



## Open Archive Toulouse Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <http://oatao.univ-toulouse.fr/>  
Eprints ID: 8485

**To cite this version:**

Baili, Maher and Wagner, Vincent and Dessen, Gilles and Sallabery, Julien and Lallement, Daniel *Influence de la température sur l'usinabilité du Ti-5-5-5-3*. (2010) In: International Symposium on Aircraft Materials, 12 - 14 May 2010, Marrakech, Morocco.. (Unpublished)

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: [staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr](mailto:staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr)

# Influence de la température sur l'usinabilité du Ti-5-5-5-3

Maher BAILI †, Vincent WAGNER †\*, Gilles DESSEIN †, Julien SALLABERRY †\*, Daniel LALLEMENT \*

† Université de Toulouse ; INP / ENIT ; LGP

47 avenue d'Azereix, BP 1629, F-65013 Tarbes Cedex, France

\* Messier Dowty Bidos ; rue Guynemer, BP 39, F-64401 Oloron Sainte Marie Cedex, France

## Abstract

The realization of aeronautic parts with strong mechanical properties requires the use of high performance materials. That's why, some new materials are used for landing gears as refractory titanium (as Ti-5-5-5-3). The machining of this material leads to high cutting forces and temperatures. So, it is necessary to use low cutting conditions on the industrial machining process .

In order to increase the productivity, it is possible to increase the initial temperature of the workpiece. Hot machining is a new research track. The principle consists in heating material before machining it, in order to take advantage of its mechanical properties reduction.

First, studying the state of the art permit us to determine all heating instruments used and the thermal alleviation that exists on conventional materials.

A heating by induction was chosen and a system capable to maintain a constant temperature into the workpiece during machining (turning) was conceived.

The measure of the temperature is achieved in the setup of the workpiece by thermocouples and by thermography camera.

Trails permit to identify the variation of cutting forces according to the initial temperature of the workpiece, with fixed cutting conditions according to the TMP (Tool-Material-Pair) methodology at ambient temperature. Tool life and deterioration type are identified notably.

The results analysis shows a low reduction of specific cutting forces for a temperature area compatible with industrial process. The reduction is more important at elevated temperature. However, it has bad consequences on quality of the workpiece surface (oxidation, problem on surface integrity and mechanical properties degradation).

In perspective, different ways of heating are studied to permit a localized and more effective heat compatible with the industrial application.

## 1. Introduction

En aéronautique, dans l'objectif de réduire la masse embarquée, réduire les couts de maintenance et améliorer le tenue en fatigue des pièces de structure, les industriels favorisent l'utilisation de matériaux de nouvelles génération. Dans ce cadre, Messier-Dowty Bidos utilise le nouvel alliage de titane Ti-5-5-5-3 (Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr) pour la fabrication de certaines pièces de ses trains d'atterrissage. Ce matériau réfractaire présente de très bonnes propriétés mécaniques en termes de résistance à la corrosion, résistance mécanique et tenue à la fatigue. Toutefois, ce matériau présente une très faible usinabilité comparé aux aciers ou encore à l'alliage de titane souvent pris comme référence le Ti-6-4 (Ti-6Al-4V). Sur cet alliage,

l'usinabilité est complexe, d'où une productivité limitée : la vitesse de coupe est faible et la durée de vie des outils est réduite, la conséquence est une augmentation importante des temps de cycle ce qui n'est pas sans poser des problèmes de charge capacité. Le coût de fabrication devient une problématique majeure. Le choix des pistes d'amélioration n'est possible que par la compréhension des phénomènes de coupe et d'usure du Ti-5-5-5-3. Le premier objectif sera la recherche de l'amélioration de son usinabilité.

L'objectif de cet article est d'étudier l'impact de la température initiale du matériau usiné sur l'évolution des efforts de coupe et sur les modes de dégradation de l'arête de coupe, partant du postulat qu'un gain potentiel en effort de coupe se répercutera sur l'usinabilité. La méthodologie du travail se base sur la démarche Couple-Outil-Matière (COM), le critère représentatif de l'optimisation étant l'énergie spécifique de coupe  $K_c$ . En effet, la chauffe du matériau à usiner réduit la contrainte d'écoulement plastique du matériau provoquant ainsi le phénomène d'adoucissement thermique (bien connu en usinage à grande vitesse) qui conduit à la réduction du  $K_c$ . Néanmoins, cette température affectera la durée de vie de l'outil (augmentation des contraintes thermiques, usure en dépouille, abrasion du revêtement...). Elle engendrera une transformation microstructurale du matériau et génèrera un abattement des caractéristiques mécaniques de la surface de la pièce.

