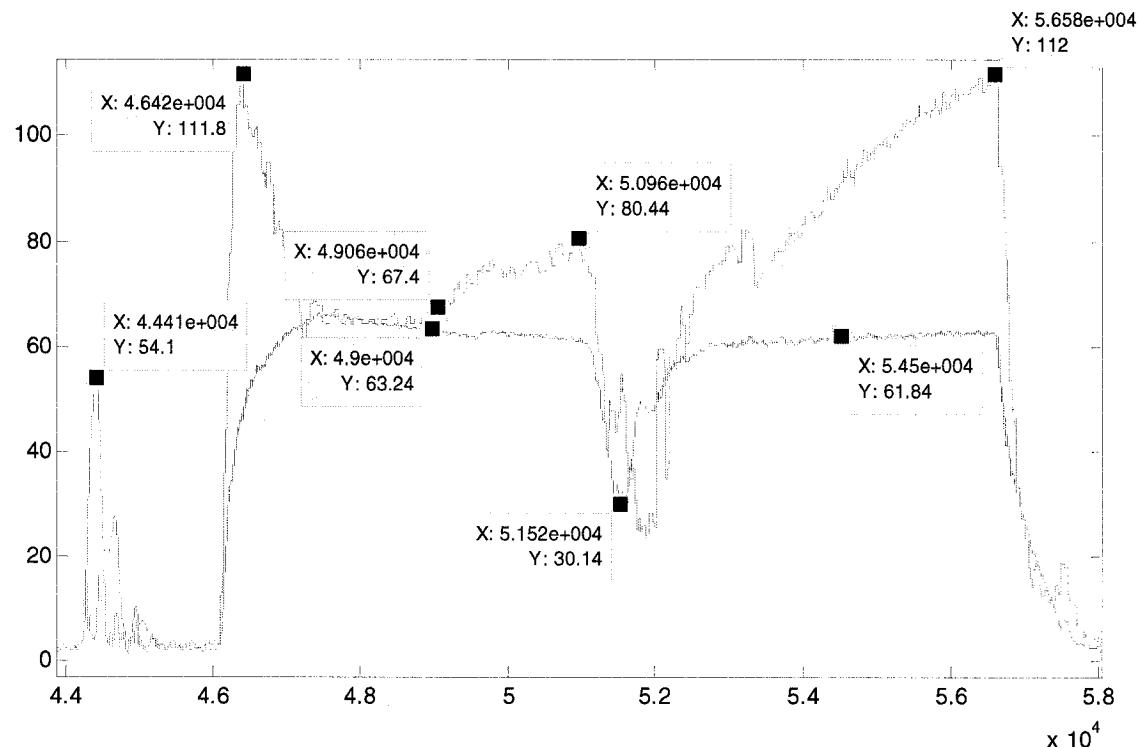
Typical processed data is presented in Figure A1-0-3. Due to deceleration imposed by the controller at the change of direction, average force is actually smaller at that point than it is on the straight stable portions of the path, because the chip section is smaller. At the entry and exit the average force varies smoothly but the variable component presents a peak, confirming observations cited by Ramarj [2]. When aluminum is building up on the surfaces of the tool, the variable component (the difference between the maximums retained for one complete revolution of the tool and the corresponding minimum) presents important variations, while the average is little or not at all affected, as in Figure A1-0-4.



**Figure A1-0-3** – Force measurement results: average, maximum and minimum of

### variable component (vibrations) envelope

The situation occurs around 400 minutes of industrial use of the tool, but it is not present for new tools or after 200 or 600 minutes of factory use. This behavior is related to the conditions favoring severe adhesion of aluminum, which are not met for new tools and tend to vanish after longer use, due to removal of the cobalt smear of the tool surface. The presence of this condition of the tool material was confirmed by an important attenuation or complete disappearance of higher rank harmonics of the FFT signal and by friction essays showing that concentration of cobalt on the surface is reduced by half after intense friction with aluminum.



**Figure A1-0-4 –** Variable component of the cutting force when aluminum is building up on the tool surfaces

### 4. Conclusions

The study of the average force alone is not relevant to determine if a tool works within

the prescribed parameters or not. The dynamic [3] or variable component that adds to the average can be more destructive, because negative forces may remove carbide grains from the tool surface, especially when the build-up is very adherent, as it is the case with aluminum to the cobalt contained in carbide tools. Equally, the summing of the average force with the maximal variable component might locally exceed the stress allowed on the tool lip.

