

Hochgeschwindigkeitsbearbeitung von dünnen Blechen und Platinen aus Aluminium¹

Dipl.-Ing. Uwe Teicher

1 Einleitung

Der europäische Markt der Luft- und Raumfahrttechnik ist seit 1990 durch ein jährliches Wachstum von durchschnittlich fünf Prozent gekennzeichnet /N.N-04/. Um von dieser Entwicklung zu partizipieren und um dem Markt eine produktive Lösung zur Bearbeitung von dünnen Blechen und Platinen aus Leichtmetallen wie Aluminium zur Verfügung zu stellen, wurde mit einem Werkzeugmaschinenhersteller und einem Werkzeughersteller ein Verbundprojekt bearbeitet, um eine durchgängige Gesamtlösung bestehend aus einem Bearbeitungszentrum, entsprechenden Werkzeugen und einer angepassten Technologie zu entwickeln.

Folgende Anforderungen wurden an diese Lösung gestellt:

- Die Abmaße der Werkstücke soll sich vor allem auf große flächige Werkstücke mit einer Materialdicke von 0,5 mm bis 10 mm beziehen.
- Die zu bearbeitenden Werkstoffe sind Leichtmetalle, vor allem Aluminium.
- Die Gestaltung des Fertigungssystems soll als selbstständige Lösung ausgeführt sein, bei deren Entwicklung die Hauptanforderungen die Bearbeitungsqualität, die Prozesssicherheit sowie Produktivität und Flexibilität stehen.

Speziell durch die Flexibilitätsanforderungen kam nur eine Lösung in Form der Fräsbearbeitung in Frage. Der Einsatz der Wasserstrahlbearbeitung entfällt aufgrund mangelnder Produktivität und relativ niedriger Fertigungsgenauigkeiten. Die Laserbearbeitung entfällt ebenso wie die Wasserstrahlbearbeitung bezüglich der herstellbaren Formenvielfalt, da nur durchgehende Strukturen und keine Formen wie Taschen hergestellt werden können. Ein weiteres Problem der Laserbearbeitung ist die Schädigung der Oberflächenrandzone durch die lokal eingebrachte hohe Energiedichte, die zu verschlechterten Dauerfestigkeitseigenschaften der statisch und dynamisch hoch belasteten Werkstücke führt /CAR-03, ARA-03/.

Als Resultat wurde ein Verbundprojekt ausgeführt, bei dem die Firma MB-Portatec GmbH als Werkzeugmaschinenhersteller für HSC-Fräsmaschinen, die Firma Lehmann GmbH Präzisionswerkzeuge als Werkzeughersteller und die Arbeitsgruppe für Produktionsautomatisierung, Zerspan- und Abtragtechnik als Forschungsinstitut gemeinsam eine Bearbeitungslösung geschaffen haben /TEI-07, TEI-08/.

¹ im Rahmen der Technologieförderung mit Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und mit Mitteln des Freistaates Sachsen.

2 Werkzeugmaschinenentwicklung

Die Entwicklung der Werkzeugmaschine bei der Firma MB-Portatec kann grundsätzlich in drei Abschnitte gegliedert werden

1. Die Gestaltung der Maschinenstruktur
2. Die Auslegung der Maschineninfrastruktur
3. Die Gestaltung des Werkstückspannmechanismus

Die Maschinenstruktur wurde aufgrund der Anforderungen der Werkstückgröße als Portalfräsmaschine mit Gantry-Antrieb konzipiert. Eine besondere Bedeutung kam der Massereduktion und einer kompakten Gestaltung des Portals (Abb. 1) zu, um ein sehr gutes dynamisches Verhalten zu erhalten. Zu diesem Zweck wurde die geschweißte Portalkonstruktion des Prototyps mit Sandwichplatten aus geschäumten Aluminium versehen, um ein gutes Dämpfungs- und Steifigkeitsverhalten zu erreichen. Zusätzlich wurde der Abstand zwischen Portal und Spannplatte auf ein Mindestmaß von 60 mm verringert, was ebenfalls vorteilhaft für das Steifigkeitsverhalten ist.



Abb. 1: Portal und Hauptspindel des Bearbeitungszentrums

Die Gestaltung des Umfeldes für das Bearbeitungszentrum richtet sich vor allem nach den Notwendigkeiten eines mannlosen Schichtbetriebes.

