

Bohrungsfeinbearbeitung ■ Nickelbasislegierungen ■ Aerospace-Industrie

Der Rand im Fokus

Beim Bohren von Inconel 718 kann sich das Gefüge der Bohrungsrandzone derart verändern, dass die Bauteilfunktion beeinträchtigt wird. Aktuelle Versuche legen nahe, dass moderate Prozessparameter und ein frühzeitiger Werkzeugwechsel diesem Effekt entgegenwirken.

von Milan Bucker, Ekrem Özkaya, Max Haase und Dirk Biermann

Bei der Bohrbearbeitung von Inconel 718 kommt es häufig zu einer oberflächlich nicht sichtbaren Beeinflussung des Werkstoffgefüges im Bereich der Bohrungsrandzone. Sie kann die Qualität der erzeugten Bohrung mindern und im schlimmsten Fall zu eingeschränkten Funktionseigenschaften führen [1]. Das ist von besonderer wirtschaftlicher Bedeutung, weil es sich beim Bohren um einen wichtigen Prozess bei der Herstellung von Bauteilen für die Luft- und Raumfahrt handelt, der oft erst am Ende des Wertschöpfungsprozesses stattfindet [2]. Negative Beeinflussungen wie etwa weiße Schichten an der Randzone lassen sich allerdings durch den

rechtzeitigen Austausch verschlissener Werkzeuge, die richtige Kühlschmierstrategie und die Anwendung angepasster Prozessparameter vermeiden.

Die Randzone unterliegt hohem Stress bei der Zerspaltung von Inconel 718

Superlegierungen auf Titan- oder Nickelbasis erfreuen sich großer Beliebtheit in der Luft- und Raumfahrt, weil sie eine Vielzahl gewünschter Anwendungseigenschaften in einem einzigen Werkstoff vereinen. Sie sind höchst korrosionsresistent und halten die geforderten Festigkeiten beständig bis in hohe Temperaturbereiche von $T = 700\text{ °C}$ [3].

Diese Eigenschaften, die beispielsweise Inconel 718 zum bevorzugten Werkstoff für den Einsatz in Strahltriebwerken machen, erschweren allerdings auch die spanende Bearbeitung. Die verwendeten Bohrwerkzeuge bestehen meist aus Hartmetall und sind mit Beschichtungen versehen, die ihren Verschleiß verringern und längere Standwege ermöglichen sollen.

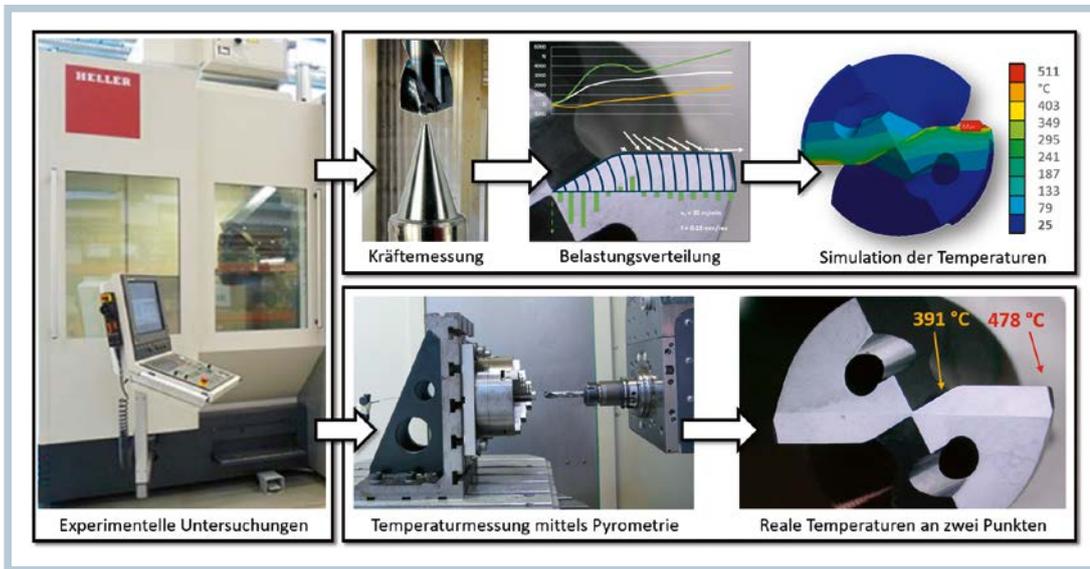
Bei der Bohrbearbeitung (Bild 1) spielt aber auch eine Rolle, dass nicht nur die Werkzeuge den extremen Bedingungen während der Bearbeitung standhalten müssen. Auch die Randzonen des zu bearbeitenden Bauteils erfahren häufig eine messbare Beeinflussung ihrer Eigenschaften [4].

