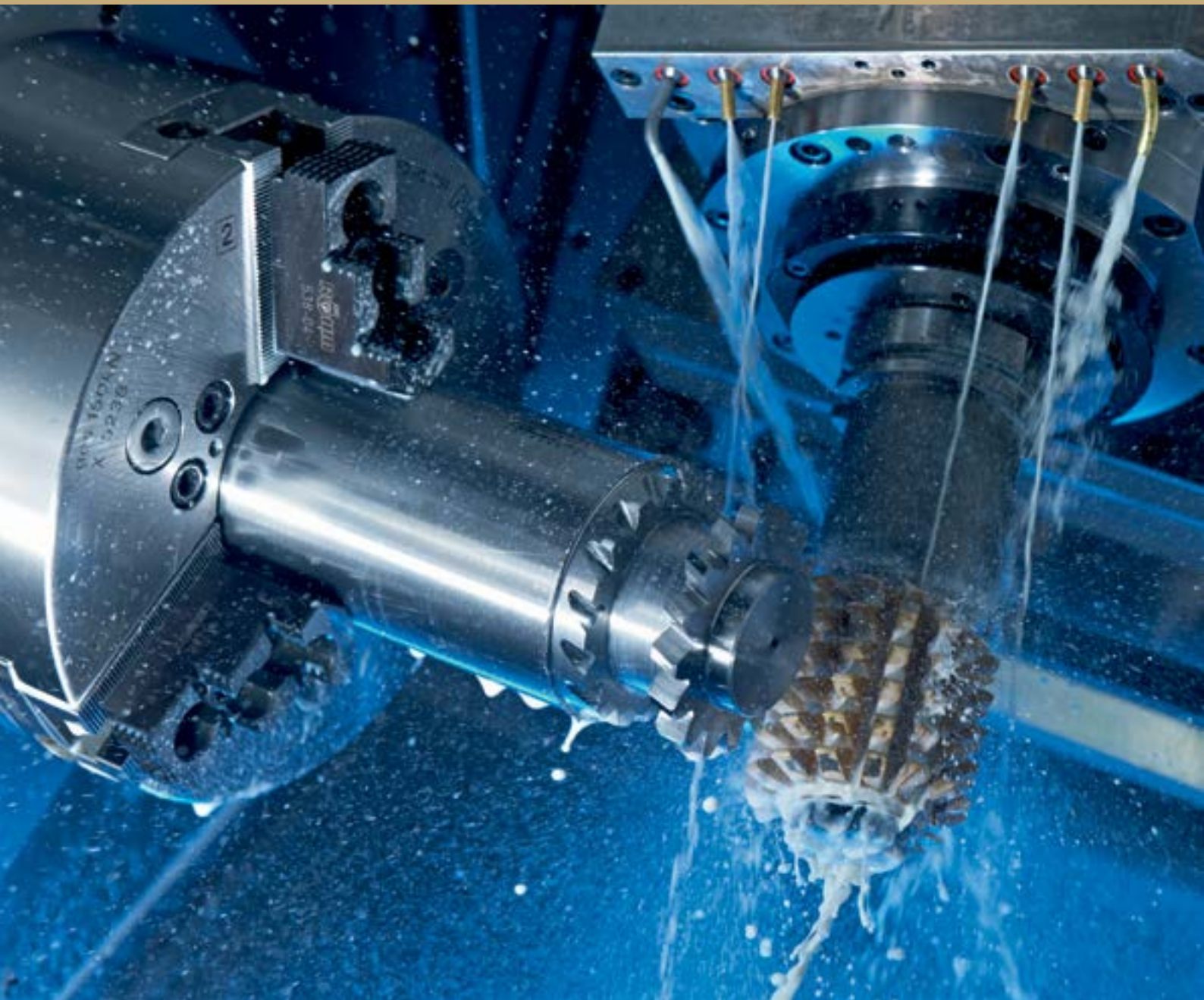




Fraunhofer
IWU

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR WERKZEUGMASCHINEN UND UMFORMTECHNIK IWU

KÜHLSCHMIERSTRATEGIEN IN DER ZERSPANUNG





KÜHLSCHMIERUNG – KNOW-HOW FÜR DIE ZERSPANUNG

Eine erfolgreiche wirtschaftliche Unternehmensentwicklung ist nur realisierbar, wenn frühzeitig Optimierungspotenziale bezüglich Kosten und Bearbeitungszeiten ermittelt und in der mechanischen Fertigung umgesetzt werden. Mit einer effizienten Kühlschmierung während der Zerspaltung können höhere Werkzeugstand- sowie kürzere Bearbeitungszeiten erzielt werden. Neben der Erhöhung des Leistungsniveaus zahlreicher Fertigungsprozesse können Kühlschmierstoffe auch zur Verbesserung der Oberflächengüte, zur Teilereinigung und somit zur höheren Sauberkeit, aber auch zum Korrosionsschutz von Maschine und Werkstück dienen.

Den Einsatz von Kühlschmierstoffen zeitgemäß gestalten

Steigende Preise für Rohstoffe und Energie führen zu höheren Forderungen an die Effizienz von Fertigungsprozessen. Um neben den Kosten auch den Energie- und Ressourcenverbrauch in der Fertigung zu reduzieren, wird eine Verminderung und sogar Vermeidung von Kühlschmierstoffen angestrebt. Die Minimalmengenschmierung und die Trockenbearbeitung sind dafür interessante Ansätze im Vergleich zur Überflutungskühl-schmierung. Der Einsatz dieser Strategien muss jedoch stets im Zusammenhang mit dem zu zerspanenden Material betrachtet werden. Die Anwender von Kühlschmierstoffen benötigen immer mehr Wissen, um den Kühlschmierstoffeinsatz effektiv gestalten zu können.

