



Auch die Leistungsfähigkeit von HSS (High Speed Steel)-Fräs Werkzeugen kann durch geeignete Maßnahmen signifikant gesteigert werden.

Bild: Zephram, Appel Werkzeuge

Leistungssteigerung durch optimierte Mikrogeometrien und Beschichtungen

# HSS – produktiv mit Verrundungs-Beschichtungs-Kombination

Georg Erkens, Aachen, Berend Denkena und Björn Richter, Hannover

Der Schneidstoff HSS (Hochleistungs-Schnellarbeits-Stahl) findet bis heute trotz der gegenüber Hartmetallen geringeren mechanischen Festigkeit und Härte zahlreiche Anwendungsgebiete in der Zerspaltung. Insbesondere bei der Bearbeitung von Stählen mittlerer und geringer Härte wird HSS aufgrund seiner hohen Zähigkeit und Kantenfestigkeit eingesetzt. Die erreichbare Produktivität schränkt dabei häufig den Einsatz von HSS-Werkzeugen ein. Mit der richtigen Kombination aus Mikrogeometrie und Beschichtung können die Bearbeitungsgeschwindigkeiten bei gleichzeitig erhöhter Prozesssicherheit jedoch deutlich gesteigert werden.

Selbst bei hochlegierten Stählen wie X5CrNi18-10 lassen sich durch optimierte Mikrogeometrien und Beschichtungen Steigerungen der Produktivität um bis zu 80 % gegenüber marktüblichen HSS-Schaftfräsern erreichen.

## Ausgangssituation

Neben Schaftwerkzeugen aus Hartmetall (HM) stellen Werkzeuge aus dem (seit dem Jahr 1900 bekannten) Hochleistungsschnellarbeitsstahl den größten Anteil an Schneidstoffen in der spanenden Fertigung. HSS zeichnet sich durch eine hohe Biegebruchfestigkeit und Zähigkeit sowie eine Härte von 60–67 HRC bei bis zu 600 °C aus

## Autoren

Dr.-Ing. **Georg Erkens**, Jahrgang 1962, promovierte 1998 an der RWTH Aachen und ist als Geschäftsführer der Surcoatec Deutschland GmbH tätig.

Prof. Dr.-Ing. **Berend Denkena**, Jahrgang 1959, leitet das Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) am Produktionstechnischen Zentrum der Leibniz Universität Hannover (LUH).

**Björn Richter**, M. Sc., Jahrgang 1983, studierte Maschinenbau an der HS Hannover und der LUH. Seit 2013 ist er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IFW im Bereich Fertigungsverfahren tätig.

[1;2]. Diese wird durch die Legierungselemente Wolfram, Molybdän, Vanadium und Kobalt bestimmt. Die Härte und der damit verbundene gute Verschleißwiderstand ergeben sich dabei aus dem martensitischen Grundgefüge und den darin eingelagerten Karbiden der Legierungsbestandteile [1–3].

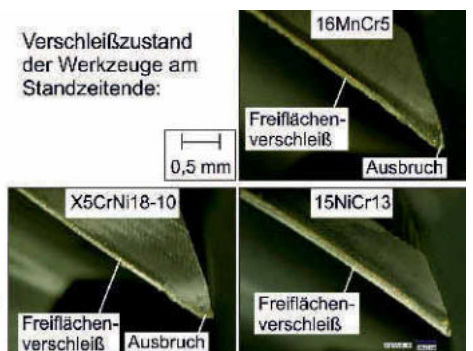
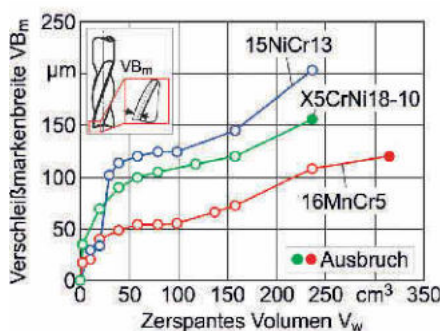
Die Größe und Anzahl der Karbide kann wiederum durch die Legierungselemente und die Wärmebehandlung des HSS beeinflusst werden [4;5]. Die Eigenschaften des HSS sowie seine gute Bearbeitbarkeit führen auch heute noch zu einem breiten Einsatzgebiet, insbesondere für Werkzeuge mit scharfen Schneidkanten und kleinen Keilwinkeln beim Fräsen, Bohren, Gewinden und Räumen [2].

