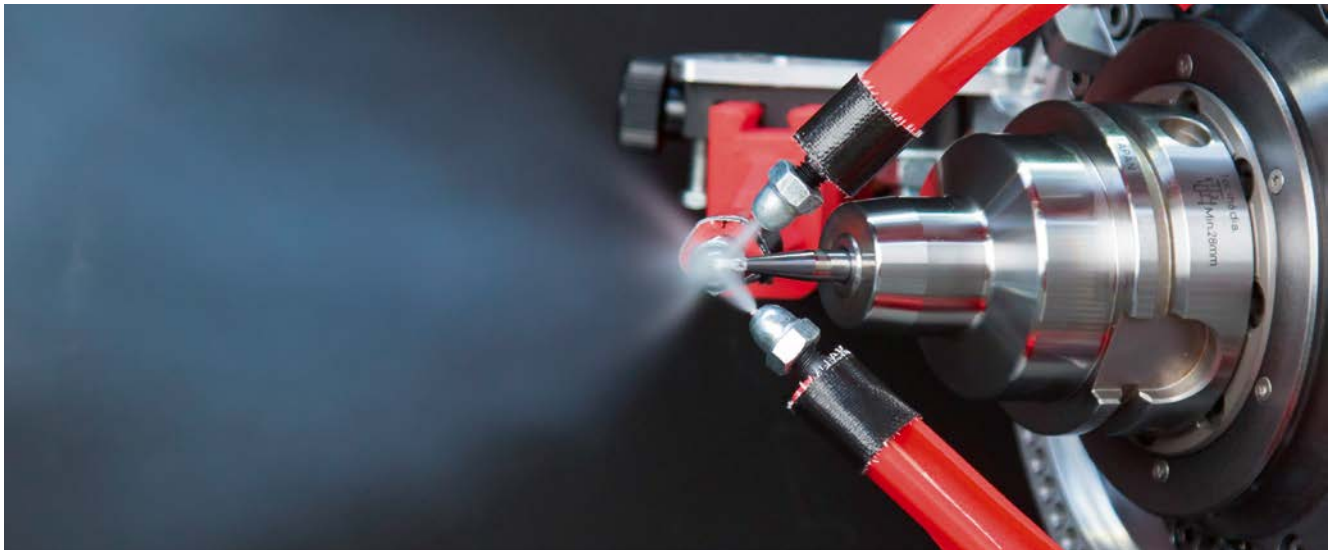
Titanzerspanung ■ kryogene Kühlung ■ Fräswerkzeuge ■ Verschleißminderung

Den Verschleiß kaltgestellt

Bei der Zerspanung von Titanlegierungen bringt der prozesstemperaturbedingte Verschleiß Werkzeuge schnell an ihre Grenzen. Ein Ansatz, diesem Problem zu begegnen, stellt die kryogene Kühlung dar. Aus diesem Grund arbeitet Zecha an der Entwicklung neuartiger VHM-Torusfräser.

von Eberhard Abele und Timo Scherer



1 Neu entwickelter VHM-Torusfräser für den Einsatz in der Titanzerspanung unter kryogener CO_2-Schneestrahlkühlung (© PTW)

Die Zecha Hartmetall-Werkzeugfabrikation GmbH liefert Vollhartmetallwerkzeuge für eine Vielzahl von Anwendungsbereichen wie Medizintechnik und Aerospace. In beiden Branchen spielen Titan und Titanlegierungen eine große Rolle. Die spanende Bearbeitung dieser Werkstoffe wird durch deren hohe Festigkeit in Verbindung mit dem geringen Wärmeleitkoeffizient stark erschwert. Besonders betroffen davon sind Schruppoperationen, die bei Bauteilen der Luft- und Raumfahrtindustrie mit Zerspanraten von bis zu 90 Prozent einen großen Anteil an der Fertigung haben [1].