Hochleistungswerkstoffe sind zwar kostenintensiv, gewinnen aber durch ihre Eigenschaften rasant an Bedeutung. Bei der spanenden Bearbeitung von hochtemperaturfesten Stählen und Superlegierungen im Bereich der Luftfahrtindustrie und Energietechnik, aber auch im Automobilbau können sehr hohe Prozesstemperaturen entstehen. Die Folge sind extremer

Werkzeugverschleiß, reduzierte Schnittwerte und somit hohe Bearbeitungszeiten, Kosten und Energieverbräuche. Um den Anforderungen einer effizienten Zerspaltung dieser Hochleistungswerkstoffe zu genügen, werden neben Werkzeugen mit hochwarmfesten Schneidstoffen und Beschichtungen geeignete Maschinenkonzepte, eine effiziente Kühlung während des Bearbeitungsprozesses sowie optimale Zerspaltungparameter benötigt. Konventionelle Kühlverfahren kommen bei der Zerspaltung solcher Werkstoffe schnell an ihre Grenzen. Große Temperaturdifferenzen, zum Beispiel durch eine Vollstrahlkühlung bei Stahl, erhöhen die Gefahr eines Thermoschocks am Werkzeug. Mit einer Minimal- oder Mindermengenschmierung ist der Einfluss auf das oft problematische Spanbruchverhalten gering. Zwar kann eine gute Schmierwirkung erzielt werden, jedoch bewirkt die schlechte Kühlwirkung einen erhöhten Werkzeugverschleiß. Zur Produktivitätserhöhung müssen effiziente Kühlschmierverfahren zum Einsatz kommen. Denn erst wenn Kühlschmierstrategien wie Minimalmengenschmierung, Hochdruckkühlung oder kryogene Kühlung entsprechend auf die Zerspaltungsaufgabe abgestimmt sind, können diese Strategien Fertigungsprozesse noch leistungsfähiger gestalten.