Trotz des vielfältigen Einsatzes von HSS-Werkzeugen fanden Optimierungen der Werkzeugmikrogeometrie in den letzten 20 Jahren jedoch fast ausschließlich im Bereich der HM-Werkzeuge [6] statt. Das Potential der dadurch erzielbaren Steigerungen der Leistungsfähigkeit und Prozesssicherheit lässt sich aber auch auf HSS-Werkzeuge übertragen.

Trotz des vielfältigen Einsatzes von HSS-Werkzeugen fanden Optimierungen der Werkzeugmikrogeometrie in den letzten 20 Jahren jedoch fast ausschließlich im Bereich der HM-Werkzeuge [6] statt. Das Potential der dadurch erzielbaren Steigerungen der Leistungsfähigkeit und Prozesssicherheit lässt sich aber auch auf HSS-Werkzeuge übertragen.

## Referenzuntersuchungen

Die Leistungsfähigkeit von (derzeit am Markt erhältlichen) HSS-Schaftfräsern wurde bei der Zerspaltung der Einsatzstähle



Werkstoff	$v_c$ in m/min	$f_z$ in mm	$a_e$ in mm	$a_p$ in mm
16MnCr5	60	0,035	2,4	4,0
15NiCr13	50	0,035	2,4	4,0
X5CrNi18-10	40	0,030	2,4	4,0

**Prozess:** Stirnumfangsfräsen im Teilschnitt  
**Kühlung:** KSS 12 bar (Emulsion 6 %)  
**Werkzeuge:** HSS-E-PM, Beschichtung TiAlN/TiN  
 $d = 8 \text{ mm}$ ,  $z = 4$ ,  $\delta = 35^\circ/38^\circ$

**Standzeitkriterium:**  
 Verschleißmarkenbreite  $V_{Bm} > 200 \mu\text{m}$   
 Ausbruch CH  $> 150 \mu\text{m}$

Bild 1. Verschleißverhalten der Referenzwerkzeuge.

# Schneidstoffe

16MnCr5 und 15NiCr13 sowie dem austenitischen Stahl X5CrNi18-10 untersucht. Die Versuche mit den TiAlN/TiN beschichteten Schaftfräs Werkzeugen aus HSS-E-PM (Durchmesser  $d = 8$  mm, Zähnezahl  $z = 4$ , Drallwinkel  $\delta = 35^\circ/38^\circ$ ) wurden dabei im Stirnumfangsfräsen im Teilschnitt (Schnittbreite  $a_e = 2,4$  mm, Schnitttiefe  $a_p = 4,0$  mm) auf einem 4-Achs-Bearbeitungszentrum „Heller MCI16“ mit dem Einsatz von Kühlschmierstoff (KSS) bei 12 bar durchgeführt. Die Schnittgeschwindigkeit  $v_c$  und der Zahnvorschub  $f_z$  wurden entsprechend der Angaben des Werkzeugherstellers für die zu bearbeitenden Werkstoffe gewählt (Bild 1, Tabelle unten links). Die eingesetzten Referenzwerkzeuge haben Verrundungen mit einem Schneidkantenabschnitt an der Freifläche von  $S_\alpha = 22 \pm 4 \mu\text{m}$  und an der Spanfläche von  $S_\gamma = 17 \pm 3 \mu\text{m}$ . In den Zerspanuntersuchungen zeigte sich, dass die Bearbeitung der Werkstoffe zu Ausbrüchen an den Schneiden und insbesondere der Schneidenecke führte. Die Standzeit der Werkzeuge bei der Zerspanung der Werkstoffe 16MnCr5 und X5CrNi18-10 wurde somit auch durch den Ausbruch der Werkzeugschneiden bestimmt (Bild 1).

Bei den Werkzeugen zur Bearbeitung des Einsatzstahls wurde hingegen das Standzeitende aufgrund von abrasivem Freiflächenverschleiß erreicht. Jedoch traten auch hier Ausbrüche an der Schneidenecke auf.

## Leistungssteigerung von HSS-Werkzeugen

Basierend auf dem Verschleißverhalten der Referenzwerkzeuge wird zur Steigerung der Leistungsfähigkeit von HSS-Werkzeugen die Erhöhung der Prozesssicherheit und somit die Minimierung von Ausbrüchen der Schneidkante fokussiert. Gleichzeitig wird durch optimierte Kombinationen aus Schneidkantenverrundung und Beschichtung eine Steigerung der Produktivität angestrebt. Hierzu werden die Werkzeuge anhand der Erkenntnisse bei Hartmetall-

Tabelle. Eigenschaften der eingesetzten Beschichtungen (\* abgestimmt auf HSS hinsichtlich Prozessführung, Schichtzusammensetzung und -aufbau).

