

Titel

Erhöhung der Leistungsfähigkeit beim Fräsen von Titan- und Nickelbasislegierungen durch Schaftfräser mit Freiflächenmodifikation

IGF-Nr.: 20765 N

Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung: Leibniz Universität Hannover, Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen, Garbsen (IFW)



Institut für Fertigungstechnik
und Werkzeugmaschinen

Ansprechpartner beim Institut:

M. Sc. Sebastian Worpenberg
0511 / 762.2537
worpenberg@ifw.uni-hannover.de

Danksagungen

Das IGF-Vorhaben 20765 N der Forschungsvereinigung Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. – FGW, Papenberger Straße 49, 42859 Remscheid wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Ausgangssituation

Titan- und Nickelbasislegierungen werden als Konstruktionswerkstoffe für hochbelastete und sicherheitsrelevante Bauteile beispielsweise in der Luftfahrt, der Medizintechnik oder im Kontakt mit korrosiven Medien eingesetzt. Während titanbasierte Werkstoffe vor allem aufgrund ihrer dichtespezifischen Festigkeit und ihrer guten Korrosionsresistenz eingesetzt werden, stehen bei nickelbasierten Werkstoffen vor allem die hohe Warmfestigkeit und die ebenfalls sehr gute Korrosionsresistenz im Vordergrund. Aufgrund ihrer Eigenschaften bewirken Titan- und Nickelbasislegierungen in der mechanischen Bearbeitung im Vergleich zu Eisenmetallen eine erhöhte Werkzeugbelastung [KLO13, KLO08, RAH03]. Das hohe thermomechanische Lastkollektiv am Schneidkeil bewirkt einen hohen resultierenden Werkzeugverschleiß [DUD04, WYE12], der zu ungünstigen Oberflächen- und Randzoneneigenschaften im bearbeiteten Bauteil führt [BRE11, RÖT03]. Um günstige Randzoneneigenschaften zu erhalten und Werkzeugbruch sowie resultierende Bauteilbeschädigungen zu vermeiden, wird die Einsatzzeit der Werkzeuge bei der Bearbeitung von Titan- und Nickelbasislegierungen stark limitiert. Hochwertige Schneidstoffe, zusammen mit der benötigten Anzahl von Werkzeugen, verursachen daher erhebliche Kosten in der Zerspanung von Titan- und Nickelbasislegierungen, die um ein Vielfaches höher als bei der Bearbeitung von Stahlwerkstoffen sind. Neben den Werkzeugkosten werden die Produktionskosten bei der Bearbeitung von Titan- und Nickelbasiswerkstoffen durch die geringe Produktivität beim Fräsen infolge der technologisch limitierten Prozesseinstellgrößen gesteigert. Zur Erzeugung der Endkontur von Bauteilen aus Titan- und Nickelbasislegierungen werden oftmals kleine Werkzeugdurchmesser benötigt, bei denen der Einsatz von VHM-Werkzeugen gegenüber Werkzeugen mit Wendeschneidplatten wirtschaftlicher ist.

Die genannten spezifischen Eigenschaften der Legierungen führen bei der mechanischen Bearbeitung zu einer lokal stark überhöhten Temperatur an der Werkzeugschneide und einem großen Temperaturgradienten im Werkzeug. Als Folge entsteht eine große thermische Belastung auf den Schneidstoff. Verbunden mit der hohen Festigkeit bei erhöhten Temperaturen resultieren hieraus große mechanische Werkzeugbelastungen. Insbesondere bei Nickelbasislegierungen führt das stark kaltverfestigende austenitische Gitter sowie ein hoher Anteil intermetallischer Phasen und Karbide zu starkem abrasiven Werkzeugverschleiß. Die Neigung zur Kaltverfestigung ist einer der Hauptgründe für das Auftreten von starker Abrasion im Bereich der maximalen Schnitttiefe am Werkzeug [EZU03, PET02, ZHU13]. Aus den oben genannten Gründen ist die thermische Werkzeugbelastung im Vergleich zur Bearbeitung von Stahlwerkstoffen bei der Zerspanung von Titanlegierungen um ca. 30 % erhöht [DEW12, WES07]. Durch die gesteigerten Temperaturen werden Diffusions- und Adhäsionsprozesse begünstigt, wodurch es zu Aufschweißungen von Werkstückmaterial auf die Werkzeugschneide und durch kontinuierliches Abreißen dieser Aufschweißungen zu gesteigertem Werkzeugverschleiß kommt. [ABE08, EZU03] Das Warmfestigkeitsverhalten der Legierung Ti-6Al-4V ist darüber hinaus die wesentlich