Dazu wurde ein umfangreiches Werkzeugmagazin mit automatischer Werkzeugvermessung integriert ebenso wie eine leistungsfähige Spanabsaugungseinheit verbunden mit einem Spänesammler.

Die Zugänglichkeit der Maschine wurde für drei Seiten gewährleistet, wobei die Umhausung die Bediener-sicherheit während des Betriebes gewährleistet und zusätzlich ein vollautomatisches Werkstückbeschickungssystem integriert wurde.

Weitere technische Daten der entwickelten Maschine sind:

- Arbeitsbereich 2500 x 1250 x 10 mm
- Hochfrequenzfrässpindel (max. Drehzahl 60000 min⁻¹ bei 10 kW)

- Dauerbetriebsleistung, Werkzeugspannsystem HSK-E-25)
- maximale Vorschubgeschwindigkeit 48 m/min (Eilgang) und
- gekapselte Kugelumlaufspindeln für den Vorschubantrieb.

Werkstückspannsystem

Die Gestaltung des Werkstückspann- und Haltesystems besteht grundsätzlich aus zwei Mechanismen: einem Vakuumspannsystem und einer mittlerweile patentierten beschichteten Vliesmatte /MET-04/.

Dabei wird der Arbeitstisch in 32 Vakuumfelder aufgeteilt, deren Druck je nach Spindelposition gesteuert wird. Auf dem Arbeitstisch wird ein Vlies der Dicke von 0,2 mm aufgelegt, das mit einer Polyethylenschicht versehen ist, worauf die Bleche gelegt werden.

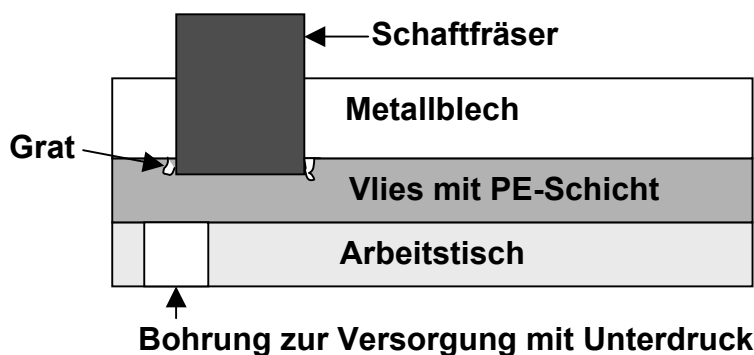


Abb. 2: Schematische Wirkungsweise des Halterungsmechanismus

Damit wird erreicht, dass es durch die Gratbildung bei der Fräsbearbeitung zu einer Interaktion aufgrund der Prozesstemperatur mit der PE-Schicht kommt und sich das Werkstück durch den Grat in die Kunststoffschicht einschmilzt.

Die Vorteile dieses Verfahrens sind:

- Sicheres Halten der Blechwerkstücke bis zu Stegbreiten von 0,5 mm.
- Das Vlies verhindert die Interaktion des Werkzeuges mit dem Spanntisch und verringert dadurch dessen Verschmutzung.
- Das Vlies kann als Transportband genutzt werden.
- Die Wirksamkeit des Vakuumspannsystems wird durch die gleichmäßige Verteilung des Unterdrucks verbessert.

3 Werkzeugentwicklung

Die Ausrichtung bei der Werkzeugentwicklung lag bei der erreichbaren Oberflächenqualität speziell in Abhängigkeit der Produktivität von der Vorschubgeschwindigkeit. Ein weiteres Entwicklungskriterium war die Anwendbarkeit nur eines Werkzeuges für verschiedene Aluminiumlegierungen und Schnitttiefen, wobei außer axialen Vorschubbewegungen bei der Anfahrtsrampe hauptsächlich 2D-Bearbeitungen durchgeführt werden.

Die Entwicklungen bezogen sich auf folgende Elemente des Werkzeuges:

1. Substrat- und Beschichtungsauswahl
2. Makrogeometrie: dazu gehört neben der Schneidenanzahl der Durchmesser und die Werkzeugwinkel.
3. Mikrogeometrie: Schneidenvorbereitung in deren Mikrogestalt

Als Substrat für den Werkzeuggrundkörper wurde ein K10 Ultrafeinstkornhartmetall ausgewählt. Beschichtungen wurden nicht eingesetzt, da Hartstoffschichten in diesem Fall keine Vorteile im Zerspanprozess bringen, eher sogar aufgrund erhöhter Reibwerte nachteilig sind.