Der dominante Werkzeugverschleißtreiber bei der Titanzerspanung ist die thermische Belastung, die aufgrund des geringen Wärmeleitkoeffizienten kaum über die Späne abgeführt wird. Vielmehr sind die Werkzeugschneiden hohen Temperaturen von bis zu 1000 °C ausgesetzt, was Adhäsions- und Diffusionsprozesse begünstigt [1]. Um die Fertigungskosten von Titanbauteilen zu reduzieren, entwickeln die Hersteller stetig neue Werkzeuge und Prozesse, um höhere Zeitspanvolumina und längere Werkzeugstandzeiten zu realisieren.

Kryogene Kühlung – längere Standzeit bei höherer Schnittgeschwindigkeit

Ein vielversprechender Ansatz, den hohen Prozesstemperaturen zu begegnen, stellt die Prozesskühlung durch kryogene Medien wie flüssigem Stickstoff (LN_2) oder Kohlenstoffdioxid (CO_2) dar. Im Fall von CO_2 wird das Medium in flüssiger Form unter hohem Druck (circa 60 bar bei Raumtemperatur) meist durch eine Düse zum Anwendungspunkt geleitet, wo es expandiert und sich dabei auf seine Siedetemperatur von -78,48 °C abkühlt.

Der Einsatz kryogener Kühlung während der Titanzerspanung ist eine effiziente Methode, um die Temperatur am Werkzeugschneidkeil unterhalb der Entfestigungstemperatur des Schneidstoffs zu halten [2]. Untersuchungen belegen, dass dank kryogener Kühlung die Temperatur in der Schneidzone auf unter 500 °C sinkt und es möglich ist, die Schnittgeschwindigkeit gegenüber der Nassbearbeitung nahezu zu verdoppeln [3].

Die Verwendung kryogener CO_2-Schneestrahlkühlung beim Fräsen von Titanlegierungen stellt besondere Anfor-

© 2016 Carl Hanser Verlag, München www.werkstatt-betrieb.de/Archiv Nicht zur Verwendung in Intranet- und Internet-Angeboten sowie elektronischen Verteilern

derungen an Werkzeug und Prozess. Das verwendete Hartmetallsubstrat und die Werkzeugbeschichtung müssen den starken thermischen Schwankungen beim Fräsen standhalten [4]. Die Werkzeuggeometrie muss der Schwingungsneigung des Werkzeugs Rechnung tragen, um Schneidkantenausbrüche zu vermeiden. Diese können durch eine Versprödung des Substrats infolge der eingebrachten Kühlleistung begünstigt werden. Auch der eigentliche Bearbeitungsprozess ist exakt abzustimmen. Die Schnittparameter sind gegenüber der Nassbearbeitung anzupassen, um einen sicheren Prozess zu gewährleisten. Gleiches gilt für die Größe des CO_2-Massenstroms und die zur Anwendung kommende Applikationsstrategie des Mediums. Position und Ausrichtung externer Applikationsdüsen haben großen Einfluss auf den Prozess und können Standzeitverlängerungen von bis zu 80 Prozent bewirken [5].

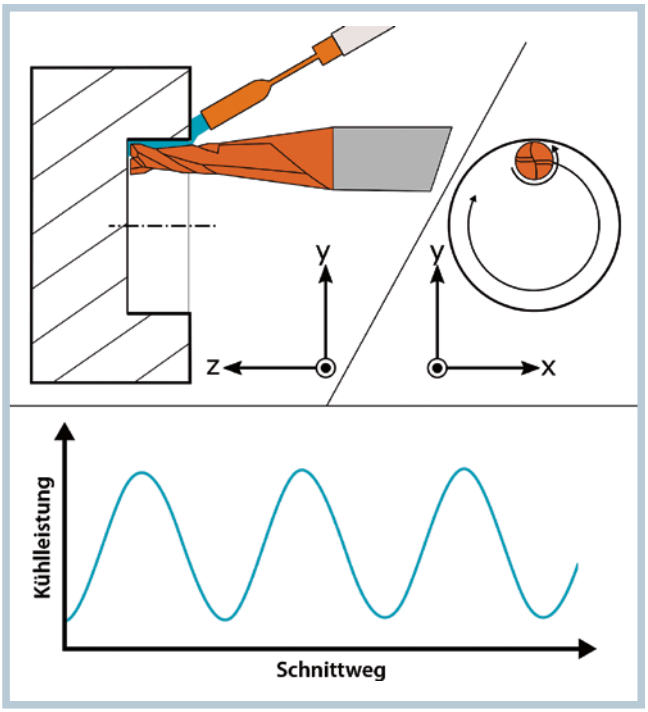
2 Versuchsaufbau der Zerspanungsexperimente mit einfacher Lavalle-Düse (© PTW)