Unsere Kompetenzen

Ein Forschungsschwerpunkt liegt in der Entwicklung von Fertigungstechnologien, die einen optimalen Kühlschmierstoffeinsatz ermöglichen. Für technologische Untersuchungen werden alle klassischen Kühlschmierstrategien mit interner und externer Medienzufuhr, aber auch Strategien wie die Aerosol-Trockenschmierung, die Minimalmengenschmierung, die kryogene Kühlung oder die Hochdruckkühlung verwendet. Somit sind Vergleichsuntersuchungen zur Ermittlung von Potenzialen sowie die Entwicklung wirtschaftlicher Fertigungsprozesse möglich.



HOCHDRUCKKÜHLUNG

Für spanende Prozesse, bei denen verfahrens- und werkstückbedingt die Späne nicht ungehindert ablaufen können bzw. zum Verkleben neigen oder bei denen aufgrund thermisch bedingter Probleme bei der Zerspaltung nicht auf eine Kühlung verzichtet werden kann, sind alternative Kühlmittelkonzepte, wie zum Beispiel der Einsatz einer Hochdruckkühlung, ein möglicher Lösungsansatz. Beim Ein- und Abstechen, aber auch bei weiteren Drehprozessen oder beim Bohren von langspanenden Werkstoffen gewinnt die Anwendung hoher Drücke zunehmend an Bedeutung. Die Prozessbeeinflussung mithilfe eines Kühlmitteldrucks von 80 bar (teilweise bis 120 bar) ist heute bei der Zerspaltung von hochfesten, langspanenden Materialien Stand der Technik.

Die gebräuchlichste Anwendung der Hochdruckkühlung ist die direkte Zufuhr des Kühlschmierstoffstrahls zwischen Span und Spanfläche des Werkzeugs. Die Hochdruck-Spanflächenspülung bewirkt einen besseren Spanbruch und höhere Bearbeitungsparameter. Durch den Druck, den der Kühlschmierstoff auf den Span ausübt, wird dieser in kleine Stücke gebrochen. So lassen sich die Späne aus der Wirkzone leicht entfernen. Eine Beschädigung der Schneide und der erzeugten Werkstückoberfläche durch lange, unkontrollierte Späne kann somit vermieden werden. Die Fertigung der Bauteile erfolgt prozesssicher ohne kostspielige Unterbrechungen. Alternativ kann der Hochdruckstrahl auch zwischen Werkzeugfreifläche und bereits bearbeitete Werkstückoberfläche gerichtet werden. Das Kühlmittel erreicht die Schneidkante wesentlich besser, kann das Werkzeug intensiver kühlen und sorgt so für einen reduzierten Freiflächenverschleiß.

Das gezielte, unter hohem Druck erfolgende Einbringen von Kühlschmierstoff in den Zerspaltungsvorgang ermöglicht einen verbesserten Prozessablauf. Dadurch werden nachweislich der

Spanbildungsprozess und damit das Spanbruchverhalten von schwer zerspanbaren Werkstoffen beeinflusst und darüber hinaus reduzierte Bearbeitungskräfte, höhere Zeitspanvolumina sowie größere Werkzeugstandzeiten erreicht.

Unsere Kompetenzen

Das Verständnis der unter Hochdruckkühlung in der Wirkzone ablaufenden Prozesse, das Verschleiß- und Schwingungsverhalten der Werkzeuge, entstehende Prozesstemperaturen und Zerspalkräfte, aber auch das Strömungsverhalten der Kühlschmierstoffe sind für eine zielgerichtete Zerspaltungsoptimierung von Bedeutung. Am Fraunhofer IWU werden neben numerischen Simulationen der Kühlschmierstoffzufuhr zur Wirkstelle oder dem thermischen Verhalten der Bauteile und Werkzeuge auch das Verschleißverhalten von Werkzeugen für Prozessoptimierungen sowie wirtschaftliche Zerspaltungparameter ermittelt. Mithilfe numerischer Simulationen zur strömungstechnischen Auslegung der Kühlschmierstoffzufuhr konnten Strömungsverluste reduziert und der Kühlschmierstoff-Durchsatz um ca. 10 Prozent verbessert werden. Für technologische Untersuchungen zur Hochleistungsbearbeitung werden Drücke bis maximal 270 bar eingesetzt. So konnte die Werkzeugstandzeit unter Einsatz der Hochdruckkühlung beim Einstechen in TiAl6V4 um den Faktor 7 gesteigert werden.