Ursache für die Lamellenspanbildung. Im Gegensatz zu Stahlwerkstoffen zeigt Titan einen starken Festigkeitsabfall bei Temperaturen um 600 °C. Übersteigt die temperaturbedingte Erweichung die dehnungsbedingte Verfestigung im Bereich der Zerspanzone kommt es zur Ausbildung einer Scherebene, wodurch der Span vom Grundmaterial abgleitet und es zur charakteristischen Lamellenspanbildung kommt [ALT01, KRE73]. Auf diese Weise wechseln sich Stauch- und Gleitvorgänge in der Zerspanzone ab. Dies resultiert in einem hohen dynamischen Schnittkraftanteil. Nach Fritsch kann der dynamische Schnittkraftanteil 20 bis 35 % der statischen Kräfte betragen [FRI81]. Als Verschleißmechanismen bei der Titanzerspanung treten Abrasion, Adhäsion, Diffusion, chemische Reaktion sowie Ermüdung auf [HUA05, IKU02, WES07]. Infolge dieser Mechanismen werden die eingesetzten Werkzeuge durch Kolk- und Freiflächenverschleiß sowie Ausbrüche und Rissbildung geschädigt.

Ein Ansatz zur Reduktion des Verschleißes in der Zerspanung stellt die Anwendung eines Freiflächenrücksatzes dar (Abbildung 1). Die Rücksatzgeometrie wird beschrieben mit der Stegbreite S_b , der Stegtiefe S_t sowie der Stegverrundung im Hinterschnitt r . Durch die Stegtiefe steht ein Verschleißvorrat zur Verfügung. Der Vorteil hierbei ist, dass die Kontaktbedingungen und damit die Bauteilbelastungen annähernd gleich bleiben, während der Schneidstoff im Rücksatz kontinuierlich verschleißt. Bei geeigneter Auslegung kann somit die Bauteilqualität bei Verlängerung der Standzeit in einem günstigen Bereich gehalten werden.

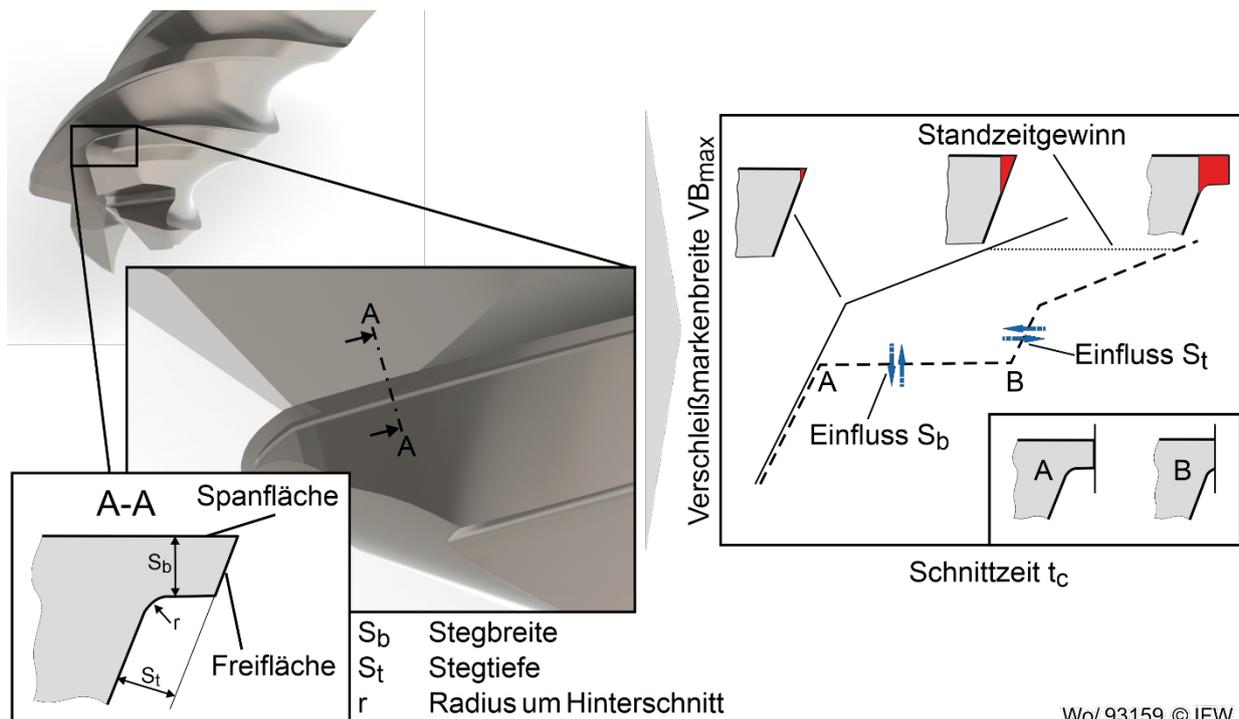


Abbildung 1: Schematische Darstellung und prinzipielle Wirkweise der Freiflächenmodifikation