Um den Bohrprozess und seine Auswirkungen auf den Werkstoff zu analysieren, wurden am Institut für Spanende Fertigung (ISF) der TU Dortmund Versuche an Inconel 718 in lösungsgeglühtem und ausgelagertem Zustand durchgeführt. Dabei wurden die auftretenden Kräfte und Temperaturen gemessen und mit den Veränderungen, die anschließend im Werkstoff auftraten, in Zusammenhang gebracht. Eine Übersicht über diese Versuche zeigt Bild 2.

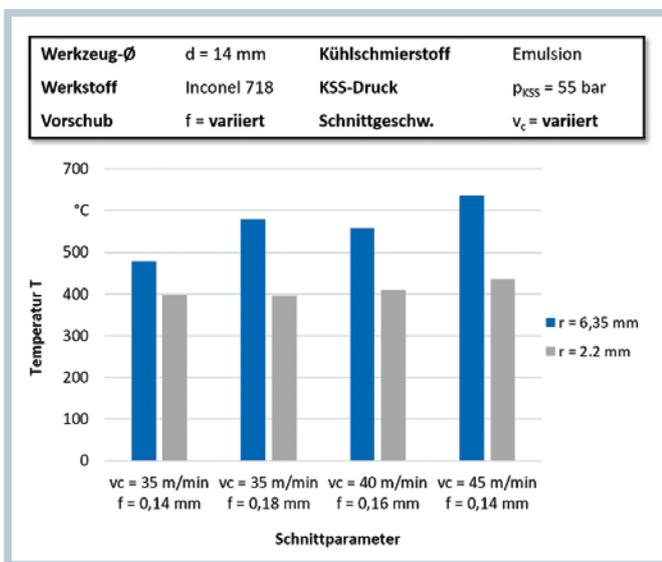
Wie stark die Beeinflussung des Gefüges ausfällt, hängt unter anderem von den Temperaturen während der Bearbeitung ab. Vor allem die Schnittwerte und der Zustand der verwendeten Werkzeuge stehen damit in direktem Zusammenhang. Hohe Schnittgeschwindigkeiten führen zu steigenden Temperaturen an den Schneiden des Bohrers, besonders im Bereich der Schneidenecken.



1 Vermeintlich saubere Bohrprozesse in Inconel 718 zeigen oft eine unerwünschte Begleiterscheinung: von außen nicht sichtbare Fehlstellen an den Bohrungsändern, die die Funktion des gefertigten Bauteils beeinträchtigen können (© ISF)



2 Versuchsreihe zu Bohrprozessen in Inconel 718 und deren Auswirkungen auf den Werkstoff, bestehend aus Experimenten zur Kraft- und Temperaturermittlung entlang der Schneide (© ISF)



3 Temperaturentwicklung an der Schneidenecke ($r_2 = 6,35$ mm) und an der Hauptschneide ($r_1 = 2,2$ mm) in Abhängigkeit von den Schnittwerten (© ISF)

$T_{SE} = 478$ °C; aufgrund der Steigerung der Schnittgeschwindigkeit auf $v_c = 45$ m/min kam es zu einem Temperaturanstieg bis auf $T_{SE} = 635$ °C.