Der Schneidkantenradius wurde sowohl an der Haupt- als auch an der Nebenschneide durch einen Läppprozess auf 10 µm erhöht, um Unstetigkeiten an den Schneiden zu verringern, die durch den Schleifprozess entstanden. Dieses Verfahren verbesserte ebenso die Rauheit in der Spannut verbunden mit einem verbesserten Spanabfluss beim Fräsen und einer geringeren Gratbildung.

Für das Werkzeug hat sich speziell für verschiedene Werkstoffe ein Drallwinkel von 10° bewährt. Der Einflussfaktor des Drallwinkels hat neben den Schnittparametern die größte Auswirkung auf die Gratbildung. So wurden beispielsweise bei Werkzeugen mit niedrigen Drallwinkeln von bis zu 0° sehr geringe Grathöhen beim Fräsen sehr dünner Bleche und niedrigen Materialhärten gemessen.

Das Zeitspannungsvolumen Q ist die produktivitätsbestimmende Kenngröße, deren Einflussfaktoren in Gleichung 1 dargestellt sind.

$$Q = \frac{1}{\pi} \cdot a_e \cdot a_p \cdot f_z \cdot v_c \cdot \frac{z}{d} \quad \text{Gleichung 1}$$

Die Durchsetzung einer hochproduktiven Bearbeitung kann bei der Werkzeuggestaltung damit nur durch eine vergrößerte Zähneanzahl z oder einen verringerten Werkzeugdurchmesser d ermöglicht werden.

Der Vorschub pro Zahn ist zwar ein technologischer Einstellparameter, dessen maximaler Einstellwert jedoch auf einen spezifischen Werkstoff bezogen ist und dabei auch durch die Werkzeugkonstruktion in Form der Werkzeugstabilität als abhängige Größen der Spanraumgestaltung oder auch der Werkzeugwinkel beeinflusst wird.

Als Ergebnis konnte festgestellt werden, dass für die Anwendung bei der Blechbearbeitung zweischneidige Werkzeuge am günstigsten sind. Dreischneidige Werkzeuge sind zwar bezüglich der erreichbaren Produktivitäten und den erreichten Oberflächen günstiger. Der Hauptnachteil ist jedoch die fehlende Fähigkeit für das produktive axiale Eintauchen in das Werkstück und eignen sich damit nur für 2D-Bearbeitungen.

Der Werkzeugdurchmesser stellte sich als Kompromiss zwischen der Werkzeugstabilität und der Werkzeugstandzeit auf der einen Seite und der geometrischen Flexibilität zur Erzeugung von kleinen Radien auf der anderen Seite dar und wurde auf 6 mm für ein zweischneidiges Werkzeug festgelegt.

Für alle Werkzeuge gilt jedoch, dass die Länge der Spannuten der Blechstärke angepasst werden muss und damit so gering wie möglich gehalten werden soll, damit die Stabilitätseigenschaften der Werkzeuge verbessert werden.

Einschneidige Werkzeuge zeigten Vorteile bei der Bearbeitung weicher Legierungen wie AlMg3 (DIN 3.3535), da sie durch einen hohen einstellbaren Spanraum und große Spanwinkel gekennzeichnet sind und damit eine gute Spanabfuhr gewährleisten. Dies führte auch zu einem geringeren Werkzeugverschleiß.

4 Frästechnologie

Die Entwicklung einer adäquaten Frästechnologie wurde parallel zur Maschinenentwicklung durchgeführt, wobei die Ergebnisse der durchgeführten Fräsversuche direkt in die Werkzeugentwicklung einfließen.

Verschiedene Fräsverfahren wurden dabei auf die erreichbaren Oberflächengüten und die Zerspankräfte untersucht, mit denen eine große Bandbreite an Strukturen am Werkstück hergestellt werden kann. Dazu gehören Nutenfräsen als Umfangsstirnfräsen, Zirkularfräsen und die Anschnittsbewegung als Rampe.

Der untersuchte Werkstoff AlMgSi1 (3.2315 T6) ist ein typischer Werkstoff des allgemeinen Maschinenbaus und der Luftfahrtindustrie.