The method proposed allowed already to explain the behavior observed and link it to other pertinent studies.

### **Acknowledgements**

This work was funded by CRIAQ project grant 1.8 with equipments funded by Canadian Foundation for Innovation Grant FCI-3000.

### **References**

- [1] Mativenga, P.T.; Hon, K.K.B.; "An Experimental Study of Cutting Forces in High Speed End Milling and Implications for Dynamic Force Modeling", In *J. Manuf. Sc. Eng.* Vol. 127, pp. 251-261, (2000).
- [2] Ramarj, T.C.; *"Tool and workpiece fracture in interrupted cutting"*, Ph.D. thesis, Arizona State University, 1987
- [3] Youn, J.-W.; Yang, M.-Y.; "A Study on the Relationships between Static/Dynamic Cutting force components and Tool Wear", *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 123, May, pp. 196-205, (2001)

## **Annexe 2 – Aspects of the Tool Wear of Carbide Tools during High Speed Machining of Aluminum Alloys**

Ce chapitre contient un article qui applique la méthodologie présentée dans le chapitre précédent, pour donner une évaluation quantitative de l'influence de la couche d'aluminium déposée sur la surface de l'outil et surtout de l'arête rapportée qui se forme pendant l'usinage.

Les essais effectués montrent que l'usure par abrasion n'est pas détectable ni par l'influence sur les forces de coupe ni par des moyens optiques, étant presque négligeable. Par contre, on observe une croissance aléatoire de la composante dynamique de la force pour tous les essais effectués après environ 400 minutes. L'arête rapportée se forme et se détache en permanence, avec une périodicité plus grande que le passage des dents, à cause de la forte adhésion à la surface de l'outil. Les graphiques présentés pour une combinaison des paramètres de coupe choisis pour les essais sont représentatifs, la même situation étant retrouvée pour d'autres combinaisons aussi.

Pour expliquer ce comportement, un essai de frottement entre le matériau de l'outil et l'alliage usiné a été effectué. Les concentrations apparentes des éléments chimiques sur la surface de l'outil montre que l'adhésion est très rapide mais l'influence n'est pas très forte au début, mais qu'elle augmente après quelques minutes jusqu'au point où l'adhérence de l'aluminium à l'outil est plus forte que dans la masse de la pièce en aluminium. Après 20 minutes l'aluminium commence à se détacher, laissant la surface polie. Cette variation de l'adhérence est accompagnée par la variation du contenu du cobalt exposé, qui diminue de moitié par rapport à la référence à la fin de l'essai.

L'article a été envoyé pour présentation et publication au 21<sup>ème</sup> Congrès Canadien de Mécanique Appliquée CANCAM '07, à l'Université Ryerson à Toronto.

## Aspects of the Tool Wear of Carbide Tools during High Speed Machining of Aluminum Alloys

*Victor Dorel Călătoru<sup>1</sup>, Marek Bałazinski<sup>2</sup>, René Mayer<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>École Polytechnique de Montréal, victor-dorel.calatoru@polymtl.ca

<sup>2</sup> École Polytechnique de Montréal, marek.bałazinski@polymtl.ca

<sup>3</sup> École Polytechnique de Montréal, rene.mayer@polymtl.ca

### 1. Introduction

Carbide tools are used successfully for cutting much harder materials, while aluminum alloys, even aeronautical grades, are rather soft. Yet, the wear phenomena are strong for this combination of tool material – workpiece, which is more common in industry than ever.

The objective of this paper is to present some of the aspects of the diffusion wear observed. One of the important observations was that, due to high temperatures developed locally during cutting of the aluminum alloys, the cobalt present in the carbide as binder migrates towards the tool surface where it combines with aluminum, being washed off afterwards. Adhesion phenomena are related to the presence of cobalt on the tool surface and chipping is a consequence of localized cobalt depletion of the tool material, which makes the tool less resilient.

