

Tiefbohren ■ kryogene Kühlung ■ MMS-Lösungen

Eiskalt auf Effizienz getrimmt

Schwer zerspanbaren Werkstoff tiefzubohren belastet das Werkzeug thermisch stark. Wird kryogen gekühlt, lässt sich der Schmiereffekt erzeugen, indem man den flüssigen CO₂-Strom mit Schmierstoff-Partikeln impft. Das Verfahren hat diverse Potenziale, aber auch Grenzen.

von Dirk Biermann, Gerhard Petuelli und Jan Philipp Jaeger



1 Kleinstbohrer mit austretendem Schmierstoffschnee-Strahl in einem Zerspanprozess mit kryogener Minimalmengenschmierung (kMMS) (© FH SWF)

Der zunehmende Einsatz moderner widerstandsfähiger Werkstoffe wie hochwarmfester Nickelbasislegierungen stellt hohe Anforderungen an die thermische und mechanische Belastbarkeit von Bohrwerkzeugen. Als erschwerender Faktor kommt hinzu, dass die zumeist duktilen und als schwer zerspanbar geltenden Werkstoffe zur Bildung langer Späne neigen, die den Zerspanprozess stören und das Werkzeug oder das Bauteil beschädigen können. Besonders bei Kleinstwerkzeugen führen mangelhafte Späneabfuhr und Spänestauungen oft zum Werkzeugversagen.

In modernen Bohrprozessen wird deshalb nach wie vor meist mit emulsi-

onsbasierten Kühlschmierstoffen (KSS) gearbeitet, unterstützt doch die fortschrittliche Technologie der Minimalmengenschmierung (MMS) die Spanabfuhr nur unzureichend [1 und 2].

Bei kryogener Kühlung kommt es oft zu Werkzeugausfall durch Spänestau

Eine recht neue Möglichkeit, die Wärmeabfuhr aus der Wirkzone zu steigern und zugleich auf KSS-Emulsionen zu verzichten, ist der Einsatz kryogener Medien. Hierbei wird der Wirkstelle beispielsweise flüssiges CO₂ unter einem Druck von circa 60 bar zugeführt, das bei der Expansion auf Umgebungsdruck in den gasförmigen Zustand übergeht und auf

eine Temperatur von ungefähr -79 °C abkühlt [3].

Hierdurch werden zwar die Wärme- und die Späneabfuhr im Vergleich zur MMS-Bearbeitung signifikant verbessert, jedoch kommt es meist infolge fehlender Schmierwirkung schon nach dem Erzeugen weniger Bohrungen zum Werkzeugausfall durch Spänestau, weshalb in der Regel auf eine zusätzliche Zufuhr von MMS zurückgegriffen werden muss [4].

Ein neuer Ansatz wurde bereits in Ausgabe 4/2018 dieser Fachzeitschrift vorgestellt. Bei diesem injiziert man einen Schmierstoff in den flüssigen CO₂-Strom. Dabei werden Kleinstmengen geeigneter Schmierstoffe verwendet, die in

flüssigem CO₂ löslich sind. Die Bildung einer einphasigen Lösung ist äußerst wichtig, weil sonst der Schmierstoff mit hoher Wahrscheinlichkeit in dem rotierenden Spindelkanal abgeschieden wird und eine sichere Zufuhr des kryogenen MMS nicht gewährleistet ist.

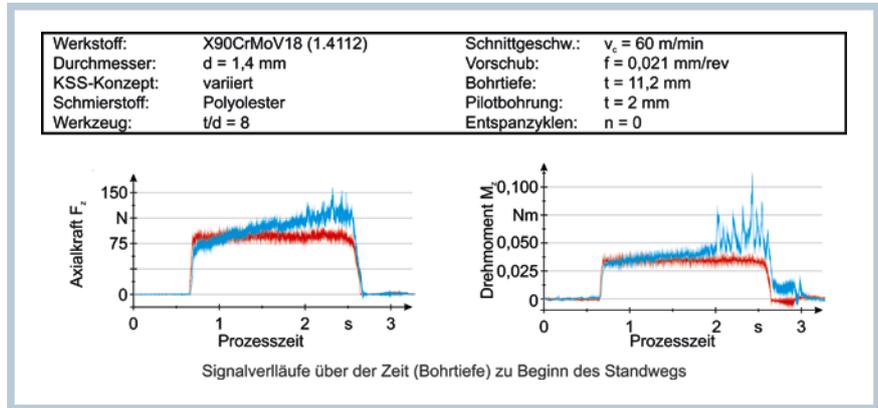
Nachdem die Wirkung der kryogenen Minimalmengenschmierung (kMMS, Bild 1) beim Tiefbohren der schwer zerspanbaren Werkstoffe X90CrMoV18 (1.4112) und Inconel 718 (2.4668) bereits nachgewiesen wurde [5], sollen im Folgenden Potenziale und Grenzen des Verfahrens aufgezeigt werden.