Kombiniertes Schruppen/Schlichten bei medizintechnischen Anwendungen

Ausgehend von dieser Problemstellung arbeitet Zecha im Rahmen eines Förderprojekts der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) gemeinsam mit dem PTW Darmstadt an der Entwicklung eines VHM-Schaftfräsers (Durchmesser 2 mm) zur kombinierten Schrupp-Schlicht-Bearbeitung von Ti-Al6-V4 unter kryogener CO_2-Schneestrahlkühlung. Voruntersuchungen am PTW belegen ein überlegenes Verschleißverhalten torischer Werkzeuggeometrien bei der Titanzerspanung gegenüber einfachen Schaftfräsergeometrien [6]. Daher wurden zu Beginn des Projekts unbeschichtete Torusfräser von Zecha ausgewählt und ein Verschleißbenchmark zwischen Minimalmengenschmierung (MMS) und CO_2-Schneestrahlkühlung durchgeführt. Der Schneestrahl wird über eine externe Lavalle-Düse in die Zerspanungszone eingebracht und ein CO_2-Massenstrom von 17 kg/h festgelegt, der auf Erkenntnissen PTW-eigener Vorarbeiten beruht (Bild 2). Um die Prozessbedingungen medizintechnischer Anwendungen möglichst praxisnah abzubilden, wird ein kombinierter Schrupp-/Schlichtprozess untersucht. In den Zerspanungsversuchen werden Kreistaschen (ø 10 mm, Tiefe 3 mm) in einem zweistufigen Prozess gefräst. Das Voranschreiten des Werkzeugverschleißes wird anhand der Verschleißmarkenbreite (VB) lichtmikroskopisch untersucht.

Der anfängliche Vergleich zwischen MMS und kryogener Kühlung zeigt eine drastische Verschlechterung der Werkzeugstandzeit unter CO_2-Kühlung. Während unter MMS-Bedingungen bis zu 42 Kreistaschen gefertigt wurden, bevor das Abbruchkriterium (VB = 80 µm) erreicht war, mussten die Versuche mit kryogener Kühlung aufgrund großflächiger Schneidkantenausbrüche nach zwei Kreistaschen abgebrochen werden.

Ausgehend von diesen Ergebnissen und den Erkenntnissen einer Literaturrecherche erfolgten erste Optimierungen. Mittels Werkzeugbeschichtung konnten Anhaftungen vermindert und dank einer Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit die Aufbauschneidenbildung reduziert werden. Zudem sorgte eine gezielte Schneidkantenverrundung für mehr Stabilität. Die beschriebenen Maßnahmen ermöglichten die Fertigung von fünf Kreistaschen bis zum Erreichen des Abbruchkriteriums. Dies entspricht einer Standzeitsteigerung von 150 Prozent.



3 Nicht kontinuierliche Einbringung der Kühlleistung beim Fräsen von Kreistaschen (© PTW)

Kontinuierliche Kühlleistung ist entscheidend

Der Einsatz einer einzelnen externen Düse während der Kreistaschenope- »

© 2016 Carl Hanser Verlag, München www.werkstatt-betrieb.de/Archiv Nicht zur Verwendung in Intranet- und Internet-Angeboten sowie elektronischen Verteilern

INFORMATION & SERVICE

INSTITUT

PTW – Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen der TU Darmstadt
64287 Darmstadt
Tel. +49 6151 16-20080
www.ptw.tu-darmstadt.de
AMB Halle 5, D32

HERSTELLER

Zecha Hartmetall-Werkzeugfabrikation GmbH
75203 Königsbach-Stein
Tel. +49 7323 3022-0
www.zecha.de
AMB Halle 1, A35