During cutting tests related to pocketing, a worsening of the cutting conditions was observed after 400 minutes of use. This condition disappeared later, after 600 minutes the tools behaving closer to the initial state. These observations confirm a pattern of a particular form of catastrophic wear observed during high speed machining (HSM) of aeronautical aluminum alloys with tungsten carbide with cobalt as binder (WC-Co) tools, where tools either collapsed early in their lifespan or lasted until replaced, around

1400 minutes. A friction test was performed to verify the surface state change, confirming that the presence of the cobalt smear on the surface was present after tool heating and contributed to massive aluminum build-up on the tool surface. FFT spectra showed that perturbations in the cutting force were accompanied by a decrease in the amplitude of higher rank harmonics of the tool flutes passage, behavior consistent with a damping effect of those vibrations due to aluminum build-up.

## **2. Experimental method**

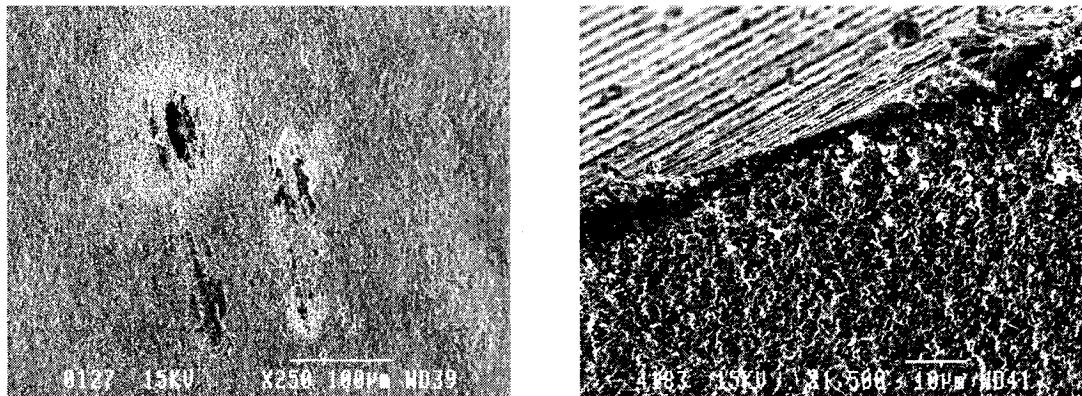
The cutting forces were measured for new tools and after 200, 400 and 600 minutes of industrial use respectively, using a dynamometric table Kistler 9255. A multi-channel charge amplifier Kistler 5017 was used to condition the force signals, which were transferred afterwards to a NI PXI 1042 chassis equipped with a NI PXI 4472 data acquisition card, where data was stored. The tests were repeated for four sets of cutting parameters, combinations of axial depths of cut of 0.381 mm and 0.762 mm and radial half and full immersion respectively. Cutting speed was set at 11060 RPM and feed at 10 m/min.

Average force signal and the maximum and the minimum of the variable component superposed to that in the X-Y plane (perpendicular to the axis of the tool) were calculated. The envelope of the amplitude of the variable component was traced over the running average of the force signal over a full rotation of the tool.

Friction tests were intended to reproduce in the laboratory the effect of prolonged friction between aluminum and the tool material and to detect if the wash out of the cobalt eliminated the adherence of the aluminum to the tool.

Previously, two kinds of non-uniformities in the cobalt distribution among the carbide grains in the tool material, as shown in Figure A2-0-1, originating in the process of fabrication of the tool were observed. The first is the kernel type non-uniformity,

consistent with migration of cobalt in the void spaces during the sintering of the carbide and an infiltration of cobalt toward the surface during the grinding process, due to excessive heating.