Kühlkanalgeometrie und Parameter stehen in Wechselwirkung zueinander

Um die Leistungsfähigkeit des Systems zu analysieren, wurden in die Werkstoffe 1.4112 und 2.4668 Bohrungen mit einem Durchmesser d von 1,4 mm und mit einer Bohrtiefe t von 8 × d = 11,2 mm eingebracht. Schmierstoff war ein Polyolester, von dem ein Volumenstrom \dot{V} von 6 ml/h in das CO₂ injiziert wurde, was einer Konzentration von etwa 0,5 Gewichtsprozenten entspricht.

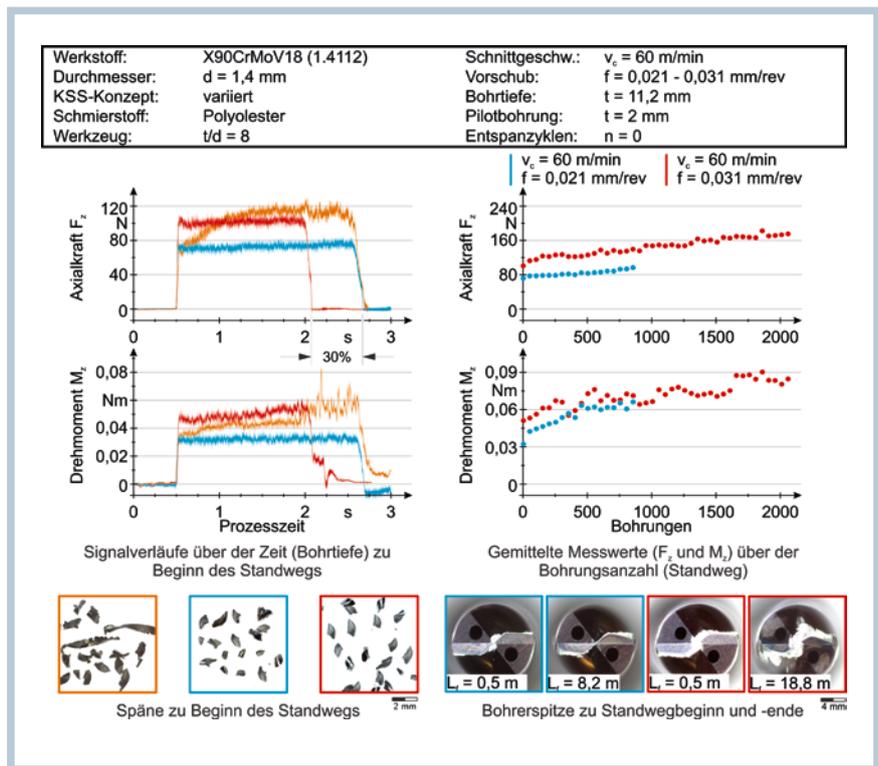
Zu bemerken ist zunächst, dass die mögliche Produktivität der Prozesse erwartungsgemäß von der Stabilität der Werkzeuge abhängt, die durch die inneren Kühlkanäle geschwächt sind. Deshalb empfehlen die Hersteller entsprechend angepasste Schnittdaten für die unterschiedlichen Werkzeuge. Das bedeutet, dass sich für die Zerspanung rostfreier Cr-Stähle mit interner KSS-Zufuhr die Vorschubempfehlung um nahezu den Faktor fünf von f = 0,1 auf 0,021 mm/U und die empfohlene Schnittgeschwindigkeit von v_c = 70 bis 90 auf 60 m/min ändert.