Die Zerspankräfte wurden mit einem Kistler Dynamometer 9257A, einem Ladungsverstärker 5007 und einem Personalcomputer, ausgestattet mit einer Messkarte, gemessen.

4.1 Zerspankräfte

Die Zerspankräfte wurden hauptsächlich unter dem Aspekt der notwendigen Leistungsfähigkeit des Spannsystems und der Werkzeugstabilität betrachtet. Die z-Komponente der Zerspankraft hat speziell einen direkten Einfluss auf die Wirkung des Spannsystems, wobei die y-Komponente als Normalkraft in Vorschubrichtung einen großen Einfluss auf die Stegbreite hat.

Die Bewertung der Zerspankräfte wurde anhand der maximalen und der minimalen Kräfte und deren durchschnittlichen Werte vorgenommen.

Eine Analyse des statischen Maschinenfrequenzganges durch ein Anschlagen am Tool Center Point ergab ein Amplitudenminimum bei 928 Hz beziehungsweise bei 1856 Hz. Damit wurde die Spindeldrehzahl für die Versuche auf 55000 min^{-1} festgelegt bzw. auf die Schnittgeschwindigkeit von 1040 m/min bei einem Werkzeugdurchmesser von 6 mm .

Die Bewertung der Zerspankräfte erfolgte in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit, im Gegensatz zur wissenschaftlicheren Beurteilung anhand des Vorschubs pro Zahn. Der Grund dafür ist der Vergleich zweier Prozesse anhand der Produktivität auch bei variablen Schnittgeschwindigkeiten. Weitere technologische Einstelldaten für die Versuchsreihen sind:

- Werkzeugdurchmesser 6 mm
- Vorschubgeschwindigkeiten $3...12 \text{ m/min}$
- Schnitttiefe 2 mm
- Anwendung einer äußeren Minimalmengenschmierung
- Nutenfräsen gemäß Abbildung 4.

Die Kräfte in Vorschubrichtung sind relativ gering verglichen mit den Normalkräften oder den Passivkräften. Die Spannweite zwischen den Minimal- und Maximalkräften ist ebenso relativ gering. Dabei hat die Vorschubgeschwindigkeit und für dieses Beispiel ebenso der Vorschub pro Zahn einen geringen Einfluss auf die Kräfte in Vorschubrichtung.

Im Gegensatz dazu verhält sich die Normalkraft in Vorschubrichtung. Diese Kraftkomponente ist durch den höchsten Mittelwert verglichen mit den anderen gemessenen Kraftkomponenten gekennzeichnet. Der Grund für dieses Verhalten ist darin zu suchen, dass der Hauptanteil der Schnittkraft in dieser Teilkomponente enthalten ist. Dies ist ebenfalls der Grund für den ansteigenden Verlauf dieser Komponenten, da nach dem Gesetz von Kienzle die Schnittkraft mit steigendem Vorschub pro Zahn ansteigt und in diesem Fall die Normalkraft in Vorschubrichtung maßgeblich beeinflusst. Daher muss diese Kraft speziell bei dünnwandigen Strukturen beachtet werden.

Verglichen mit niedrigeren Schnittgeschwindigkeiten von 680 m/min kommt es zu einer Reduktion der Normalkräfte in Vorschubrichtung von bis zu 10 Prozent in Abhängigkeit des Vorschubs pro Zahn wie schon in /TÖN-01/ berichtet wurde.

Die Spannweite der Passivkraft ist mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit durch einen progressiven Anstieg gekennzeichnet, der auf das steigende abzuführende Spanvolumen bei einem begrenzten Spanraum des Werkzeuges zurückzuführen ist.

Das Verfahren Zirkularfräsen zur Bohrungsherstellung wurde speziell hinsichtlich der Passivkräfte betrachtet, um den Einfluss auf die Axiallager der Hauptspindel zu ermitteln. Es konnte dabei festgestellt werden, dass die mittlere Passivkraft sowohl mit steigenden Vorschubgeschwindigkeiten entlang der Bahnkurve als auch bei sinkenden Schnittgeschwindigkeiten ansteigt, wie ebenfalls in /HAM-05/ berichtet wurde.