Beschichtungsvariante*)	MpC_2	MpC_3
Mikrohärte	3.400 HV <sub>0,05</sub>	3.200 HV <sub>0,05</sub>
Max. Einsatztemperatur	> 1100 °C	> 1000 °C
Reibwert gegen Stahl	0,3 – 0,4	0,2
Schichtdicke	3 $\mu\text{m}$	3 $\mu\text{m}$
Schichtarchitektur	nano-lamellar	nano-lamellar
Einsatz bei	X5CrNi18-10	16MnCr5, 15NiCr13

werkzeugen [6] verrundet und mit auf HSS prozesstechnisch ausgelegten multifunktionalen Hochleistungsbeschichtungen (MpC) versehen.

Diese MpC-Multifunktionsschichten sind Mehrstofflegierungen und wurden durch Mikrolegieren dahingehend entwickelt, dass sie sich den Anforderungen in der Kontaktzone bei verschiedenen Anwendungen adaptiv anpassen können. Durch die Ausscheidung intermediärer und intermetallischer Phasen im Nanobereich werden Härte, Zähigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Temperaturstabilität und Reibungswiderstand bei verschiedenen Applikationen verändert.

Eine konstante und einheitliche Verrundung über die gesamte Länge der einzelnen Schneiden der Werkzeuge wird durch eine 3-fach-Rotation des Werkzeugs in der Schleppscheifenanlage realisiert. Das Abrasivmedium wird dabei vorrangig durch die Spannuten und somit entlang der Spanfläche gefördert, um zur Spanfläche geneigte Schneidkantenverrundungen (Formfaktor  $\kappa > 1$ ) mit zu erzeugen. Diese werden aufgrund der vorliegenden Erkenntnisse zu HM-Werkzeugen zur Reduzierung der Ausbruchneigung mit einer mittleren Schneidkantenverrundung von  $\bar{S} > 30 \mu\text{m}$  angestrebt. Ergebnis der Verrundung durch Schleppscheifen sind Werkzeuge mit einem Schneidkantenabschnitt an der Freifläche von  $S_\alpha = 30 \pm 3 \mu\text{m}$  und einem Schneidkantenabschnitt an der Spanfläche von  $S_\gamma = 42 \pm 5 \mu\text{m}$ .

Hieraus resultiert eine mittlere Schneidkantenverrundung von  $\bar{S} > 37 \pm 3 \mu\text{m}$  und ein Formfaktor  $\kappa = 1,5$ . Für die weiteren Zerspanuntersuchungen werden die verrundeten Werkzeuge mit (TiAl)N-basierten,

prozesstechnisch auf HSS ausgelegten Multifunktions-schichten versehen. Bei den Einsatzstählen 16MnCr5 und 15NiCr13 kommt dabei eine MpC\_3-Schicht zum Einsatz, der hochlegierte Stahl

X5CrNi18-10 wird hingegen mit einer temperaturbeständigeren MpC\_2 Beschichtung bearbeitet. Die Eigenschaften der eingesetzten Multifunktions-schichten sind in der Tabelle zusammengefasst. Die Versuche wurden dabei mit denselben Prozesseinstellgrößen wie bei den Referenzuntersuchungen durchgeführt und bei Erreichen des zerspannten Volumens der Referenzwerkzeuge abgebrochen.

## Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse des Verschleißverhaltens mit den optimiert verrundeten und beschichteten Werkzeugen bei Erreichen des Standzeitkriteriums in Bild 2 zeigen, dass Ausbrüche an den Schneidkanten durch die Kanten- und Oberflächenpräparation nicht mehr auftreten. Stattdessen tritt nun bei allen drei Werkstoffen gleichmäßiger Freiflächenverschleiß auf. Die Prozesssicherheit der HSS-Werkzeuge kann somit durch eine geeignete Kombination aus Verrundung und Beschichtung signifikant gesteigert werden.

Aufgrund des Verschleißverhaltens der optimierten Werkzeuge bieten diese hohes Potential zur Erhöhung der Prozessstellgrößen und damit zur Steigerung der Produktivität beim Einsatz von HSS-Fräsern. Bei den hinsichtlich der Mikrogeometrie und der Beschichtung optimierten Werkzeugen wird daher gleichzeitig die Schnittgeschwindigkeit  $v_c$  um 50 % und der Zahnvorschub  $f_z$  um 20 % erhöht.