Cet article est organisé comme suit : la section 2 détaille l'état de l'art sur l'usinabilité des matériaux à chaud, les différents moyens de chauffe possibles ainsi que l'impact de la température non seulement sur la durée de vie des outils mais aussi sur les propriétés mécaniques et l'intégrité de surface. La section 3 détaille le dispositif expérimental choisi permettant d'usiner le Ti-5-5-5-3 à chaud. La section suivante exposera les résultats expérimentaux obtenus et sera consacrée à l'analyse et à la discussion de ces résultats. La dernière section a pour objectif de conclure sur cette étude afin de comparer les apports de la méthode par rapport à ses limitations.

## 2. État de l'art sur l'usinage à chaud

La faible usinabilité des alliages de titane est essentiellement due à ses propriétés intrinsèques. En effet sa faible conductivité thermique empêche l'évacuation de la chaleur générée par l'usinage. Ceci engendre une température élevée au contact outil-matière. En plus, à haute température, les alliages de titane réagissent chimiquement avec de nombreux matériaux constitutifs des outils de coupe.

Avec l'augmentation de la température, tous les matériaux subissent une diminution de leurs propriétés mécaniques (Figure 1). Le chauffage abaisse la contrainte d'écoulement plastique des métaux.

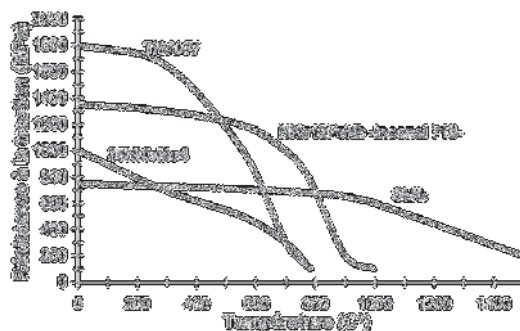


Figure 1 : Évolution de la résistance à la traction en fonction de la température pour différents matériaux [2]

Pour résoudre les problèmes d'usinabilité de certains matériaux, l'augmentation de la température des pièces est aujourd'hui une piste explorée par de nombreux chercheurs. Le

principe de l'usinage à chaud est de profiter de la diminution des propriétés mécaniques du matériau pour l'usiner. Depuis les années 70, de nombreuses études ont été réalisées sur ce sujet. Moore [8] a mené des études sur différents matériaux métalliques et céramiques. Il a constaté l'amélioration de l'usinabilité de matériaux aéronautiques tels que les alliages de titane et de nickel. Les gains généralement observés sont la diminution des efforts de coupe, des vibrations et de l'usure de l'outil, ainsi que l'amélioration de l'état de surface.

Des études ont été menées par Ozler [9] sur la durée de vie de l'outil lors de l'usinage à chaud d'acier austénitique au manganèse. Il a été conclu que la durée de vie de l'outil est proportionnelle à la température de la pièce jusqu'à 600°C. Toutefois, elle est inversement proportionnelle à la vitesse de coupe. Ces résultats démontrent que l'usinage à chaud permet l'utilisation de vitesses de coupe plus élevées pour une même durée de vie d'outil.

Les travaux de Melhaoui [7] confirment également l'intérêt du chauffage de la pièce pour augmenter la durée de vie de l'outil. Il a étudié l'usinage assisté laser de l'acier 16MnCr5 recuit. Grâce à l'assistance thermique, 80% de l'usure en dépouille et de 60% de l'usure en cratère ont été réduits. Il explique cette baisse importante de l'usure par la baisse de l'effort de coupe dû à l'assistance thermique.