Die mechanische Stabilität sowie der mögliche Standzeitvorteil werden durch das Verhältnis von Stegtiefe zu Stegbreite sowie durch den Radius im Hinterschnitt limitiert [MEY11]. Folglich wird eine Auslegungsmethodik benötigt, um ein ausgeglichenes Verhältnis von Belastbarkeit der Rücksatzgeometrie und Maximierung der Standzeit zu erreichen. Denkena [DEN11] zeigt, dass sich die Standzeit beim Hartdrehen mit

modifizierten CBN-Werkzeugen im Vergleich zu nicht modifizierten Werkzeugen um bis zu 480 % erhöht. Bücken et al. [BÜC18] zeigten bei Bohrexperimenten in Inconel 718 eine Erhöhung der Standzeit um mehr als 75 %, wenn Vollhartmetallbohrer mit modifizierter Flankenfläche eingesetzt wurden. In einer weiteren Arbeit von Bücken et al. [BÜC20] wurde die Flankenmodifikation eingesetzt, um beim Bohren von Inconel 718 eine verbesserte Zufuhr von Kühlschmierstoff zur Freifläche beim Bohren von Inconel 718 zu erreichen. Die Verbesserung der Strömungsverhältnisse wurde dabei innerhalb einer Computational Fluid Dynamics (CFD)-Simulation gezeigt. Dies führte zu einer weiteren Erhöhung der möglichen Bohrlänge bis zum Erreichen des Verschleißkriteriums um mehr als 500 %.

Im Rahmen des IGF-geförderten Vorhabens „IGF 17225 N – Entwicklung innovativer Freiflächengeometrien zur Standzeiterhöhung beim Hartfräsen“ konnte bereits die Eignung von Freiflächenrücksatzgeometrien zur Steigerung der Standzeit um bis zu 86 % beim Stirnplanfräsen von Warmarbeitsstählen gezeigt werden. Im Unterschied zu dem beantragten Vorhaben wurden runde Wendeschneidplatten verwendet, bei denen die Rücksetzung der Freifläche an den Bereichen kleiner Spanungsdicke erfolgte, die die finale Oberfläche generieren. Hieraus ergeben sich lokal geringere mechanische Lasten, die auf die Rücksatzgeometrie wirken. Die Rücksetzung der Freifläche wurde innerhalb des Vorhabens „IGF 18635 N – Grundlagen für den industriellen Einsatz von Werkzeugen mit Freiflächenmodifikation für die Drehbearbeitung von Titan- und Nickelbasislegierungen“ auf die Drehbearbeitung übertragen. Bei der Drehbearbeitung schwer zerspanbarer Werkstoffe, wie beispielsweise von Werkstoffen auf Titanbasis, konnten die Standzeiten durch den Einsatz von Freiflächenmodifikationen um 75 % bei der Zerspannung von Ti-6Al-4V und um 150 % bei der Bearbeitung von γ -Titanaluminid (TNM) gesteigert werden. Durch die Entwicklung eines neuartigen Simulationsansatzes konnte der experimentelle Aufwand zur Generierung der notwendigen Eingangsdaten auf eine Prozesskraftmessung reduziert werden [DEN17]. Darüber hinaus wurde die Berechnungszeit zur Ermittlung der Werkzeugbelastung im Hinterschnitt von ca. 6 Stunden in der Spanbildungssimulation auf ca. 3 Minuten in einer statischen FE-Simulation reduziert. Zur wirtschaftlichen Fertigung der so ausgelegten Modifikationen wurde das Querseitenplanschleifen qualifiziert, das heute schon fester Bestandteil der industriellen Prozesskette in der Fertigung von Hochleistungswendeschneidplatten ist. Dadurch wurde die Fertigungshauptzeit gegenüber der bisher eingesetzten Laserbearbeitung von ca. 10 min auf 2 s je Schneidkante reduziert [DEN17].

Eine Übertragung der bestehenden Erkenntnisse zum Fräsen ist aufgrund unterschiedlicher Werkstoffeigenschaften sowie unterschiedlicher Werkzeugtypen nicht möglich. Ebenso ist ein Wissenstransfer aus dem abgeschlossenen Projekt zum Drehen von Titan- und Nickelbasislegierungen auf das Fräsen aufgrund der unterschiedlichen Prozesse nicht zulässig. Die hieraus resultierende wissenschaftliche Problemstellung für dieses Vorhaben ist die Berücksichtigung der dynamischen Belastung beim Fräsen mit VHM-Werkzeugen und hieraus resultierender werkstoffspezifischer Versagensmechanismen der Freiflächenmodifikation. Darüber hinaus stellt die schleiftechnische Herstellung der Freiflächenmodifikation an Schafffräsern große Anforderungen an die Prozessbeherrschung. Die Wechselwirkungen der

Prozesseinstellgrößen sowie der Schleifscheibeneigenschaften mit der zu fertigenden Rücksatzgeometrie ist noch nicht bekannt. Gleichzeitig muss die Herstellung der Werkzeuge auch wirtschaftlichen Anforderungen genügen. Insbesondere sind hier höhere Prozesszeiten für das Schleifen der Modifikation, zum Beispiel infolge limitierter Prozesseinstellgrößen sowie notwendiger Schärf- und Abrichtzyklen, zu nennen. Somit ist zur Sicherstellung der industriellen Übertragbarkeit der in diesem Vorhaben entwickelten Werkzeugmodifikation auch die Entwicklung eines prozesssicheren und wirtschaftlichen Schleifprozesses elementarer Teil der Problemstellung.