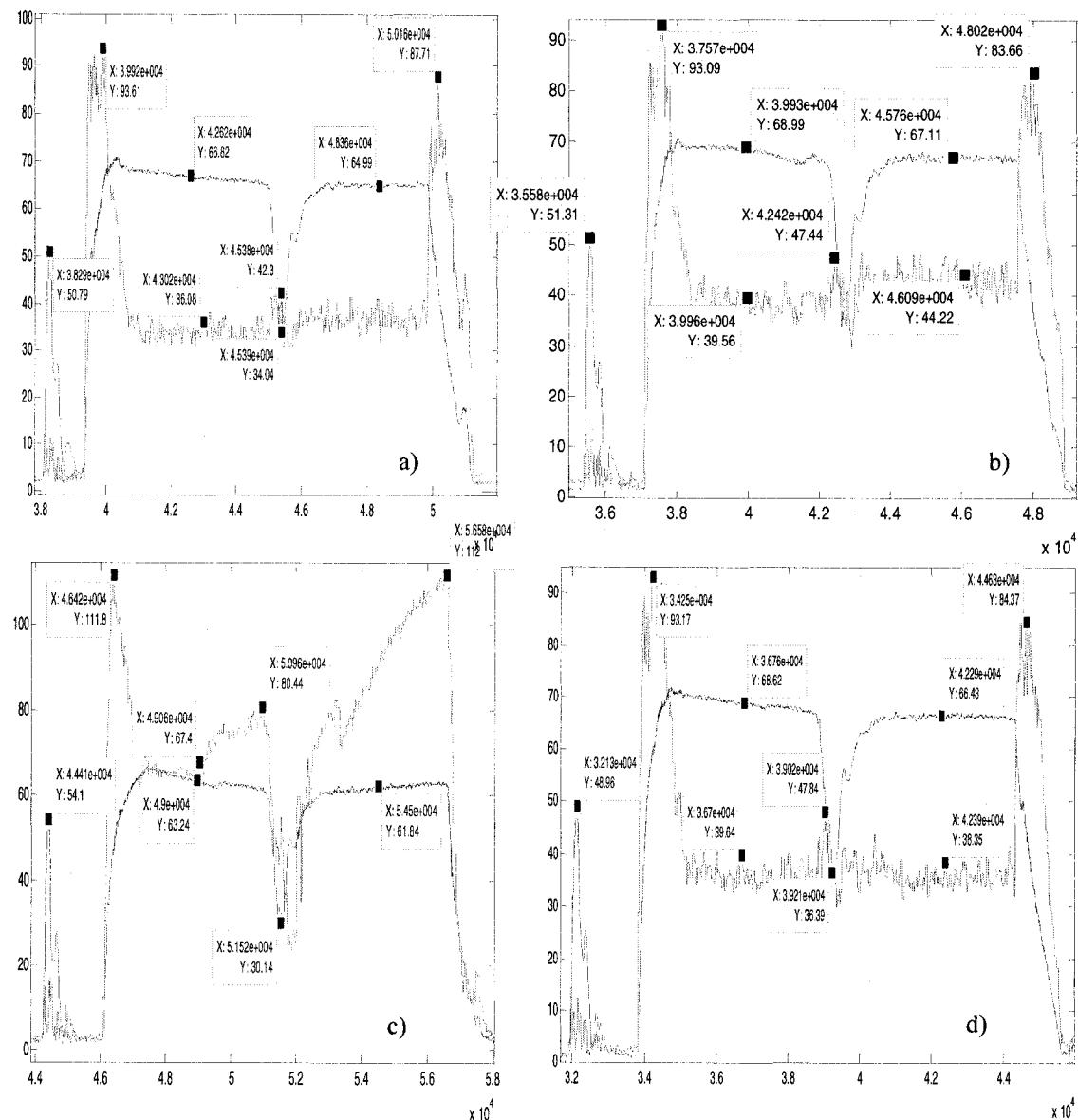
**Figure A2-0-1** – Non-uniformities in the distribution of cobalt in the tool material: left – kernel type, right infiltration to surface

The second type of non-uniformity contributes to the adhesion of aluminum to the surface of the tool because it leaves the cobalt exposed. Aluminum has an affinity for the cobalt, forming with it a solid solution at temperatures higher than 300 °C. Nouari et al. [1] also found that aluminum penetrates up to a depth of 80 µm from the surface in the tool material, as carbides are not compact but rather a porous material, combining with cobalt and forming a cobalt aluminide (CoAl).

### ***2.1 Evolution of cutting forces and FFT spectra***

The cutting forces were combined into a resultant in the X-Y plane, perpendicular to the tool axis, and the average force and the amplitude of the variable component of the resultant force were calculated. Graphs in Figure A2-0-2 present this evolution for one tool of the lot of 4 tested. The average force was stable for the four tests but the variable component became more irregular after 200 minutes and completely erratic at 400 minutes, only to return to normal after 600 minutes. The FFT spectra (not shown)