Zusammen mit den Vorschubkräften, die bis zu $F_f = 5$ kN erreichen, wirken diese hohen Temperaturen im Prozess auf Werkstück und Werkzeug ein. Auch ein erhöhter Verschleiß am Werkzeug führt wegen des zunehmenden Anteils der Reib- und Verformungsarbeit während des Schnitts zu steigenden Temperaturen an der Schneide.

In den Pyrometrieversuchen wurden die auftretenden Temperaturen am Werkzeug in zwei Bereichen entlang der Werkzeugschneide gemessen. Am Radius $r_1 = 2,20$ mm im Bereich der sekundären Hauptschneide sowie am Radius $r_2 = 6,35$ mm an der Schneidenecke konnten signifikante Einflüsse durch die Schnittgeschwindigkeit festgestellt werden, wie in Bild 3 dargestellt ist. So ist grundsätzlich ein durchgängiger Zusammenhang zwischen den am Werkzeug ermittelten Temperaturen und den festgestellten Einflüssen am Randzonengefüge der gefertigten Bohrungen erkennbar.

Weißer Schicht und Härteanstieg als negative Effekte in der Randzone

Ein auf den ersten Blick nicht sichtbares Merkmal der Randzonenbeeinflussung sind die sogenannten weißen Schichten an der Oberfläche. Sie können die Dauerhaltbarkeit eines Bauteils erheblich herabsetzen, sodass sie für die qualitative Beurteilung der Oberfläche eine große Rolle spielen. Insbesondere eine Steigerung der Schnittgeschwindigkeit, mit der man meist eine höhere Produktivität des Prozesses anstrebt, begünstigt ihre Entstehung.

Die weißen Schichten können unterschiedlichen Ursprungs sein; zumeist »

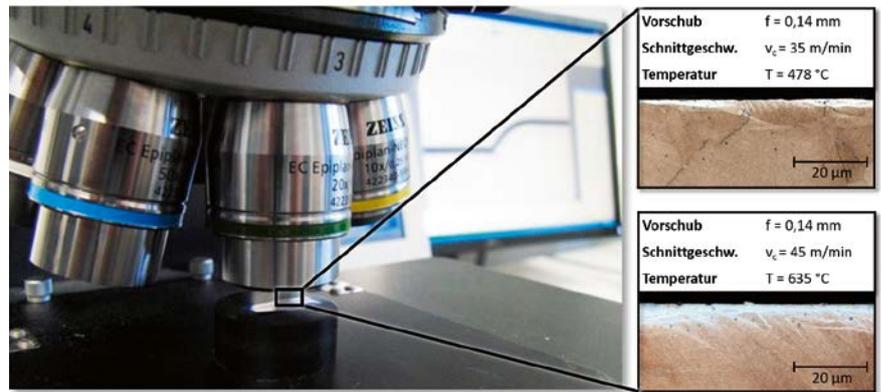
Neuer Versuchsaufbau zur Analyse der Belastung entlang der Schneide

Zur Ermittlung dieser thermischen Belastung dient ein neuer Versuchsaufbau, der zunächst die mechanischen Belastungen entlang der Werkzeugschneide unterscheidbar macht. Dazu wird die Schneide eines zweischneidigen Wendelbohrers so zurückgeschliffen, dass sie nicht mehr in den Eingriff gelangt. Anschließend zerspannt man mit diesem modifizierten Werkzeug ein kegelförmiges Werkstück, wobei mit jeder Umdrehung ein größerer Teil der Schneide in Eingriff kommt. Mithilfe eines Rotationsdynamometers lassen sich die einwirkenden mechanischen Lasten entlang der Schneide in allen Raumrichtungen ermitteln; anschließend können mittels FEM-Simulation die resultierenden Temperaturfelder berechnet werden.