In der Tabelle in Bild 3 sind diese Erhöhungen unter der Bezeichnung MpC\_2+ und MpC\_3+ aufgelistet. Beim Einsatz der Werkzeuge zeigt sich (trotz der Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit und des Vorschubs) bei den Werkstoffen 15NiCr13 und X5CrNi18-10 aufgrund der optimierten Kombination aus großer Verrundung und multifunktionaler Beschichtung ein besseres Verschleißverhalten gegenüber den Referenzwerkzeugen (Bild 3). Bei 16MnCr5 ergibt sich mit den erhöhten Einstellgrößen zwar ein schneller fortschreitender Verschleißverlauf als bei den Referenzstellgrößen, jedoch tritt auch hier

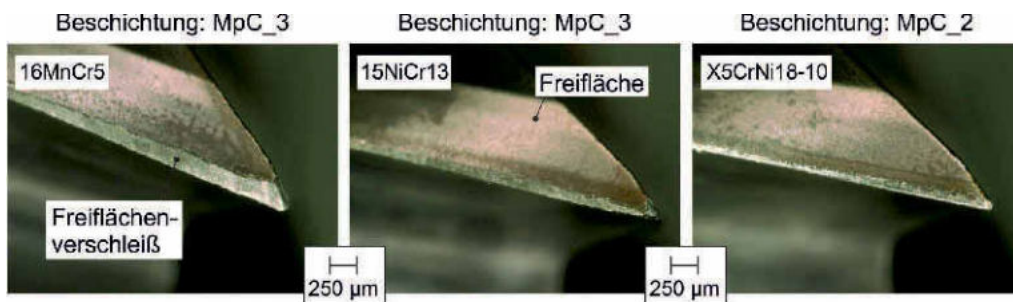
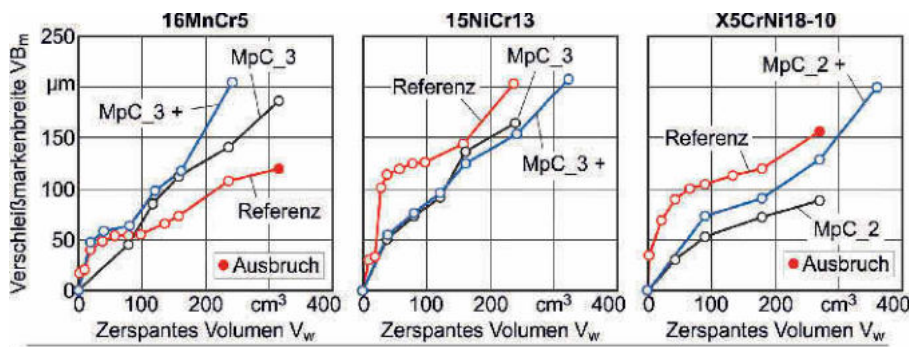


Bild 2. Verschleißverhalten der optimierten Werkzeuge. Standzeitkriterium: Abbruch bei Erreichen des zerspannten Volumens der Referenzwerkzeuge. Sonstige Prozessparameter: siehe Bild 1.





	$v_c$ in m/min			$f_z$ in mm		
	Referenz	MpC_3 MpC_2	MpC_3 + MpC_2 +	Referenz	MpC_3 MpC_2	MpC_3 + MpC_2 +
16MnCr5	60	60	90	0,035	0,035	0,042
15NiCr13	50	50	75	0,035	0,035	0,042
X5CrNi18-10	40	40	60	0,030	0,030	0,036

**Prozess:** Stirnumfangsfräsen im Teilschnitt  
 $a_e = 2,4$  mm;  $a_p = 4$  mm  
**Kühlung:** KSS 12 bar (Emulsion 6 %)  
**Werkzeug:** HSS-E-PM

Bild 3. Vergleich des Einsatzverhaltens der Werkzeuge.



Werkstoff	$v_c$ in m/min	$f_z$ in mm	$a_e$ in mm	$a_p$ in mm
16MnCr5	90	0,042	2,4	4,0
15NiCr13	75	0,042	2,4	4,0
X5CrNi18-10	60	0,036	2,4	4,0

**Prozess:** Stirnumfangsfräsen im Teilschnitt  
**Kühlung:** KSS 12 bar (Emulsion 6 %)  
**Werkzeuge:** HSS-E-PM, Beschichtung MpC  
 $d = 8$  mm,  $z = 4$ ,  $\delta = 35^\circ/38^\circ$   
**Standzeitkriterium:** Verschleißmarkenbreite  $VB_m > 200$  µm

Bild 4. Verschleißverhalten der optimierten Werkzeuge bei gesteigerten Werten für Schnittgeschwindigkeit und Vorschub.

konstanter Freiflächenverschleiß ohne Ausbrüche auf, Bild 4.