Les travaux de Sun [10] sur l'usinage à chaud du Ti-6-4 ont permis d'observer que l'assistance plasma dégrade la durée de vie de l'outil, malgré la diminution des efforts de coupe. Ils confirment cependant que l'assistance laser permet d'augmenter la durée de vie de l'outil. Cela renforce l'intérêt de l'assistance laser en usinage à chaud.

List [5] explique que l'assistance thermique ne diminue pas nécessairement l'usure de l'outil. Les différents mécanismes de l'usure d'outil y sont expliqués, ainsi que l'effet de la température :

- déformation plastique : Les déformations plastiques apparaissent sous l'effet de fortes sollicitations thermiques et mécaniques. Lors de l'usinage, les grandes vitesses de coupe et d'avance et la dureté des matériaux usinés génèrent des pressions et températures élevées, notamment en pointe d'outil. Les fluctuations de température et de chargement conduisent à la fissuration et à la destruction des arêtes de coupe,
- usure par abrasion : elle apparaît sur la face de coupe et sur la face de dépouille des outils. Au contact outil-pièce, par frottement, les particules dures de la pièce (inclusions) arrachent des éléments de l'outil. Cela génère des stries sur l'outil,
- usure par adhésion : sous l'effet de la pression et de la température, des soudures se créent entre l'outil et le copeau. Ce phénomène apparaît surtout si les atomes qui constituent les deux surfaces en contact peuvent réagir chimiquement. Les éléments du copeau se collent et s'accumulent sur l'arête de coupe pour former un dépôt macroscopique (appelé arête rapportée). Lorsque ce dépôt se brise, une partie de l'outil est arrachée. L'usure par adhésion apparaît surtout à faible vitesse de coupe,
- usure par diffusion : la pression et la température élevées sont aussi responsables de phénomènes de diffusion d'atomes de l'outil vers le copeau ou vice-versa. Sur l'outil, il se forme une couche intermétallique moins résistante que le métal d'origine. Des fissures se créent, des grains se détachent de l'outil et créent un cratère sur la face de coupe.

List [5] détaille l'influence de la température sur l'apparition de ces mécanismes d'usure (Figure 2). On remarque qu'à basse température, l'adhésion et l'abrasion sont prépondérantes. Toutefois, à haute température, des phénomènes de diffusion, de corrosion et de déformation plastique apparaissent. Selon les matériaux usinés et les paramètres de coupe, l'assistance thermique a des effets contrastés sur l'usure des outils de coupe. En fonction de la température, l'usure peut avoir des origines mécaniques (abrasion) ou chimiques (diffusion). Les propriétés physico-chimiques des matériaux mises en jeu jouent également un rôle important. La haute température abaisse la contrainte des matériaux, mais elle active les réactions chimiques entre outil et matière.

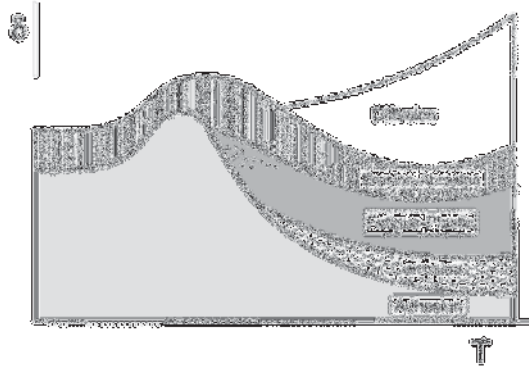


Figure 2 : usure de l'outil en fonction de la température [5]

Pour augmenter la température du matériau usiné, plusieurs méthodes ont été adoptées. En effet, lors des premiers travaux, la pièce a été chauffée dans son intégralité avant d'être usinée. Ensuite, des techniques de chauffage localisé ont vu le jour.

Le chauffage plasma permet de chauffer localement la zone en amont de la trajectoire de l'outil grâce à une torche plasma. La densité de puissance générée est importante. Ce procédé a été utilisé dans [4] pour chauffer de l'inconel 718.