Deshalb kann die Empfehlung zum Einsatz hoher Schnittgeschwindigkeiten und relativ kleiner Werkzeugdurchmesser gegeben werden.

Diese Empfehlung kann gleichzeitig für die lineare Anfahrbewegung in Form einer Rampe gegeben werden.

4.2 Oberflächenqualität

Die Oberflächenqualität der Proben wurde durch ein taktiles Rauheitsmessverfahren und durch ein berührungsloses Verfahren der Streifenlichtprojektion beurteilt, da große Unterschiede zwischen den gemessenen Oberflächenrauheiten und der Oberflächenqualität vorhanden waren.

Als Hauptkriterium wurde die Mittlere Rautiefe R_z genutzt, die in der Mitte des Nutgrundes entlang der Vorschubrichtung gemessen wurde. Dabei ist festzustellen, dass die Messwerte ein typisches Verhalten in der Form zeigen, dass mit steigenden Vorschub pro Zahn die mittlere Rautiefe ansteigt.

Legt man dieses Verhalten zu Grunde und betrachtet bei einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit den Quotienten aus Schnittgeschwindigkeit und gemittelter Rautiefe, so wurde festgestellt, dass dieser Quotient bei höheren Vorschubgeschwindigkeiten konstant ist.

Bei geringen Vorschubgeschwindigkeiten ist dieses Verhalten nicht nachweisbar, da aufgrund der eingreifenden Nebenschneide am Werkzeug und der dadurch glättenden Wirkung die Bearbeitungsspuren nicht mehr vorhanden sind.

Die Messungen der gemittelten Rautiefen an den Konturen, die durch die Hauptschneiden am Umfang erzeugt wurden, sind durch ein ähnliches Verhalten gekennzeichnet, wie sie im Nutgrund durch die Nebenschneiden erreicht wurden.

Bei Versuchen mit geringeren Schnittgeschwindigkeiten als 680 m/min entwickelte sich eine schlechte Oberfläche, die durch Materialverquetschungen in Form einer sichtbaren Schuppenbildung entlang der gefrästen Rille gekennzeichnet war (Abb. 3a). Diese Verquetschungen traten bei höheren Geschwindigkeiten wie in Abbildung 3b zu sehen ist, in weit geringerem Umfang auf.

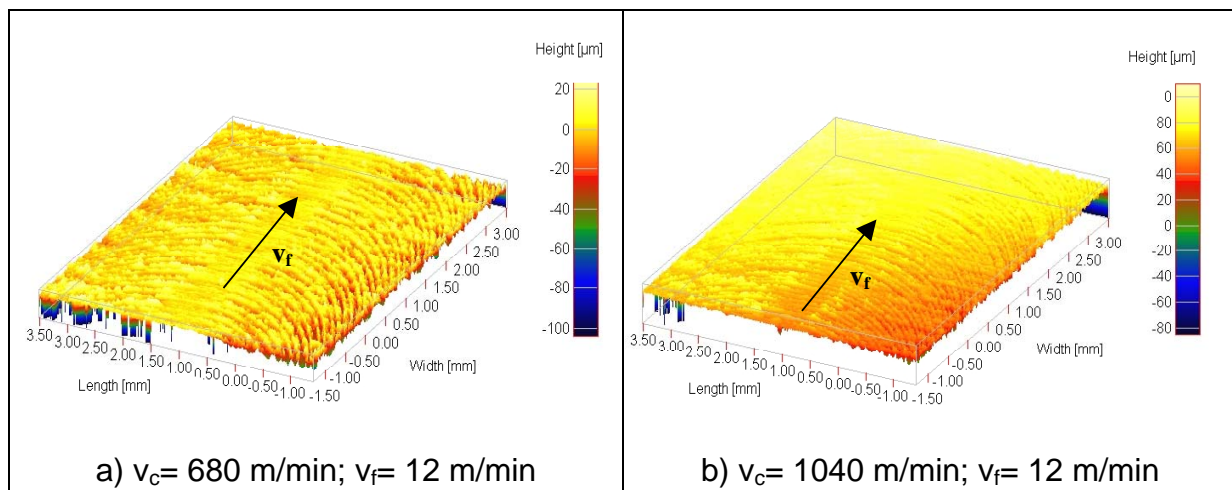


Abb. 3: Optisch vermessene Oberflächen gefräster Werkstücke im Nutgrund bei gleicher Produktivität

Ursache für dieses Verhalten ist eine durch die höhere Schnittgeschwindigkeit verursachte Quasiversprödung des relativ duktilen Aluminiums und der damit einhergehenden Erhöhung des Schnittanteils gegenüber dem Quetschanteil bei der Zerspanung, was auch schon bei /KIS-05/ beobachtet wurde.