Forschungsziel

Das Ziel des Vorhabens war es, Grundlagen für den industriellen Einsatz von Freiflächenmodifikationen an Schaftfräsern für die Bearbeitung von Titan- und Nickelbasislegierungen zu schaffen.

Um diese Zielsetzung zu erreichen, war die Erarbeitung von vier Teilzielen erforderlich. Das erste Teilziel war die Kenntnis über die thermomechanische Werkzeugbelastung beim Fräsen von Titan- und Nickelbasislegierungen. Die gewonnenen Daten dienen der numerischen Berechnung von Werkzeugspannungen als Eingangsgröße. Zweites Teilziel war die Entwicklung einer Methode zur prozesssicheren Auslegung werkstoff- und prozessspezifischer Freiflächenmodifikationen für Schaftfräser. Das dritte Teilziel war die Kenntnis der Haupteinflussgrößen des Schleifprozesses auf die Qualität der hergestellten Freiflächenmodifikation. Die hier gewonnenen Erkenntnisse sollen dazu beitragen, die Herstellung von Freiflächenmodifikationen mit hoher Prozessfähigkeit zu realisieren. Viertes Teilziel war der Nachweis der Leistungssteigerung der Werkzeuge durch die entwickelte Auslegungsmethodik sowie die Kenntnis über das Einsatzverhalten der Freiflächenmodifikation.

Vorgehensweise und Forschungsergebnisse

Zu Beginn des Forschungsvorhabens wurde die thermomechanische Belastung bei der Fräsbearbeitung der Legierungen Ti-6Al-4V und Inconel 718 mit Vollhartmetallschaftfräsern bei gegebenen Prozesseinstellgrößen bestimmt. Zur belastungsspezifischen Auslegung der Freiflächenmodifikation ist die Kenntnis der Spannungsverteilung im Hinterschnitt der Modifikation von Bedeutung. Übersteigen die Spannungen in diesem Bereich einen materialspezifischen Kennwert, kommt es zu einem Versagen der Werkzeuge durch einen initialen Bruch der Schneidkante. Die Auslegung der Freiflächenmodifikation erfolgt über die Ermittlung von Kraftkoeffizienten nach dem semi-empirischen Kraftmodell nach Engin und Altintas [ENG01]. Dieses Modell betrachtet einerseits spannungsquerschnittabhängige Schnittkraftanteile und andererseits kontaktlängenbezogene Reibanteile. Nach Altintas wird zwischen spezifischen Schnittkraftkoeffizienten und spezifischen Reibkraftkoeffizienten unterschieden. Die Kraftanteile werden in diesem Modell durch die

Schnittkraftkoeffizienten K_{tc} (Tangentialkraft), K_{rc} (Radialkraft) und K_{ac} (Axialkraft) beschrieben, die Reibanteile an der Schneide in tangentialer, radialer und axialer Richtung durch die Kraftkoeffizienten K_{te} , K_{re} und K_{ae} . Die Kraftkoeffizienten können experimentell über Versuche zur Steigerung des Zahnvorschubs f_z bestimmt werden. Der Zahnvorschub wurde dabei für beide Werkstoffe auf jeweils fünf Stufen variiert. Die simulationsbasierte Auslegungsmethodik der Freiflächenmodifikation wurde mit Hilfe einer gekoppelten Parameterstudie mit der Software für computer-aided design (CAD) SolidWorks und der Software für Finite Elemente Analyse (FEM) Ansys Workbench durchgeführt. Dafür wurde die Freiflächenmodifikation mit Hilfe von SolidWorks in ein bestehendes CAD-Modell integriert. Dabei wurden die geometrischen Parameter der Modifikation (Stegtiefe S_t , Stegbreite S_b und Radius r) als Freiheitsgrade definiert, welche in der nachfolgenden FEM-Simulation automatisiert variiert werden. Wie in Abbildung 2 dargestellt, wurde sowohl die Schneidkante als auch die Span- und Freifläche in Segmente eingeteilt. Auf diese Weise wird die Richtung der Kraftvektoren berücksichtigt und der entstehende Fehler bei der Krafteinleitung entlang der Schneidkante gering gehalten. Die Schnittkraftkoeffizienten K_{ic} wirken als Flächenlast auf die Spanflächensegmente, wohingegen die Reibkraftkoeffizienten K_{ie} als Linienlast auf die Schneidkante wirken.