LITERATUR

[1] *E. Abele et al. (2011):* Titanzerspanung produktiver machen. WB Werkstatt + Betrieb 1-2/2011, S. 34–38

[2] *E. Ezugwu, J. Bonney, Y. Yamane:* An overview of the machinability of aero-engine alloys. Journal of Materials Processing Technology 2/2003, S. 233–253

[3] *S. Y. Hong, Y. Ding (2001):* Cooling approaches and cutting temperatures in cryogenic machining of Ti-6Al-4V. International Journal of Machine Tools and Manufacture 10/2001, S. 1417–1437

[4] *E. Abele et al. (2015):* Die beste Beschichtung für das Fräsen von Titan. WB Werkstatt + Betrieb 5/2015, S. 28–32

[5] *M. J. Bermingham et al.:* A comparison of cryogenic and high pressure emulsion cooling technologies on tool life and chip morphology in Ti–6Al–4V cutting. Journal of Materials Processing Technology 4/2012, S. 752–765

[6] *M. Sieber, E. Abele E. (2013):* Kohlendioxid trifft Titan. WB Werkstatt + Betrieb 10/2013, S. 64–67

[7] *R. Kroh, O. Grasmück:* CO_2-Kühlung der Schneidkanten senkt die Produktionskosten. MM Maschinenmarkt. Vogel Business Media GmbH & Co. KG 2014

DIE AUTOREN

Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele ist Leiter des Instituts für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der TU Darmstadt

Timo Scherer, M.Sc. ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Gruppe Zerspanungstechnologie am PTW
scherer@ptw.tu-darmstadt.de

PDF-DOWNLOAD

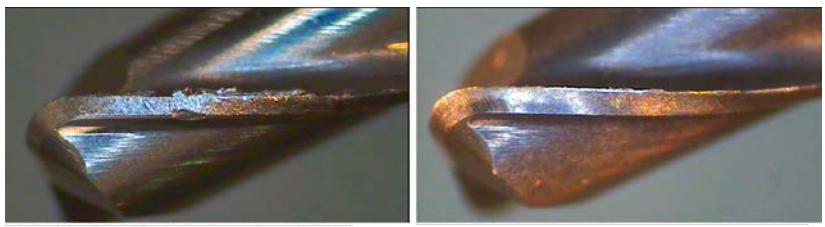
www.werkstatt-betrieb.de/**1431570**

rationen führt zu einer schwankenden Einbringung der Kühlleistung (Bild 3). Um die Auswirkungen dieser Tatsache bemessen zu können, wurde das optimierte Werkzeug zusätzlich zum Bahnenfräsen eingesetzt, bei dem eine kontinuierliche Einbringung des Schneestrahls in die Zerspanungszone sichergestellt ist. Das Ergebnis war eine deutliche Steigerung der Werkzeugstandzeit. Erst nachdem ein Zerspanungsvolumen äquivalent zu 20 Kreistaschen zustande gekommen war, wurde das Abbruchkriterium erreicht – bei optisch deutlich verbessertem Verschleißverhalten mit einer drastischen Reduzierung von Aufschweißungen und Anhaftungen (Bild 4).

Auf den bisherigen Ergebnissen aufbauend, wurden im folgenden Projektabschnitt die Eignung von vier Werkzeuggeometrien, drei Hartmetallsubstraten und drei Beschichtungen getestet. Die Werkzeuggeometrien (T1 bis T4) unterscheiden sich in Bezug auf Drall-, Span-, Frei- und Keilwinkel. Bei den Beschichtungen handelt es sich um eine Monolayer-TiAlN-Schicht (A), eine Multilayer-TiAlN-Schicht (L) sowie um eine nanostrukturierte TiAlN/TiSiN-Schicht (H). Zwei der verwendeten Hartmetallsubstrate (44 und 61) besitzen einen Wolframkarbid-zu-Kobalt-Anteil von 88 zu 12 und unterscheiden sich bezüglich des Substratzulieferers. Das dritte Substrat (40) besitzt einen reduzierten Binderanteil von neun Prozent. Hieraus ergibt sich eine vollfaktorielle Versuchsreihe, in der 36 Werkzeugtypen verglichen werden (Bild 5). Neben den Kreistaschenexperimenten mit Standarddüse wurden Bahnfräsoperationen sowie Kreistaschenoperationen mit einer stärker fokussierten Schneestrahldüse durchgeführt, um die Einbringung der Kühlleistung zu verbessern.