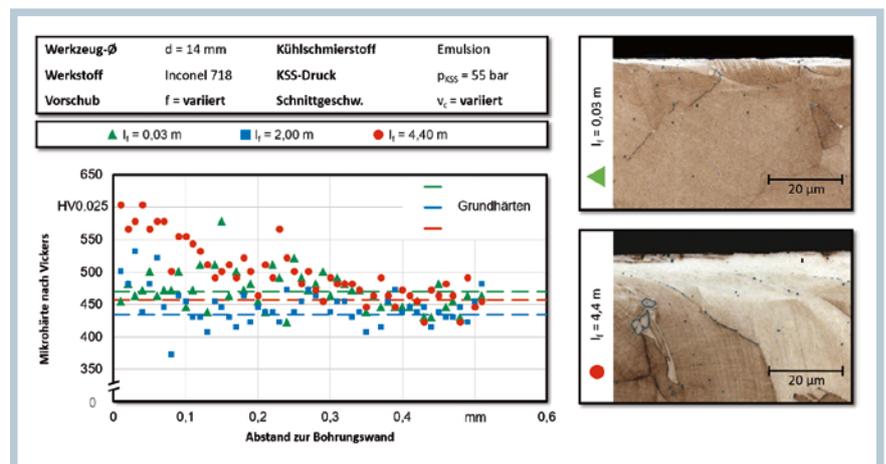
Zur Validierung der so ermittelten Daten wurde ein 2-Farben-Pyrometer verwendet. Dabei platzierte man eine Glasfaser mit der Dicke $d_f = 0,3$ mm so

im Bohrweg, dass sie während des Prozesses zerspannt wird. Auf diese Weise lassen sich die einzelnen Überläufe der Werkzeugschneide detektieren, da bei jeder Berührung mit der Glasfaser ein charakteristisches Infrarotspektrum in diese eingeleitet wird. Prinzipbedingt lässt sich so die Temperatur der Schneide auch bei Verwendung einer Innenkühlschmierung mit hohen Zuführdrücken erfassen, was bei der Thermografie nicht möglich wäre. Gleichzeitig reagiert das Pyrometer schneller als ein Thermolement auf auftretende Temperaturschwankungen und ermöglicht eine kontinuierliche Messung entlang des gesamten Bohrwegs.

Alle Versuche wurden mit kopfbeschichteten Vollhartmetallwerkzeugen mit einem Durchmesser von $d = 14$ mm unter Kühlschmierstoffemulsion mit einem Zuführdruck von $p_{KSS} = 55$ bar durchgeführt. Dabei resultierte eine Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 35$ m/min in einer gemessenen Schneideneckentemperatur von durchschnittlich



4 Unter dem Mikroskop zeigen sich unterschiedlich stark ausgeprägte weiße Schichten in der Bohrungsrandzone (© ISF)



5 Längere Standwege der Werkzeuge führen zu höheren Werten für die Randzonenhärte und einer zunehmenden Tiefe der weißen Schichten (© ISF)

entstehen sie bei Inconel 718 infolge von Phasentransformationen unter hoher Temperatur und hohem Druck. Auch eine oxidische Reaktion mit dem Umgebungsmedium [5] und Werkstoffpartikel, die bei hohen Temperaturen auf die Bohrungswand geschmiert werden, sind mögliche Ursachen [2]. Eine metallografische Präparation des Gefüges durch Polieren und Ätzen macht die weißen Schichten erkennbar, wie Bild 4 zeigt.

Die Schichten reichten, unabhängig von den eingestellten Prozessparametern, in keinem der durchgeführten Versuche weiter als bis zu einer Eindringtiefe von $l_s = 0,01 \text{ mm}$ in das Material hinein. Das ist jedoch ausreichend, um Risse und Fehlstellen in der Bohrungswand zu verdecken. Aus diesem Grund sind Bohrungsrandzonen, die hohe Anteile an weißen Schichten aufweisen, beispielsweise für das Einbringen von Gewinden mit hoher Festigkeitsklasse nicht zulässig. Daneben treten Härtesteigerungen an den Randzonen der Bohrungen auf, die auf die hohen thermomechanischen Belastungen zurückzuführen sind und unterschiedlich weit ins Gefüge hineinreichen. Um diese

Härtesteigerungen festzustellen, eignen sich Mikrohärtepfungen nach der Vickers-Methode.