Un autre procédé pouvant être utilisé est le chauffage par laser. Le principe de ce procédé est similaire à celui du chauffage par plasma. Toutefois, la densité de puissance obtenue est beaucoup plus importante. Trois sources laser peuvent être utilisées. La source CO<sub>2</sub> est la plus puissante (10 à 100 KW/mm<sup>2</sup>). Le transport du faisceau se fait par un jeu de miroirs et nécessite une robotisation lourde ce qui limite son utilisation dans le cas de l'usinage lors du déplacement des axes de la machine. Le laser à semi-conducteurs utilise une deuxième source d'énergie basée sur des diodes laser. Le faisceau laser peut être transporté par fibre optique d'où la possibilité de l'intégrer sur une machine-outil. Néanmoins, la puissance (quelques KW/mm<sup>2</sup>) reste insuffisante pour monter la pièce en température rapidement pendant l'usinage. Le dernier procédé de chauffage laser est le plus prometteur en usinage à chaud des métaux : il s'agit de laser Nd-YAG (Néodyme - Yttrium Aluminium Garnet). Il permet d'obtenir un faisceau de puissance moyenne (jusqu'à 5 kW/mm<sup>2</sup>) transportable par fibre optique donc compatible avec l'usinage. Sa longueur d'onde facilite son absorption dans les matériaux métalliques.

Le dernier procédé utilisé pour chauffer le matériau usiné est le chauffage par induction. En effet, la pièce à usiner baigne dans un champ magnétique. Le chauffage se fait sans contact et peut très facilement être compatible avec l'usinage. En plus, ce procédé permet de régler la température de chauffe à 10°C près, elle permet de monter la température sur un alliage de titane à 1000°C en 2 min et ne présente pas de danger dans la mesure où c'est uniquement la pièce qui est chauffée et que le rayonnement thermique est très faible. C'est ce dernier procédé qui a attiré notre attention dans nos travaux.

Si augmenter la température du matériau usiné permet de baisser sa résistance et d'améliorer son usinabilité, la contrepartie est l'impact sur l'intégrité de surface du matériau : modifications microstructurales et des contraintes résiduelles. En effet, Germain [2] a observé des modifications microstructurales dues au traitement thermique engendré par le chauffage superficiel. Les phases  $\alpha$  et  $\beta$  du matériau changent de structure. Ainsi, des fissures apparaissent à cause des contraintes engendrées par le refroidissement rapide de la surface. Leur présence affecte la tenue en fatigue de la pièce au cours de son utilisation. Plus récemment, Jones [3] a étudié l'impact de la température sur la structure du Ti-5-5-5-3. À température ambiante, cet alliage de titane présente une structure  $\beta$  métastable. Cette structure évolue vers une structure  $\alpha+\beta$  dès le franchissement du  $\beta$ -transus au alentour de 845°C. Les sollicitations mécaniques et thermiques dues à l'usinage provoquent une dilatation uniquement de couche superficielle du matériau usiné. La différence de dilatation entre les couches du matériau crée des contraintes résiduelles. Une existence maîtrisée de ces dernières (des contraintes résiduelles trop

importantes engendrent une surface fissurée) améliore les propriétés mécaniques du matériau. En chauffant le Ti-6-4, Germain [2] a constaté une évolution des contraintes résiduelles en surface en fonction de la température atteinte. En effet, les contraintes résiduelles dues à la traction augmentent au dépend de celles dues à la compression. Toutefois, les contraintes résiduelles globales en valeur absolue diminuent ce qui dégrade la tenue en fatigue du matériau. Les travaux réalisés jusqu'à aujourd'hui par les chercheurs se limitent à étudier l'influence de l'augmentation de la température sur les efforts de coupe, la durée de vie des outils, la ductilité, l'intégrité de surface du matériau indépendamment. Cependant, elles ne permettent pas de dégager un constat global et industriel en comparant les apports de cette technologie sur l'usinabilité par rapport à ses inconvénients. L'objectif de nos travaux est de compléter la littérature pour affirmer si le chauffage du Ti-5-5-5-3 représente une voie d'amélioration et d'optimisation de l'usinabilité et si elle est industrielle.