Die Werkzeuge beim Einsatz in 15NiCr13 und X5CrNi18-10 zeigen ebenfalls abrasiven Freiflächenverschleiß ohne Ausbrüche entlang der Schneide am Standzeitende (Bild 4). Trotz der erhöhten Einstellgrößen können die optimierten HSS-Werkzeuge prozesssicher und mit einem kontrollierbaren Verschleißverhalten auch bei höher

legierten Werkstoffen eingesetzt werden. Die Schneidkantenverrundung führt dabei zu einer Reduktion der Spannungsbelastung im Schneidkeil und verringert deutlich die Neigung zu Ausbrüchen. Die Beschichtung erhöht gleichzeitig die thermische Isolation und den Schutz des Substrats vor der thermischen Belastung im Zerspansprozess.

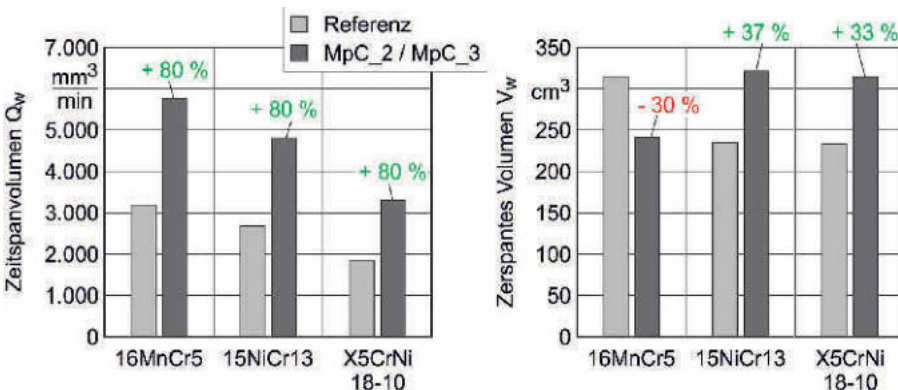


Bild 5. Steigerung der Produktivität durch optimierte HSS-Werkzeuge.

Fazit

Aus der Steigerung der Prozesseinstellgrößen resultiert eine Erhöhung des Zeitspanvolumens  $Q_w$  um 80 % gegenüber den Referenzstellgrößen bei allen drei untersuchten Werkstoffen (Bild 5). Da die Optimierung der Schneiden gleichzeitig das Einsatz- und Verschleißverhalten der Werkzeuge verbessert, ergibt sich zudem bei 15NiCr13 und X5CrNi18-10 ein Anstieg des zerspannten Volumens  $V_w$  um 37 % beziehungsweise 33 % (Bild 5). Somit kann sogar bei hochlegierten Stählen die Produktivität bei gleichzeitiger Erhöhung der Leistungsfähigkeit und Prozesssicherheit von HSS-Fräswerkzeugen durch eine optimierte Kombination aus Schneidkantenverrundung und Beschichtung signifikant gesteigert werden.

Beim Werkstoff 16MnCr5 ergibt sich hingegen eine Senkung des zerspannten Volumens um 30 %, jedoch wird dieses durch die Steigerung der Produktivität um 80 % bei gegebener Prozesssicherheit ausgeglichen. Der Schneidstoff HSS bietet somit – durch Optimierungen der Schneidkantengestalt in Kombination mit multifunktionalen Beschichtungen – erhebliches Potential für eine wirtschaftliche Bearbeitung unterschiedlicher Stähle.

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) für die Bereitstellung der finanziellen Mittel im Projekt „Ressourceneffizienzsteigerung durch innovative Hochleistungs-Oberflächenoptimierung von HSS für die Metallzerspanung“.

Literatur

[1] Denkena, B.; Tönshoff, H. K.: Spanen, Grundlagen. 3. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 2011.  
 [2] Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren 1. 8. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 2008.  
 [3] Boccalini, M.; Goldenstein, H.: Solidification of high speed steels. International Materials Reviews 46 (2001), S. 92–115.  
 [4] Pavlina, E. J.; Speer, J. G.; Tyne, C.J.V.: Equilibrium solubility products of molybdenum carbide and tungsten carbide in iron. Scripta Materialia 66 (2012), S. 243–246.  
 [5] Nurbanasari, M.; Tsakiroopoulos, P.; Palmiere, E.J.: A study of carbide precipitation in a H21 tool steel. ISIJ International 54 (2014), S. 1667–1676.  
 [6] Denkena, B.; Biermann, D.: Cutting edge geometries. CIRP Annals – Manufacturing Technology 63 (2014), S. 631–653.