Mit den extern mit Minimalmengenschmierung (eMMS) gekühlten Werkzeugen werden Bohrwege L_f von über 14 m erreicht. Man erzielt diese Werte allerdings nur, wenn zum Transport der Späne aus den Bohrungen und dem wiederholten Benetzen der Werkzeuge mit eMMS drei Entspannungshübe je Bohrung realisiert werden. Die Hauptzeit je Bohrung t_h beträgt dann 4 s (Bohr- und Rückhub). Wird die Bohrung ohne Entspannungshübe in der vollen Tiefe t von 11,2 mm durchgebohrt, beträgt der Standweg noch 8,5 m; die Hauptzeit verringert sich dann auf rund 1 s. Mit den niedrigeren Schnittparametern, die für das innengekühlte Werkzeug angegeben werden, versagt das außengekühlte Werkzeug



2 Vergleich der Prozesssignale bei Anwendung der Technologien eMMS (extern mit Minimalmengenschmierung, blau) und kMMS (kryogene Minimalmengenschmierung, rot)

(© FH SWF)



3 Ergebnisse von Standwegtests zum kMMS-unterstützten Bohren mit höherem Vorschub in 1.4112. Orange: MMS extern, blau: kMMS intern und rot: kMMS intern f_{150%} (© FH SWF)

beim einhubigen Durchbohren schon nach wenigen Bohrungen.

Zudem versagt das außengekühlte Werkzeug mit den niedrigeren Schnittparametern und vier Bohrhüben schon nach einem Standweg von etwa 1 m. Dieser Leistungseinbruch des außengekühlten Werkzeugs bei reduzierten Schnittparametern lässt sich mit der deutlich längeren Eingriffszeit je Bohrung und einer damit verbundenen höheren thermischen Belastung des Werkzeugs begründen. Zudem steigt wegen des reduzierten Vorschubs der erforderliche Schnittweg der Schneiden L_c um den Faktor vier an.

Mit den innengekühlten Werkzeugen (kMMS) wird beim Bohren mit den empfohlenen Schnittwerten ein Standweg von etwa 10 m erreicht; die Hauptzeit be-

trägt 3,25 s. Andererseits versagt das innengekühlte Werkzeug bei der empfohlenen Schnittgeschwindigkeit von 60m/min, aber dem deutlich höheren Vorschub von 0,1 mm/U, der für das außengekühlte Werkzeug angegeben wird, schon in der ersten Bohrung.

Wie der Vergleich der Axialkräfte und der Drehmomente in Bild 2 zeigt, ist der Prozess mit kMMS stabiler als der mit eMMS bei gleichen Schnittparametern. Die Dynamik in den Prozesssignalen beim Bohren mit dem außengekühlten Werkzeug lässt zudem vermuten, dass nicht nur dessen thermische Belastung größer ist, sondern dass auch der Spanfluss mit zunehmender Bohrtiefe kritischer wird.

Der Vergleich der Standwege und der Hauptzeiten, die mit den außen- und »

den innengekühlten Werkzeugen und den jeweils empfohlenen Schnittdaten erzielt wurden, zeigt, dass die Werkzeuge ein relativ enges Technologiefenster haben. Wird dieses eingehalten, dann ist beim Bohren in den Cr-Stahl das außengekühlte Werkzeug wegen der deutlich kürzeren Hauptzeit und des relativ geringeren Standwegunterschieds dem innen- und kryogen-gekühlten Werkzeug überlegen.