- 1 Konventionelle Kühlschmierung
- 2 Drehwerkzeug für Hochdruckkühlung
- 3 Spanbruch mit konventioneller Kühlung (links) und mit Hochdruckkühlung (rechts)



1

MINIMAL- UND MINDERMENGENSCHMIERUNG

Die Minimal- oder Mindermengenschmierung bietet einen praktikablen Kompromiss zwischen der Einsparung von Kühlschmierstoff und der Gewährleistung der Prozesssicherheit. Die Dosierung der Schmierstoffmenge beträgt bei der Minimalmengenschmierung (MMS) weniger als 50 ml/h und bei der Mindermengenschmierung mehr als 50 ml/h. Bei der Umstellung der Prozesse auf MMS sind die bisherigen Bearbeitungsstrategien, Werkzeuggeometrien und -beschichtungen sowie die Maschinenkonzepte zu überdenken und neu zu gestalten. Somit werden Qualitätsverluste am Werkstück und erhöhter Werkzeugverschleiß vermieden. Insbesondere bei der Anwendung der MMS in der Fertigung mit hohen Qualitätsanforderungen sind Entwicklungen zu alternativen Kühlprinzipien erforderlich, um den Wegfall bzw. die Verminderung der Wirkmechanismen der Kühlschmierstoff-Funktionen zu kompensieren.

Grundsätzlich muss beim Einsatz einer Minimal- oder Mindermengenschmierung zwischen der Art der Zuführung und der Gemischaufbereitung unterschieden werden, da diese das Endergebnis beeinflussen. Von besonderem Interesse ist die innere Zuführung von Kühlschmierstoff durch das Werkzeug an die Zerspanstelle. Die Anforderungen sowohl an das System als auch an die Werkzeugmaschine unterscheiden sich wesentlich von denen bei einer äußeren Zuführung des Kühlschmierstoffs. Um den Schmierstoff bei hohen Spindeldrehzahlen an die Werkzeugschneide transportieren zu können, ist die Erzeugung von Tröpfchen mit kleinster Partikelgröße und enger Partikelgrößenverteilung erforderlich. Ähnlich der Wirkungsweise einer Zentrifuge ist die Abscheidung der Partikel an der Wandung des Kühlkanals aufgrund ihrer Massenträgheit so gering wie möglich zu halten, um die Werkzeugschneide prozesssicher schmieren zu können.

Aerosol-Trocken-Schmierung

Bekanntere Methoden wie die MMS können bei der Bearbeitung schwer spanbarer Materialien an ihre Grenzen kommen. In den vergangenen Jahren wurde daher die Aerosol-Trockenschmierung (ATS) entwickelt, bei der sehr geringe Schmiermittelmengen genutzt werden. Die Schmierung der Schnittzone erfolgt durch ein hochfeines Aerosol mit einer Schmierpartikelgröße von ca. 0,1 μm . Die benötigte Ölmenge liegt zwischen 5 und 15 ml/h und damit deutlich unter der Ölmenge einer MMS. Durch die gezielte Schmierung der Schnittzone wird die Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück reduziert und somit die Entstehung hoher Temperaturen weitestgehend vermieden.

Unsere Kompetenzen

Aufbauend auf systematischen Analysen des Ist-Zustands der Fertigung wird der Gesamtprozess hinsichtlich der Einsatzmöglichkeiten einer ATS, MMS oder Mindermengenschmierung untersucht. Darüber hinaus werden Lösungspakete hinsichtlich der Prozesszustandserfassung, der Beeinflussung des Tribosystems und der Prozesstemperatur erarbeitet sowie experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Die Bewertung der Ergebnisse erfolgt nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien. So ist zum Beispiel eine MMS auch für eine energieeffiziente Schleifbearbeitung einsetzbar. Mithilfe von speziell entwickelten Schleifkörpern und thermisch optimalen Bearbeitungsstrategien sowie einer gezielten Spanabsaugung kann eine Bearbeitung ohne thermische Randzonenschädigung unter Einhaltung geforderter Genauigkeiten erfolgen. Somit gelingt es, innerhalb von Prozessketten vollständig trocken zu bearbeiten.