### 3. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental permettra de réaliser des essais de coupe en tournage du Ti-5-5-5-3 tout en pilotant une température stabilisée de la pièce à usiner. Les entrées du système étudié seront la température et la matière (les paramètres de coupe, l'outil et les conditions d'enlèvement de matière seront des constantes), la variable de sortie sera l'effort sur l'outil. Le mode opératoire consistera à amener la pièce à une température maîtrisée, à réaliser l'usinage et récupérer l'effort de coupe. Ce mode opératoire sera conduit pour différente température. La zone usinée sera un embout de matière saine changée à chaque essai d'usinage.

Le choix des outils de coupe ainsi que des conditions de coupe est déterminé selon une étude antérieure détaillée dans [11] donnant un résultat optimal à température ambiante, cependant ces conditions ne sont pas déterminantes puisque l'objectif est d'observer un différentiel d'effort et non de rechercher un optimum.

En observant le cycle de traitement thermique du Ti-5-5-5-3, trois zones de comportement du matériau sont clairement identifiées en fonction de la température (Figure 3) : la première zone correspond aux températures inférieures à 300°C, l'usinage à chaud ne devrait rien apporter car le Ti-5-5-5-3 est dans sa zone stable d'utilisation. Entre 300 et 640°C, la zone de relâchement des contraintes semble particulièrement intéressante. En effet, c'est dans cette zone où des perspectives de réduction des efforts de coupe et d'usure d'outil sont attendues. La dernière zone correspond aux températures au-delà de 640°C, on assiste à des modifications microstructurales irréversibles qui affecteront les caractéristiques mécaniques du matériau. Par conséquent, tout le matériau chauffé au dessus de 580°C doit être enlevé par l'opération de coupe.

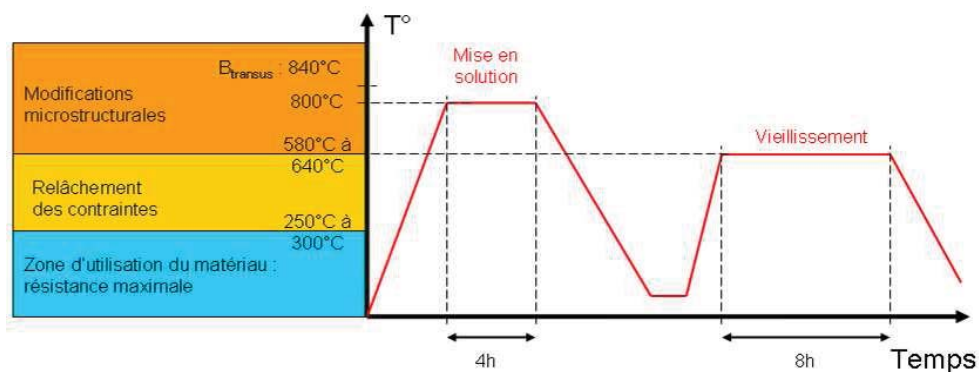


Figure 3 : gamme de traitement thermique du Ti-5-5-5-3

Comme indiqué dans la section 2, le moyen de chauffage compatible avec l'usinage, simple d'utilisation, permettant d'atteindre rapidement des températures très élevées, maîtrisées et



stabilisées, ne présentant pas de causes de dégradation du matériau et assurant une sécurité du matériel et des utilisateurs est le chauffage par induction.

Les essais à réaliser sont des essais de tournage sous des températures très élevées, cette température doit être maintenue durant l'usinage. Pour répondre à cette contrainte, le dispositif expérimental est composé d'un inducteur de forme semi-circulaire « pancake » enveloppant partiellement la pièce pendant le tournage, conçu spécifiquement. La géométrie de la pièce tournante a été construite pour intégrer des thermocouples à l'intérieur au plus près de la zone de coupe. La récupération des signaux des thermocouples pendant le tournage passe par un collecteur tournant traversant la broche du tour. Une caméra thermique complémentaire a été utilisée pour confronter ses mesures de température aux mesures données par les thermocouples. L'outil de coupe est monté sur un dynamomètre Kistler pour mesurer les efforts de coupe pendant l'usinage. La Figure 4 illustre le dispositif utilisé pour les essais.