5 Zusammenfassung

Mit dem Verbundprojekt wurde eine Lösung zur produktiven Hochgeschwindigkeitsbearbeitung dünner Bleche und Platinen erarbeitet, die durch eine enge Zusammenarbeit des Maschinenherstellers MB-Portatec, des Werkzeugherstellers Lehmann GmbH Präzisionswerkzeuge und einem Hochschulinstitut gekennzeichnet war. Als wichtigstes Ergebnis der Arbeiten kann die Entwicklung und die Bewertung der Leistungsfähigkeit des Spannsystems für dieses Werkstoffe mit Hilfe des mittlerweile patentierten Vlieses angesehen werden.

Die Werkzeuge stellen zur Zeit in Hinblick ihrer Zähnezahl und dem Durchmesser ein sehr gutes Ergebnis dar. Weitere Arbeiten zur Verbesserung der Mikrogeometrie der Schneiden und zur Erhöhung der Zähnezahl mit einem vergrößerten Spanraum stellen die zukünftigen Arbeiten dar.

Mit Hilfe der technologischen Untersuchungen konnten die Vorteile speziell der hohen Schnittgeschwindigkeiten nachgewiesen werden. Neben geringeren Prozesskräften bei gleicher Produktivität konnten vor allem bessere Oberflächengüten erreicht werden, die neben den messbaren Rauheiten bewertet wurden.

Literatur

- /Tei-07/ Teicher, U.; Künanz, K.; Nestler, A.: „The cutting edge“ – Spanende Bearbeitung von Leichtbauwerkstoffen. Bewertung von Hochgeschwindigkeitsfräsbearbeitungsprozessen bei der Zerspaltung von Aluminium in der Luftfahrtindustrie. 1. Dresdner Innovationsforum, Dresden 28.11.2007, Posterpräsentation
- /TEI-08/ Teicher, U., Metzner, D., Lehmann, R., Nestler, A.: High Speed Milling of Thin Plates of Aluminum: Integrated Development of Machines, Tools and Technology. In: Abele, E. (Hrsg.) Proceedings of the 7th International Conference on High Speed Machining (CIRP), Darmstadt, TU Darmstadt, May 28-29 2008, pp.93-98, Bamberg: Meisbach-Verlag, ISBN 978-3-87525-274-3
- /N.N-04/ N.N., 2004, Transport and environment in Europe – A EEA briefing 03/2004, European Environment Agency, Copenhagen
- /CAR-03/ Carpio, F.J., Araújo, D., Pacheco, F.J., Méndez, D., García, A.J., Villar, M.P., García, R., Jiménez, D., Rubio, L., 2003, Fatigue behaviour of laser machined 2024 T3 aeronautic aluminium alloy, Applied Surface Science, 2003/208-209, 194-198
- /ARA-03/ Araújo, D., Carpio, F.J., Méndez, D., García, A.J., Villar, M. P., García, R., Jiménez, D., Rubio, L., 2003, Microstructural study of CO2 laser machined heat affected zone of 2024 aluminum alloy, Applied Surface Science, 2003/208-209, 210-217
- /MET-04/ Metzner et al., 2007, Method and arrangement for processing thin sheets and thin-walled plates or shells that are curved singly or doubly, United States Patent US 7244082 B2
- /TÖN-01/ Tönshoff, H.K., Friemuth, T., Andrae, P., Lapp, C., 2001, High-speed cutting - Fundamentals and machine tool development, 10th Int. Conf. on Precision Engineering, 2001, 97-110
- /HAM-05/ Hamade, R.F., Ismail, F., 2005, A case for aggressive drilling of aluminium, Journal of Materials Processing Technology, 2005/166, 86-97
- /KIS-05/ Kishawy, H.A., Dumitrescu, M., Ng, E.-G., Elbestawi, M.A., 2005, Effect of coolant strategy on tool performance, chip morphology and surface quality during high-speed machining of A356 aluminum alloy, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005/45, 219-227