Standweg nahm zu von 10 auf 18 m bei kMMS mit höherem Vorschub

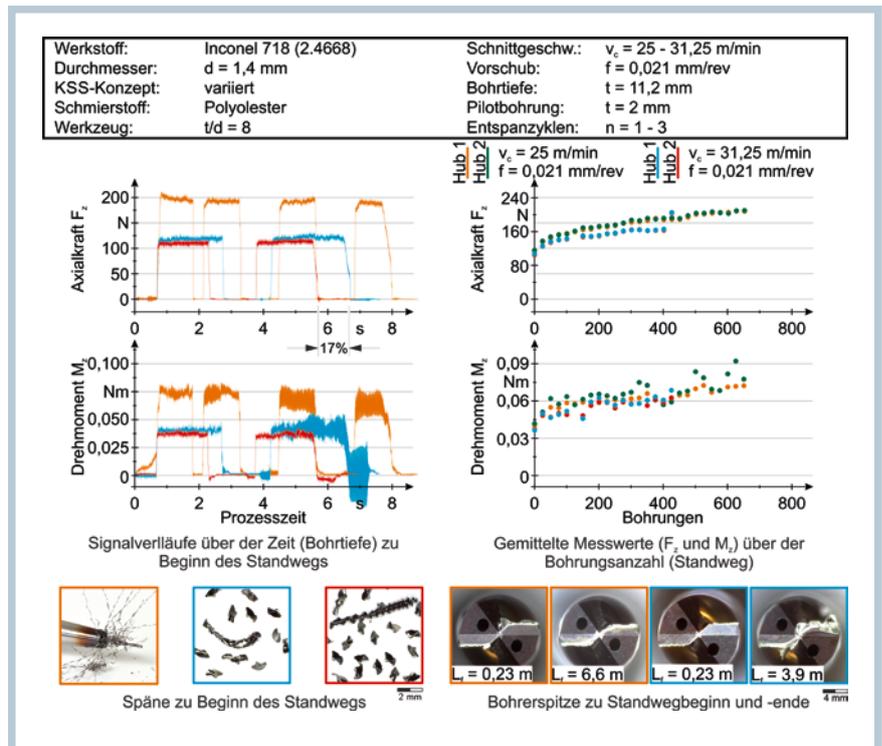
Allerdings zeigten weitere Versuche mit höherer Vorschubgeschwindigkeit beim Bohren mit kMMS, dass mit dieser Technologie weitere Leistungsreserven zu erschließen sind. Wie Bild 3 zu entnehmen ist, kann der Standweg aufgrund der um 50 Prozent auf $f = 0,031$ mm/U gesteigerten Vorschubgeschwindigkeit signifikant auf gut 18 m verlängert werden.

Dabei ist zu beachten, dass, bedingt durch den hohen Chromkarbidanteil in



4 Qualitativer Vergleich der Späne nach dem Bohren von Inconel 718 mit eMMS (links) und mit kMMS (rechts)

(© FH SWF)



5 Ergebnisse eines Standwegtests beim kMMS-unterstützten Bohren in 2.4668.

Orange: MMS extern, blau: kMMS intern und rot: kMMS intern $v_{c125\%}$ (© FH SWF)

der weichgeglühten Ferritmatrix, vorrangig abrasiv wirkende Verschleißmechanismen auftreten [6]. Die Kühlung der kMMS und die damit verbundene Reduktion der thermischen Werkzeugbelastung führt deshalb zwar zu einer Standwegverlängerung, steigert aber nicht zwangsläufig die Produktivität.

Beim Bohren von Inconel 718 gewinnt die Wärmeabfuhr an Bedeutung

Beim Bohren der Nickelbasislegierung Inconel 718 steht der Schneide ein austenitisches Gefüge gegenüber, in dem nur vereinzelt Titancarbid zu finden sind. Beim Zerspanen mit eMMS versagt das Werkzeug nach wenigen Bohrungen, weil der Werkstoff zur Bildung langer Bandspäne neigt (Bild 4). Dieser Werkstoff stellt andere Herausforderungen an den Zerspanprozess, da seine Duktilität und seine Härte eine hohe thermo-mechanische Werkzeugbelastung zur Folge haben, verbunden mit einer erschwerten Späneabfuhr.

Dementsprechend gewinnt die Wärmeabfuhr aus der Wirkzone an Bedeutung, sodass sich mit der kMMS beim Bohren mit den Daten der Schnittwertempfehlung von $v_c = 25$ m/min und $f = 0,021$ mm/U ein kurzbrüchiger Span einstellt. Beim Durchbohren der 11,2 mm dicken Werkstückproben in einem Hub ist jedoch eine starke Abhängigkeit der Spanform von der Bohrtiefe festzustellen. Nach weniger als 20 Bohrungen tritt ein Werkzeugbruch auf. Wird dagegen ein EntspannungsHub eingeführt, ist ein Bohr-Standweg L_f von etwa 6,6 m erreichbar.

Es fällt auf, dass die Standwege stark streuen. Die gemessenen Prozesssignale lassen auf einen instabilen Prozess schließen. So unterscheiden sich die Mittelwerte der gemessenen Drehmomentsignale der beiden Bohrhübe. Vor allem werden die Unterschiede zum Standwegende deutlich größer, was auf eine von zunehmendem Verschleiß erschwerte Spanabfuhr aus der großen Bohrtiefe hinweist.