Pour les essais, un protocole de montée et de maintien en température de la pièce en rotation dans l'inducteur, avec mesure de la température avec les thermocouples et la caméra thermique a permis de figer la procédure de chauffage (comment garantir la stabilisation de la pièce à la température souhaitée). La phase d'essais de coupe consistait à appliquer le protocole de chauffe et de maintien à température établie et d'effectuer les essais de coupe orthogonal tout en collectant les mesures d'efforts.

Le risque important d'inflammation du titane et la manipulation d'élément chaud ont été entourés de précautions importantes, avec des consignes de sécurité drastiques (vidage du bac à copeaux, carter de sécurité, présence d'un extincteur, périmètre de sécurité...)



Figure 4 : Dispositif expérimental

## 4. Présentation des résultats expérimentaux et discussion

À partir des conditions de coupe et d'outil de coupe dans [11], les paramètres de sortie mesurés sont les efforts de coupe, l'usure de l'outil, la dureté de la surface après usinage ainsi que la rugosité de la surface obtenue.

### 4.1. Efforts de coupe

Le Tableau 1 représente l'évolution des efforts et du coefficient spécifique de coupe en fonction de la température.

Tableau 1 : mesure des efforts en fonction de la température

Température (°C)	25	100	200	250	300	400	500	650	750
Fc (N)	900	900	937	919	893	873	825	670	603
Kc (N/mm <sup>2</sup> )	2000	2000	2082	2042	1984	1940	1833	1489	1340
Effort de coupe résultant (N)	1211	1198	1150	1142	1130	1098	1056	870	794
Variation d'effort résultant	Référence	-1%	-5%	-6%	-7%	-9%	-13%	-28%	-34%

En observant la Figure 5, on remarque que l'évolution des efforts de coupe et du coefficient spécifique de coupe présente 3 phases : pour des températures inférieures à 100°C, l'effort reste constant. Entre 100°C et 500°C, la diminution de l'effort est faible. Elle devient conséquente dès que l'on dépasse les 500°C. En ne considérant que le paramètre coefficient spécifique de coupe, c'est cette zone, qui présenterait un intérêt à l'optimisation de l'usinabilité.

La diminution des efforts de coupe grâce à l'augmentation de la température initiale du matériau s'explique par l'adoucissement thermique du matériau. La loi de comportement du matériau (loi de Johnson-Cook) dans la zone de coupe confirme cette tendance présentée par l'équation (1).

$$\bar{\sigma} = \left[ A + B(\bar{\epsilon})^n \right] \cdot \left[ 1 + C \ln \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right] \cdot \left[ 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_f - T_0} \right)^m \right] \quad (1)$$

avec,  $\bar{\sigma}$  : contrainte,  $\bar{\epsilon}$  : déformation,  $\dot{\bar{\epsilon}}/\dot{\bar{\epsilon}}_0$  : vitesse de déformation plastique sans dimension,  $T_0$  : température ambiante et  $T_f$  : température de fusion et  $A, B, C, n$  et  $m$  : constantes.

Dans la loi,  $m > 1$ . Par suite, si la température T du matériau augmente, la contrainte  $\sigma$  et donc l'effort de coupe diminuent, et inversement.