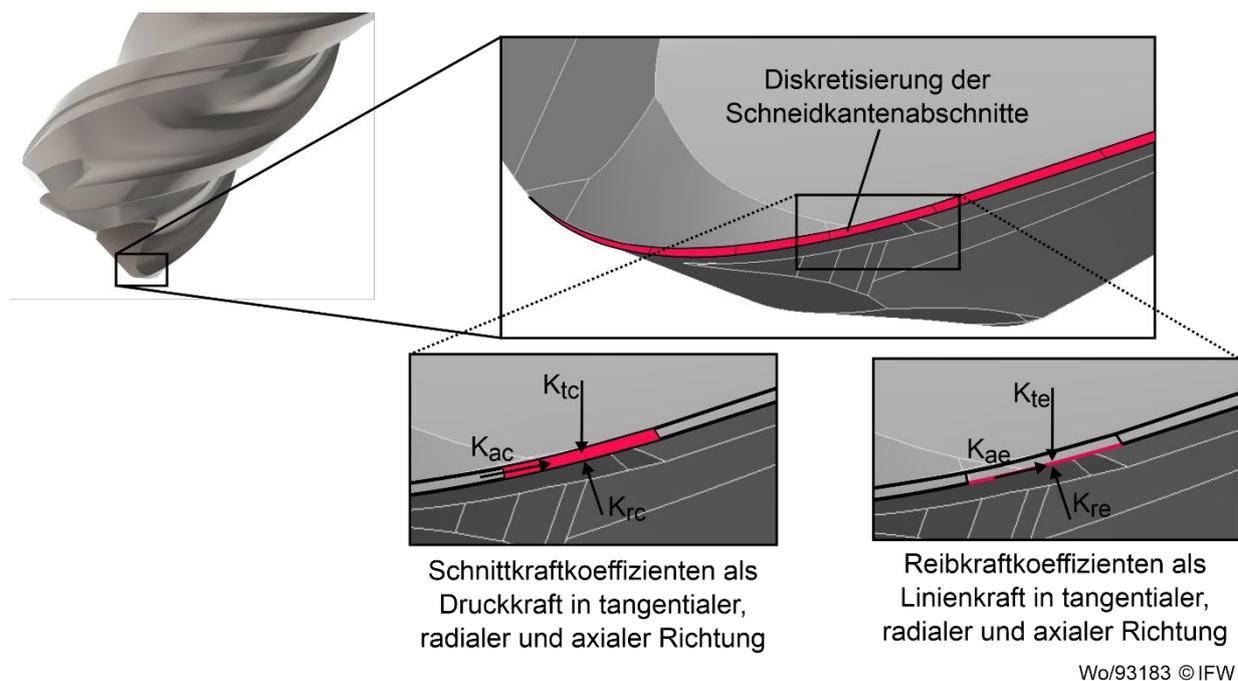


Abbildung 2: CAD-Modell eines Fräasers und Darstellung der Wirkrichtung der Kraftkoeffizienten

Innerhalb der FEM-Analyse wurden für die beiden Werkstoffe Parameterstudien durchgeführt, in der eine Variation der Freiheitsgrade der Freiflächenmodifikation erfolgte. Mit Hilfe der Ergebnisdaten aus der FEM-Simulation können Regressionsmodell zur Abbildung der minimalen Hauptspannung (Druckspannung) in Abhängigkeit der Stegtiefe S_t und der Stegbreite S_b für jeweils einen bestimmten Radius erstellt werden. Ein solches Regressionsmodell ist beispielhaft für den Werkstoff Ti-6Al-4V für einen Radius im Freiflächenrücksatz von $160 \mu\text{m}$ in Abbildung 3 rechts dargestellt. Im betrachteten Parameterbereich liegt das Bestimmtheitsmaß R^2 bei 99 %. Zusätzlich ist in Abbildung 3 die Isolinie für eine konstante Spannung von 6,6 GPa

dargestellt. Diese Spannung entspricht der Druckfestigkeit des Hartmetallsubstrats und wird aufgrund der Erkenntnisse aus Denkena et al. als Versagenskriterium für einen initialen Bruch der Schneidkante herangezogen [DEN17]. Werden Werkzeuge mit Freiflächenmodifikationen eingesetzt, deren geometrische Parameter gemäß Simulation im Einsatzfall zu höheren Spannungen führen, resultiert ein Versagen des Werkzeugs.