Schneller Schnitt und hoher Vorschub sind nicht immer die beste Lösung

Sowohl hohe Schnittgeschwindigkeiten als auch große zurückgelegte Standwege der Werkzeuge führen zu einer signifikanten Steigerung der Randzonenhärte und einer Ausbildung weißer Schichten, wie Bild 5 veranschaulicht. In beiden Fällen lässt sich die Härtezunahme auf erhöhte Temperaturen während der Bearbeitung zurückführen. Allerdings wirkte sich der Werkzeugverschleiß in den betrachteten Versuchen nur dann aus, wenn zuvor nur eine schwache Randzonenbeeinflussung vorlag.

Bei den Schnittwerten, die das Gefüge bereits bei der Bearbeitung mit einem noch nicht eingesetzten Werkzeug stark beeinträchtigen, erhöhte sich der Grad der Beeinflussung im weiteren Verlauf des Bohrwegs nicht merklich. In allen untersuchten Fällen reichte die beschriebene Aufhärtung des Randzonengefüges bis zu einer maximalen Tiefe von $l_H = 0,3 \text{ mm}$ in den Werkstoff und über-

stieg damit die Dicke der weißen Schichten um ein Mehrfaches.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass im Rahmen der durchgeführten

Versuche die auf unterschiedliche Bereiche der Werkzeugschneide einwirkenden mechanischen Lasten ermittelt werden konnten. Außerdem wurden, unter Einsatz von Innenkühlschmierung und gängiger Prozessparameter, an zwei Bereichen der Schneide die tatsächlich herrschenden Temperaturen detektiert. Diese konnten analysiert und mit den auftretenden Veränderungen in der Bohrungsrandzone in Verbindung gebracht werden. Dabei handelte es sich um Härtesteigerungen und weiße Schichten, die die mechanischen Eigenschaften der Bohrung beeinflussen.

Die Untersuchungsergebnisse verdeutlichen, dass eine möglichst wirtschaftliche Fertigung von Bohrungen in Inconel 718 nicht zwingend von besonders produktiven Prozessparametern abhängt. Obwohl aktuell verwendete Werkzeuge hohe Schnittgeschwindigkeiten und Vorschubwerte über längere Standwege ermöglichen, können moderate Prozessparameter und ein frühzeitiger Werkzeugwechsel die günstigere Herangehensweise sein, wenn es darum geht, Bohrungen mit hoher Güte in anspruchsvolle Werkstoffe einzubringen. ■

INFORMATION & SERVICE



INSTITUT

ISF – Institut für Spanende Fertigung der TU Dortmund

44227 Dortmund

Tel. +49 231 755-2784

www.isf.de

LITERATUR

[1] *F. Tikal und D. Kammermeier:*

Vollhartmetallbohrer und -fräser; Qualität und Leistungsfähigkeit moderner Schneidstoffe. Verlag Moderne Industrie Landsberg 1993

[2] *A. Sharman, A. Amarasinghe und K. Ridgway:*

Tool life and surface integrity aspects when drilling and hole making in Inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology*, 200[2008]1-3, S. 424–432

[3] *Bibus Metals AG:*

Inconel alloy 718 data sheet, www.bibusmetals.ch, 2001, 26.10.2017

[4] *P. Adam und M. Eckstein:*

Zeitfestigkeit und Randschicht – Eigenschaften durch Zerspanung bei Nickellegierungen. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 27(1996)6, S. 272–279, DOI: 10.1002/mawe.19960270605

[5] *C. Herbert, D. Axinte, M. Hardy und P. D. Brown:*

Investigation into the characteristics of white layers produced in a nickel-based superalloy from drilling operations. *Machining Science and Technology* 16(2012), S. 40–52, DOI: 10.1080/10910344.2012.648520

DIE AUTOREN

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

Dr.-Ing. Ekrem Özkaya und **M.Sc. Milan Buecker** sind wissenschaftliche Mitarbeiter am ISF
oezkaya@isf.de, buecker@isf.de

B.Sc. Max Haase ist studentischer Mitarbeiter am ISF
max2haase@tu-dortmund.de

PDF-DOWNLOAD

www.werkstatt-betrieb.de/5776083