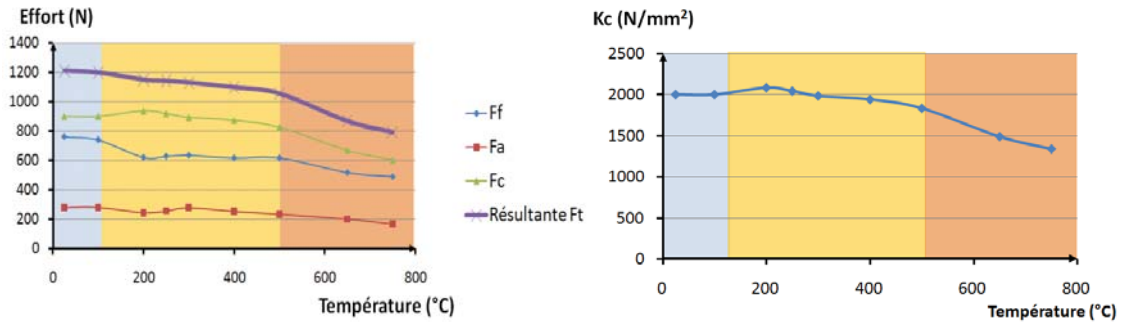


Figure 5 : Évolution des efforts de coupe et de Kc en fonction de la température

#### 4.2. Usure d'outil

Pour les trois phases de températures identifiées, des essais d'usures, en coupe quasi orthogonale, ont été effectués. À température ambiante (pièce à 25°C), on constate un léger écaillage sur la face de coupe à la limite de la profondeur de passe. Cette dégradation est liée à une dureté du matériau (écrouissage de la matière dans la passe). Cet écrouissage ne peut avoir lieu qu'à basse température. Lorsque la température augmente, un second mode de dégradation est observé : une arête rapportée se développe d'autant plus importante que la température initiale est haute (Figure 6). Ce mode s'explique par la ductilité du matériau à un niveau de température élevé, le copeau se colle à la face de coupe et refroidit rapidement pour se souder à la plaquette. Sur la face de dépouille, l'usure n'est remarquable que pour l'essai à une température de 750°C.



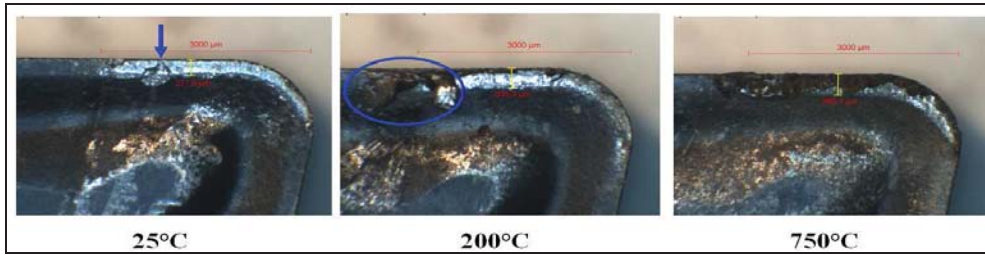


Figure 6 : Observation du phénomène d'usure sur la face de coupe

#### 4.3. Intégrité de surface

La Figure 7 illustre l'augmentation de la micro-dureté en fonction de la température initiale de la surface usinée.

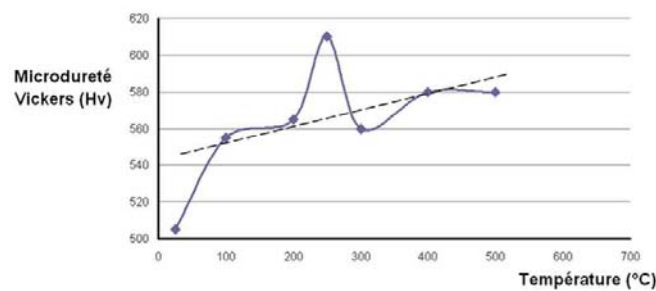


Figure 7 : influence de la température sur la dureté Vickers de la surface usinée

La micro-dureté est représentative de l'intégrité de surface (état de santé) du matériau. Lors de l'usinage, le matériau est écroui en surface et les sollicitations de l'outil génèrent des contraintes résiduelles. Si cet écrouissage est important, le matériau est fragilisé. Des fissures peuvent alors apparaître et diminuer la résistance en fatigue de la pièce. L'influence de l'assistance thermique lors de l'usinage est faible. La micro dureté a tendance à augmenter avec la température de chauffage, mais très faiblement (40 Vickers). Au-delà de 500°C, la structure est modifiée, entraînant de fortes variations de la micro-dureté sur la surface. Cette augmentation de la dureté s'explique par la modification de la structure à haute température.

#### 4.4. Rugosité

La Figure 8 montre l'évolution de la rugosité en fonction de la température. La rugosité passe de Ra 1,6 à Ra 0,8 pour des usinages réalisés à des températures supérieures à 200°C. Cette diminution peut s'expliquer par la ductilité plus importante du matériau lors de l'usinage à haute température.