Geometrie, Beschichtung und Substrat bilden ein Wirkpaket

Die Ergebnisse der Untersuchungen verdeutlichen, dass eine separate Betrachtung von Werkzeuggeometrie, Beschichtung und Substrat bei der Entwicklung von Fräswerkzeugen für die kryogene Titanbearbeitung nicht zielführend ist. Die Versuchsreihen zeigen, dass die Geometrien T2 und T3, Beschichtung A und Substrat 61 ungeeignet sind, die übrigen Ergebnisse sind jedoch weniger eindeutig. Beschichtung H zeigt in Verbindung mit Geometrie T1 und Substrat 40 gute Ergebnisse, erweist sich allerdings in Verbindung mit Geometrie T4 als ungeeignet. Beschichtung L wiederum erzielt in Verbindung mit Geometrie T4 deutlich bessere Ergebnisse als mit Geometrie T1. Das Hartmetallsubstrat mit dem reduzierten Binderanteil (40) zeigt übergreifend überlegene Eigenschaften. Es kann demnach festgehalten werden, dass es



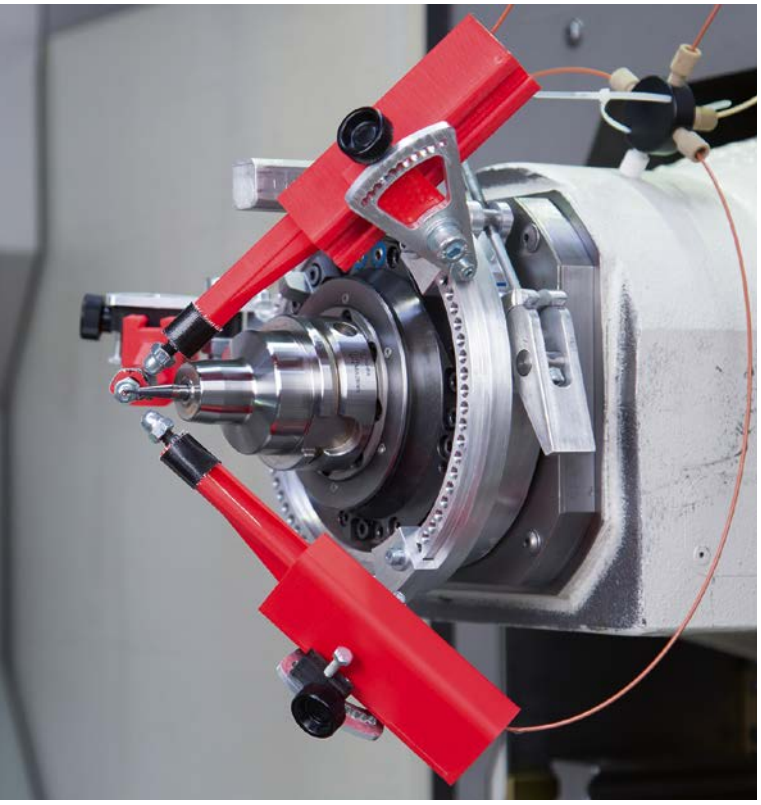
4 Vergleich des Werkzeugverschleißes (Kreistaschenfräsen vs. Bahnenfräsen) (© PTW)

Geometrien	Beschichtungen	Hartmetallsubstrat	Operationen
T1	A Monolayer TiAlN	40 WC-Co (91:9)	Fräsen Kreistasche (Standarddüse)
T2	L Mulitlayer TiAlN	44 WC-Co (88:12)	Fräsen Kreistasche (fokussierte Düse)
T3	H Nanostrukturiert TiAlN/TiSiN	61 WC-Co (88:12)	Bahnenfräsen
T4			