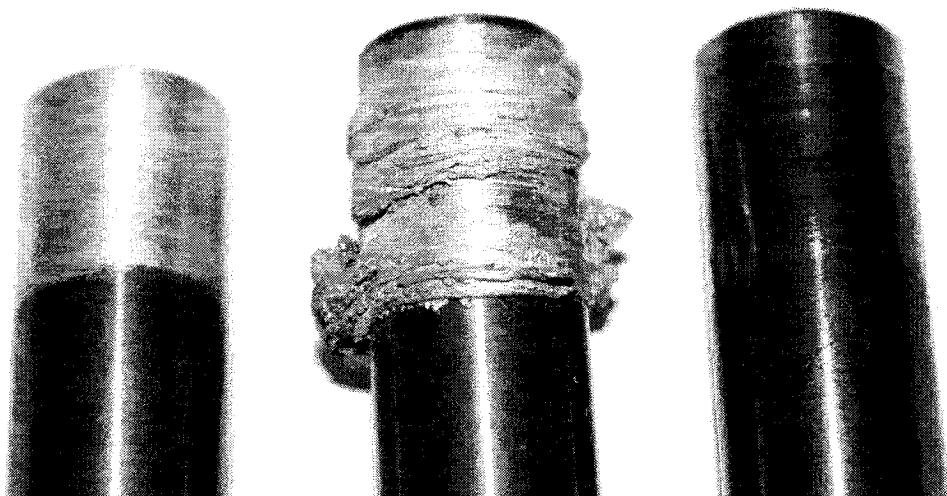
confirm that around 400 minutes the higher ranking harmonics peaks were missing, their energy being most likely damped by the softer aluminum build-up.



**Figure A2-0-2 – Evolution of the cutting forces with wear, a) 0, b) 200, c) 400 and d) 600 minutes respectively Axial DOC = 0.762 mm, full immersion, 11060 rpm**

## 2.2 Friction tests and spectrograms

Friction tests consisted in pushing a piece of 7475 aluminum against a turning carbide sample clamped in a lathe spindle. Surface temperature was monitored with a FLIR 3000 thermal camera, with corrections applied for material and surface condition. Pressure was adjusted to obtain similar temperature range to that reached in a simulation performed with Third Wave AdvantEdge, for the cutting conditions to the real test.



**Figure A2-0-3** – Friction tests results BUL formation, after 5 minutes (left), aluminum welded, after 10 minutes of test (center), surface free of adhered aluminum, after 20 minutes (right)

The formation of an adhered layer of aluminum to the surface of the tool was observed (Figure A2-0-3) soon after test started. On samples from this test stage the spectrogram showed that the reflected radiation corresponded to a concentration of aluminum of 42 to 47 % in atoms while tungsten was only 26 to 41 % visible. The proportion of cobalt detected was between 8.5 and 11 %, which is higher than for the original sample, as proportion of cobalt on tungsten. Traces of iron (Fe) and chromium impurities were also detected.

Between 5 and 20 minutes a compact adhered aluminum layer was able to rip out

aluminum from the piece, literally friction welding carbide and aluminum. After 20 minutes, the aluminum detached and did not stick anymore to the surface of the carbide sample. A black deposit containing aluminum oxide and tungsten carbide particles was present on the surface of the aluminum piece, but after replacing it with a clean, new one, there was no further adherence.

The spectrogram showed that the apparent concentration of cobalt was between 15 and 16 % on the initial sample, but it decreased to between 8.5 and 11 % after 25 minutes of friction. Aluminum was present only at 1 %. Samples subjected to friction tests for as much as 30 minutes did not present traces of adherence. Their surface was polished by the aluminum oxide particles formed by oxidation of aluminum at high temperatures.

#### **4. Conclusions**

The analysis of the data collected supports the assertion that as long as cobalt is found in significant proportion on the tool surface, adhesion will occur and have a negative effect on the cutting process. Cobalt migrates towards the tool surface at high contact temperatures, providing an excellent substrate for aluminum adhesion. The presence of aluminum build-up is worsening cutting conditions and process stability, which may lead to sudden failure. The cobalt is removed naturally in the process, by formation of cobalt aluminide CoAl, which is eventually washed away.

#### **5. References**

- [1] Nouari, M., List, G., Girot, F., Géhin, D. "Effect of machining parameters and coating on wear mechanisms in dry drilling of aluminum alloys" *Int. J. Mach. Tools & Manuf.*, 45 pp. 1436-144 (2005)