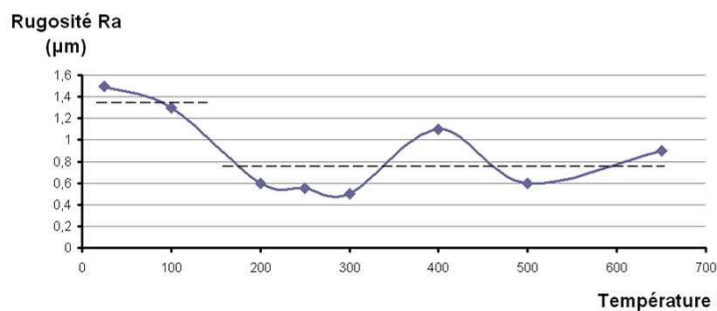


Figure 8 : influence de la température sur la rugosité Ra de la surface usinée

## 5. Conclusion et perspectives

L'objectif de cet article est d'étudier l'influence de la température sur l'usinabilité du Ti5-5-3. Lors de ces travaux, un système d'assistance thermique par induction a été conçu. En se basant sur des conditions de coupes définies dans une étude antérieure, l'impact de la température sur le coefficient spécifique de coupe, la durée de vie des outils et l'intégrité de surface a été étudié. Une réduction de 13% du coefficient spécifique de coupe pour une température de 500°C par rapport à la température ambiante a été chiffrée. Pour une température de 750°C, le gain atteint 34%, toutefois, la structure du matériau est irréversiblement modifiée et la durée de vie des outils est réduite. Afin de palier à cette limitation, un système de chauffage plus localisé (de type laser) pourrait être utilisé. Par conséquent, la zone juste en amont de l'outil serait chauffée à des températures supérieures à 750°C et ensuite intégralement usinée, l'outil pourrait être refroidi à l'intérieur par cryogénie. Une autre voie d'optimisation est possible : varier la vitesse de coupe qui a été figée lors de cette étude (égale à  $V_{c,min}$  déterminée à la température ambiante). En effet,  $V_{c,min}$  varie en fonction de la température. Enfin, comme nos travaux se sont limités à la mesure de la micro-dureté de la surface, une étude plus approfondie de l'intégrité de surface sera réalisée.

## Références

- [1] K. Armitage, S. Masood, M. Brandt, C. Pomat, W. Warman, "Laser Assisted Machining of Hard-to-Wear Materials", 2003.
- [2] G. GERMAIN, "Contribution à l'optimisation du procédé d'usinage assisté laser", Mémoire de thèse, ENSAM d'Angers, 2006.
- [3] N.G. Jones, R.J. Dashwood, D. Dye, M. Jackson, "Thermomechanical processing of Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr", Materials Science and Engineering. 2008.
- [4] C. Leshock, J-N Kim, Y. Shin, "Plasma enhanced machining of Inconel 718: Modeling of workpiece temperature with plasma heating and experimental results", International Journal of Machine Tools & Manufacture, 41 (2001) pp877-897.
- [5] G. List, "Étude des mécanismes d'endommagement des outils carbure WC-CO par la caractérisation de l'interface outil-copeau. Application à l'usinage à sec de l'alliage d'aluminium aéronautique AA2024 T351", Mémoire de thèse, ENSAM de Bordeaux, 2004.
- [6] J. Lu, "Fatigue des alliages ferreux : facteurs d'influence", Technique de l'ingénieur, BM 5043.
- [7] A. Melhaoui, "Contribution à l'étude de l'usure d'outil de coupe en usinage assisté par laser et à l'usinabilité d'une céramique à base d'oxyde de zinc", Mémoire de thèse, École Centrale de Paris, 1997.
- [8] A.I.W. Moore, "Hot machining in industry", Bulletin Cercle Études des Métaux, 14-11 (1980) p19.1-19.13.
- [9] L. Ozler, A. Inan, C. Ozel, "Theoretical and experimental determination of tool life in hot machining of austenitic manganese steel", International Journal of Machine Tools & Manufacture, 41 (2001) pp163-172.
- [10] S. Sun, M. Brandt, "Laser-assisted machining of titanium alloys", industrial lasers report, IRIS Swinburne University of Technology, Melbourne Australia, 2007.
- [11] V. Wagner, M. Baili, G. Dessein and D. Lallement, "Experimental study of coated carbide tools behavior", Int. J. Machining and Machinability of Materials, 2009, in press.