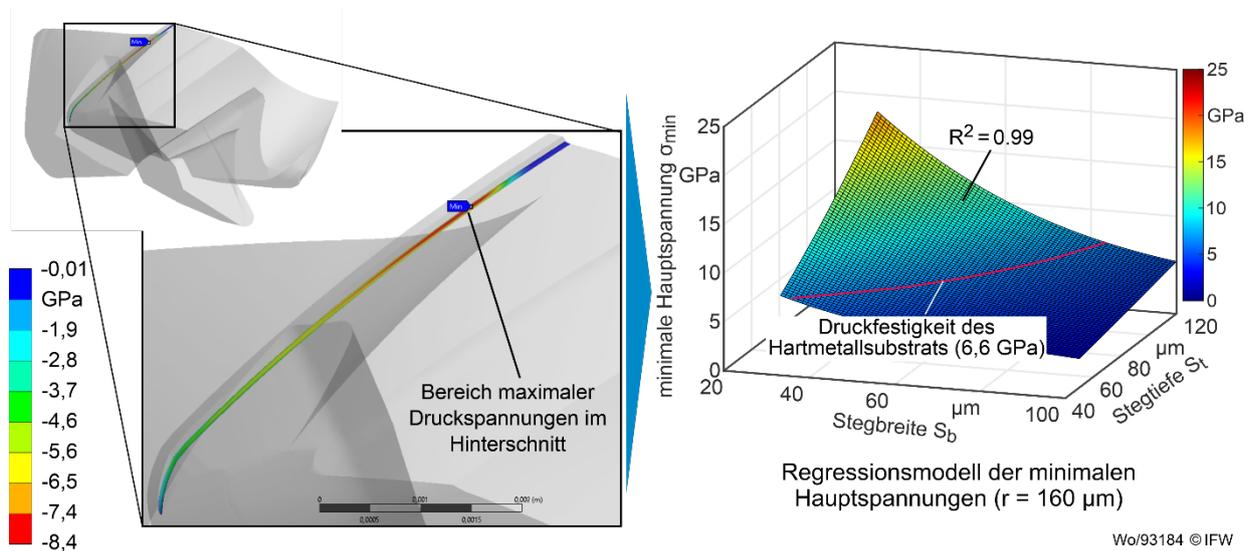


Abbildung 3: Auswertung der betragsmäßig größten Spannungen und Erstellen von Regressionsmodellen

Im Anschluss an die Auslegung der Rücksatzgeometrie erfolgt die Untersuchung des Einsatzverhaltens der Werkzeuge mit Freiflächenmodifikation im Vergleich mit herkömmlichen Werkzeugen. Die Ergebnisse der Verschleißuntersuchungen für die beiden Legierungen sind in Abbildung 4 und Abbildung 5 dargestellt. Bei der Bearbeitung der Legierung Ti-6Al-4V konnte, durch den Einsatz von Werkzeugen mit Freiflächenmodifikation, eine mittlere Standzeitsteigerung von 108 % erzielt werden. Aufgrund der generell gesteigerten Belastung bei der Zerspaltung der Legierung Inconel 718 fällt der Standzeitvorteil hier mit durchschnittlich 22,5 % kleiner aus, als für die Legierung Ti-6Al-4V.

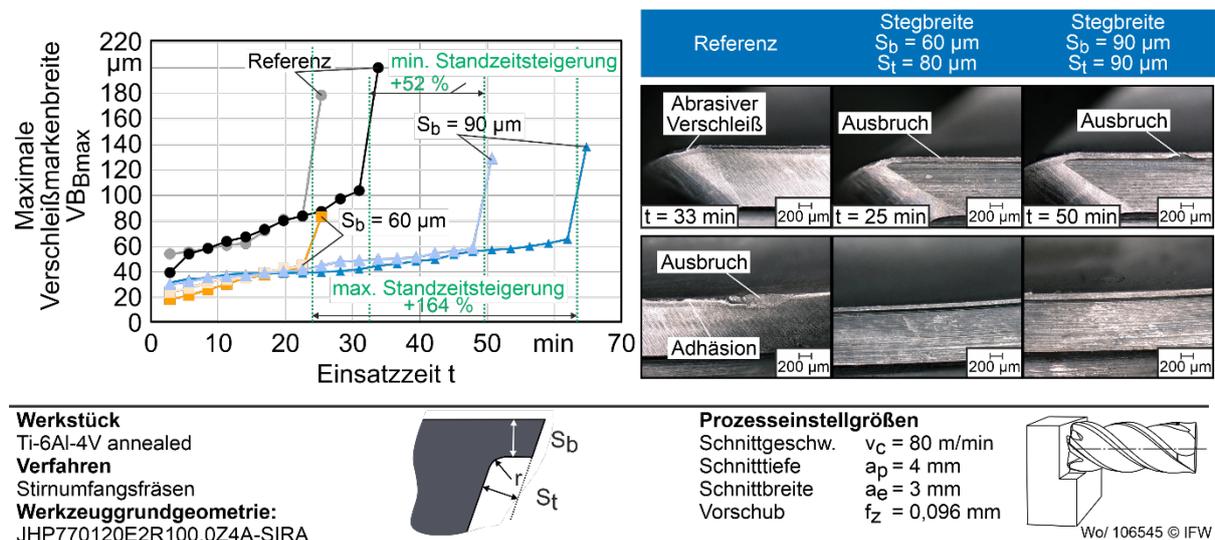
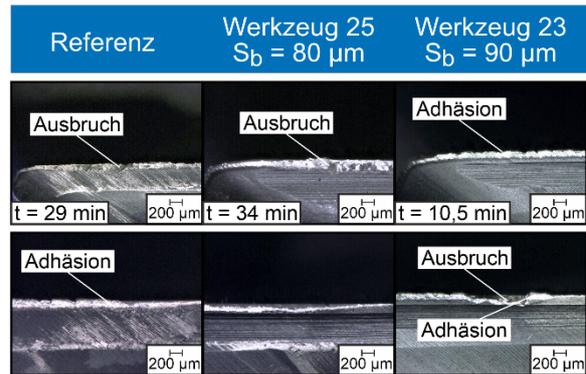
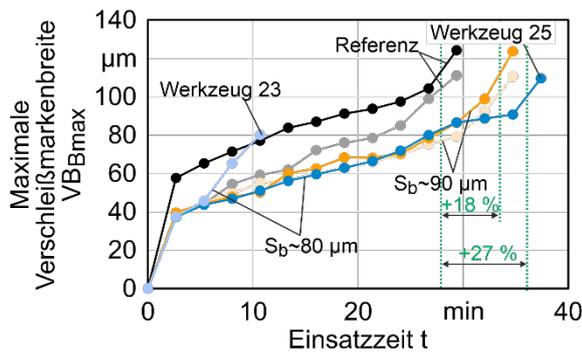
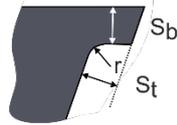