INFORMATION & SERVICE

LITERATUR

- [1] B. L. Tai, D. A. Stephenson, R. J. Furness und A. J. Shih: Minimum Quantity Lubrication (MQL) in Automotive Powertrain Machining. *Procedia CIRP* 14/2014, S. 523–528
- [2] D. Fratila: Environmentally friendly Manufacturing Processes in the Context of Transition to Sustainable Production. *Comprehensive Materials Processing* 8/2014, S. 163–175
- [3] I. S. Jawahir, H. Attia, D. Biermann, J. Duflou, F. Klocke, D. Meyer, S. T. Newman, F. Pusavec, M. Putz, J. Rech, V. Schulze und D. Umbrello: Cryogenic manufacturing processes. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 65[2016]2, S. 713–736
- [4] O. Grasmück: CO₂-Kühlung der Schneidkanten senkt die Produktionskosten. *MM MaschinenMarkt*, 44/2014, S. 27–31
- [5] D. Biermann, G. Petuelli und J. Jaeger: Mit Kälte smart ins Harte. *WB Werkstatt + Betrieb* 151[2018]4, S. 18–21
- [6] F. Klocke und K. Gerschwiler: Zerspanen von Stahl. *Stahl-Informations-Zentrum*, Merkblatt 2008/137

PDF-DOWNLOAD

www.werkstatt-betrieb.de/

Indem die Schnittgeschwindigkeit auf 31,25 m/min erhöht wurde, ließ sich die Produktivität aufgrund der Verkürzung der Hauptzeit um 17 Prozent auf 6,5 s steigern; die Verläufe der Prozesssignale zeigen zudem eine höhere Prozessstabilität. Die Messergebnisse lassen auf einen stetig fortschreitenden Verschleiß mit anschließendem Werkzeugbruch schließen. Die mikroskopischen Aufnahmen der Bohrer- spitze stützen diesen Eindruck (Bild 5).

Erwähnenswert ist, dass mit einem Vergleichswerkzeug mit geänderter Schneidengeometrie und kleineren Kühlkanälen höhere Vorschübe bei der Zerspanung von 1.4112 prozesssicher realisierbar sind, sodass die Hauptzeit je Bohrung auf etwa 1,5 s sinkt. Leider ließen sich mit diesem Werkzeug keine Bohrungen in Inconel 718 erzeugen, weil es auch bei mehreren Entspannhüben schon in der ersten Bohrung zum Werkzeugbruch kommt.

Dieser Vergleich der beiden Zerspanprozesse mit unterschiedlichen Werkstoffen und Werkzeugen ver-

deutlicht die Bedeutung der Werkzeuggeometrie in Kombination mit den technologischen Einsatzdaten. So deutet die Zerspanung des Edelstahl auf das Potenzial des kleineren Kühlkanals hin, wogegen die duktile Nickellegierung eine für die Spanbildung und -abfuhr optimierte Geometrie erfordert, um eine sichere Späneabfuhr zu ermöglichen.

Es ist festzustellen, dass die kMMS große Potenziale für die Bearbeitung schwer zerspanbarer Werkstoffe erschließt, mit dem Ergebnis von Standweg- und Produktivitätssteigerungen. Um diese Potenziale jedoch ausschöpfen zu können, ist

eine ganzheitliche Systembetrachtung erforderlich. So spielen Verschleißmechanismen eine ebenso große Rolle wie die Gestaltung des Prozesses und der Werkzeuge selbst. Die effiziente Späneabfuhr durch den Schneestrahler eröffnet zweifellos neue Möglichkeiten der Werkzeuggestaltung.

Offen bleiben die Potenziale, die noch im Schmierstoff, in dessen Menge und in weiteren Parametern wie der Bohrtiefe ruhen. Hier bedarf es weiterer Untersuchungen, um die Wechselwirkungen zu erforschen und die Schmierstoffe, Additive und Werkzeuge auf die tiefkalte Umgebung des CO₂-Schneestrahls einzustellen. ■

INFORMATION & SERVICE



INSTITUTE

ISF – Institut für Spanende Fertigung der TU Dortmund

44227 Dortmund

Tel. +49 231 755-2784

www.isf.de

Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik (IPK) der TH Köln

50678 Köln

Tel. +49 221 8275-2362

www.th-koeln.de

Labor für Werkzeugmaschinen und Fertigungsverfahren der Fachhochschule Südwestfalen

59494 Soest

Tel. +49 2921 378-0

www.fh-swf.de

DIE AUTOREN

Prof. Dr.-Ing. Dirk Biermann ist Leiter des ISF an der TU Dortmund
biermann@isf.de

Prof. Dr. Gerhard Petuelli lehrt am IPK der TH Köln
gerhard.petuelli@th-koeln.de

Jan Philipp Jaeger ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der FH Südwestfalen in Soest
jaeger.janphilipp@fh-swf.de