36 Werkzeugtypen (z.B.: T1A40, T3L61)

5 Übersicht über verwendete Werkzeugtypen und untersuchte Operationen (© PTW)

© 2016 Carl Hanser Verlag, München www.werkstatt-betrieb.de/Archiv Nicht zur Verwendung in Intranet- und Internet-Angeboten sowie elektronischen Verteilern



6 Konstruktion zur Einbringung multipler CO_2-Schneestrahlen (© PTW)

auf das Zusammenspiel von Geometrie und Beschichtung ankommt.

Die Erkenntnisse bezüglich der CO_2-Schneestrahlapplikation hingegen sind eindeutig. Sowohl die Versuche mit stärker fokussierter Düse als auch die untersuchten Bahnfräsoperationen zeigen teils deutliche Verbesserungen gegenüber der Standarddüse bei gleichem Werkzeugtyp. Werkzeug T1H40 ermöglicht unter Verwendung der Standarddüse das Fräsen von 40 Kreistaschen. Dieses Ergebnis kann unter Verwendung der fokussierten Düse um 10 Prozent erhöht werden, während die Bahnfräsuntersuchungen eine Erhöhung des Zerspanungsvolumens um 50 Prozent ergibt.

Beim Werkzeugtyp T4L40 wirkt sich eine Verbesserung der Kühlleistungseinbringung noch drastischer aus. Während der Standard-Kreistaschenfräsprozess eine durchschnittliche Anzahl von 27 Kreistaschen ermöglicht, kann das Zerspanvolumen in den Versuchsreihen mit fokussiertem Strahl und beim Bahnenfräsen um 260 Prozent auf ein Volumen-Äquivalent von 70 Kreistaschen erhöht werden. Dies unterstreicht die Wichtigkeit einer kontinuierlichen Einbringung der Kühlleistung während des Fertigungsprozesses.

Standzeiterhöhung um 3500 Prozent

Zum jetzigen Stand des Projekts kann festgehalten werden, dass ausgehend vom unbeschichteten Standardwerkzeug eine Standzeiterhöhung beim kryogenen Fräsen von Titanlegierungen um 3500 Prozent erzielt werden konnte. Im weiteren Projektverlauf wird der Einfluss einer optimierten CO_2-Applikation tiefergehend untersucht. Hierzu kommt eine eigens entwickelte Konstruktion zum Einsatz, die eine gleichmäßigere Einbringung der Kühlleistung beim Fräsen von Kreistaschen ermöglicht (Bild 6). Des Weiteren soll der Einfluss einer kombinierten Anwendung von CO_2 und Minimalmengenschmierung auf die Werkzeugstandzeit untersucht werden.

Es ist abzusehen, dass die Anwendung kryogener CO_2-Schneestrahlkühlung zumindest kurzfristig nicht zum Fertigungsalltag zählen wird. Das liegt zum einen an der selten vorhandenen CO_2-Versorgungsinfrastruktur, die mit hohen Investitionskosten für potenzielle Anwender verbunden ist. Zum anderen muss es das mittelfristige Ziel sein, eine werkzeuginterne Zuführung des kryogenen Mediums für Schaftwerkzeuge zu realisieren, um den Einschränkungen, dem Mehraufwand und den Unsicherheiten durch externe Applikationsmethoden zu begegnen und eine kontinuierliche Einbringung der Kühlleistung zu gewährleisten. Die Vorteile einer internen Applikation konnten am Beispiel eines Messerkopffräsers bereits nachgewiesen werden [7]. Am PTW wird schon an Lösungen für diese Aufgabenstellung gearbeitet, und dank des gemeinsamen Projekts kann Zecha seinen Kunden bereits jetzt Werkzeuge bieten, welche die Potenziale der kryogenen Fertigung nutzen können. ■

© 2016 Carl Hanser Verlag, München www.werkstatt-betrieb.de/Archiv Nicht zur Verwendung in Intranet- und Internet-Angeboten sowie elektronischen Verteilern