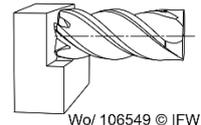
Abbildung 4: Ergebnis der Standzeitversuche für die Legierung Ti-6Al-4V



Werkstück
Inconel 718 lösungsgeglüht
Verfahren
Stirnumfangsfräsen
Werkzeuggrundgeometrie:
JHP780120E2R080.0Z4A-M64



Prozesseinstellgrößen
Schnittgeschw. $v_c = 30$ m/min
Schnitttiefe $a_p = 4$ mm
Schnittbreite $a_e = 3$ mm
Vorschub $f_z = 0,072$ mm



Wo/ 106549 © IFW

Abbildung 5: Ergebnis der Standzeitversuche für die Legierung Inconel 718

Zusammenfassung

Im beschriebenen Forschungsvorhaben wurden die Grundlagen, welche im Projekt „IGF 18635 N – Grundlagen für den industriellen Einsatz von Werkzeugen mit Freiflächenmodifikation für die Drehbearbeitung von Titan- und Nickelbasislegierungen“ gelegt wurden, erweitert und auf die Fräsbearbeitung dieser Legierungen übertragen. Zunächst erfolgte eine belastungsangepasste Auslegung der Freiflächenmodifikation für zwei unterschiedliche Vollhartmetallschafffräser, die jeweils für die Bearbeitung von Titanlegierungen und Nickelbasislegierungen optimiert sind. Die mechanischen Belastungen wurden zur Berechnung von Kraftkoeffizienten herangezogen, die anschließend mittels einer statischen FEM-Simulation auf CAD-Modelle der jeweiligen Werkzeuge aufgebracht wurden. Innerhalb dieser FEM-Simulationen wurden Parameterstudien durchgeführt, bei denen die geometrischen Abmessungen der Freiflächenmodifikation Stegbreite S_b , Stegtiefe S_t und Radius r variiert wurden. Auf Basis der Ergebnisse konnten Regressionsmodelle der minimalen Hauptspannung in Abhängigkeit der geometrischen Parameter erstellt werden. Diese Regressionsmodelle dienen zur Auslegung der Freiflächenmodifikation. Als Bruchkriterium für die Freiflächenmodifikation wurde, aufgrund der Erfahrungen aus vorangegangenen Arbeiten, die maximale Druckspannung des verwendeten Hartmetallsubstrats herangezogen. Im Anschluss an die Validierung der Auslegungsmethodik wurden experimentelle Verschleißuntersuchungen an Werkzeugen mit und ohne Freiflächenmodifikation durchgeführt. Bei allen Werkzeugen wurde das Standzeitende durch das Auftreten von Ausbrüchen erreicht. Dieses Verschleißverhalten ist abweichend zu bisherigen Untersuchungen von Werkzeugen mit Freiflächenmodifikation für die Drehbearbeitung schwer zerspanbarer Werkstoffe. Bei letztgenannten Untersuchungen wurde maßgeblich abrasiver Freiflächenverschleiß ermittelt. Die eigentliche Wirkung der Freiflächenmodifikation als Verschleißvorrat bei abrasivem Freiflächenverschleiß war somit in diesen Untersuchungen nicht gegeben. In den Verschleißversuchen mit den Fräsworkzeugen mit Freiflächenmodifikation konnten

dennoch Standzeitvorteile gegenüber den Referenzwerkzeugen erzielt werden. Die mittlere Standzeitsteigerung der Werkzeuge für die Bearbeitung der Legierung Ti-6Al-4V liegt bei 108 %. Für die Bearbeitung der Legierung Inconel 718 konnte eine Standzeitsteigerung von durchschnittlich 22,5 % erreicht werden.

Ein besonderer Dank gilt allen Mitgliedern im projektbegleitenden Ausschuss für die gute Zusammenarbeit und für die Unterstützung bei der Durchführung der Forschungsarbeiten.

Eine Langfassung der Forschungsarbeiten kann in Form eines Schlussberichts bei der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V., Papenberger Str. 49, 42859 Remscheid, www.fgw.de, angefordert werden.

Weitere Informationen erhalten Sie bei Herrn M. Sc. Sebastian Worpenberg unter 0511 762 2537.

Literatur:

[ABE08] Abele, E., Fröhlich, B.: High speed milling of titanium alloys. *Advances in Production Engineering & Management* 3, 2008, S. 131–140.

[ALT01] Altmüller, S.: Simultanes fünfschichtiges Fräsen von Freiformflächen aus Titan. Dr.-Ing. Dissertation, RWTH Aachen, 2001.

[BRE11] Breidenstein, B.: Oberflächen und Randzonen hoch belasteter Bauteile. PZH Produktionstechn. Zentrum, Garbsen, 2011.

[BÜC18] Bücker, M.; Oezkaya, E.; Zimon, M.; Biermann, D.: Investigations on the effects of an innovative flank face modification for the drilling of nickel-base alloys. *Procedia Manufacturing*, 2018, S. 20–26.

[BÜC20] Bücker, M.; Oezkaya, E.; Hensler, U.; Biermann, D.: A New Flank Face Design Leading to an Improved Process Performance when Drilling High-Temperature Nickel-Base Alloys. *SSRN Electronic Journal*, 2020.

[DEN17] Denkena, B.: Grundlagen für den industriellen Einsatz von Werkzeugen mit Freiflächenmodifikation für die Drehbearbeitung von Titan- und Nickelbasislegierungen, Hannover, 2017.

[DEW12] Dewald, M.: Titanzerspanung: Ein Beitrag zur Erhöhung der Standzeit. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2012.

[DUD04] Dudzinski, D.; Devillez, A.; Moufki, A.; Larrouquère, D.; Zerrouki, V.; Vigneau, J.: A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 4, 2004, S. 439–456.

[ENG01] Engin, S.; Altintas, Y.: Mechanics and dynamics of general milling cutters.: Part I: helical end mills. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 15, 2001, S. 2195–2212.

- [EZU03] Ezugwu, E. O.; Bonney, J.; Yamane, Y.: An overview of the machinability of aeroengine alloys. *Journal of Materials Processing Technology* 2, 2003, S. 233–253.
- [FRI81] Fritsch, R.: Die Zerspanbarkeit von Titan-, Molybdän- und Nickellegierungen - ausgewählte Forschungsergebnisse -, Zerspanung der Metall, Symposium der Deutschen Gesellschaft für Metallkunde. Bad Nauheim. 1981, S. 119–131.
- [HUA05] Hua, J.; Shivpuri, R.: A Cobalt Diffusion Based Model for Predicting Crater Wear of Carbide Tools in Machining Titanium Alloys. *Journal of Engineering Materials and Technology* 1, 2005, S. 136–144.
- [IKU02] Ikuta, A.; Shinozaki, K.; Masuda, H.; Yamane, Y.; Kuroki, H.; Fukaya, Y.: Consideration of the adhesion mechanism of Ti alloys using a cemented carbide tool during the cutting process. *Journal of Materials Processing Technology* 2, 2002, S. 251–255.
- [KLO08] Klocke, F., König, W.: *Fertigungsverfahren 1*, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [KLO13] Klocke, F.: *Steigerung der Produktivität und Prozesssicherheit bei der Drehbearbeitung von Stählen durch den energieeffizienten Einsatz der Hochdruck-Kühlschmierstoff-Zufuhr*. RWTH Aachen, 2013.
- [KRE73] Kreis, W.: *Verschleißursachen beim Drehen von Titanwerkstoffen*. Dr.-Ing. Dissertation, RWTH Aachen, 1973.
- [PET02] Peters, M.; Leyens, C.: *Titan und Titanlegierungen*, Weinheim, 2002.
- [RAH03] Rahmann, M.; Wong, Y. S.; Zareena, A. R.: Machinability of Titanium Alloys. *JSME International Journal Series C* 1, 2003, S. 107–115.
- [RÖT03] Röttger, K.: *Walzen hartgedrehter Oberflächen*. Shaker, Aachen, 2003.
- [WES07] Wessels, T.: *Bohren in Titan- und Nickelbasislegierungen*. Vulkan-Verl., Essen, 2007.
- [WYE12] Wyen, C.-F.: *Rounded cutting edges and their influence in machining titanium* ETH Zurich.
- [ZHU13] Zhu, D.; Zhang, X.; Ding, H.: Tool wear characteristics in machining of nickel-based superalloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, S. 60–77.