2

TROCKENBEARBEITUNG

Der effektivste Ansatz, die Zerspanung mit wirtschaftlichen Vorteilen und ökologischen Zielstellungen zu kombinieren, ist die Trockenbearbeitung. Das Streben nach höchsten Leistungssteigerungen bei stark reduziertem Energieverbrauch führte zu vielversprechenden Werkzeugentwicklungen und einem allgemeinen Trend in Richtung Trockenbearbeitung. Diese ist in jedem Fall anzustreben, wenn der Prozess (Prozesssicherheit), das Werkzeug (Warmverschleißfestigkeit), das Werkstück (Maßgenauigkeit, Oberflächenqualität) sowie die Werkzeugmaschine (thermisches Verhalten, Maschinengenauigkeit) es ermöglichen.

Gegenwärtig sind noch nicht alle Probleme beim Einsatz der Trockenbearbeitung gelöst. Zudem kann entsprechend dem heutigen Stand der Technik noch nicht bei allen Fertigungsprozessen völlig auf den Kühlschmierstoff verzichtet werden. Bei Verfahren mit unterbrochenem Schnitt, wie zum Beispiel beim Fräsen, lassen sich mit einer Trockenbearbeitung hohe Standzeitvorteile erzielen, da an der Werkzeugschneide keine durch Kühlschmierstoff hervorgerufenen Thermoschockbelastungen mehr auftreten. Eine Umstellung auf Trockenbearbeitung hängt stets von der Situation der Bearbeitungsaufgabe im jeweiligen Einzelfall ab. Für eine wirtschaftliche Trockenbearbeitung sind speziell ausgelegte Werkzeugmaschinen erforderlich, um den Anforderungen an die Maßhaltigkeit unter einer erhöhten thermischen Belastung gerecht zu werden.

Während beim Drehen und Fräsen von leicht zerspanbaren Werkstoffen die kühlsmierstofffreie Zerspanung weitestgehend Serientauglichkeit erreicht hat, existieren für die verschiedenen Bohrverfahren bislang nur erste Lösungsansätze.

Die nicht frei zugängliche Wirkstelle und die entfallende Unterstützung durch den Kühlschmierstoff erschweren die Späneabfuhr, erhöhen die thermische Belastung des Bohrers und können das Arbeitsergebnis verschlechtern. Mit ca. 30 Prozent stellt die Bohrbearbeitung den größten Anteil an allen Zerspanungsoperationen und bietet somit ein sehr großes Einsparungspotenzial, das es weiter zu erforschen gilt.

Unsere Kompetenzen

Da in realen Fertigungsprozessen viele, oft gegenläufige Faktoren wirken, sind pauschale Aussagen bezüglich der Einsatzbarkeit einer Trockenbearbeitung schwer möglich. Am Fraunhofer IWU wird der konkrete Fertigungsprozess unter Einbeziehung aller Randbedingungen bewertet. Mithilfe von numerischen Simulationen können optimale Werkzeuggeometrien und Schichtsysteme ausgelegt werden. Die Durchführung von experimentellen Untersuchungen dient zur Validierung der Simulationsergebnisse und zur Ermittlung geeigneter Prozessparameter und -strategien für die Trockenzerspanung.

1 Drehen mit ATS

2 Trockenfräsen von Stahl



1

KRYOGENE KÜHLUNG

Die kryogene Prozesskühlung kombiniert die Vorteile der Trockenbearbeitung mit einer ausreichenden Werkzeugkühlung. Verfahrenspotenziale der kryogenen Kühlung sind:

- gezielte Kühlung der Prozesszone
- reduzierter thermisch bedingter Werkzeugverschleiß
- rückstandsfreie Kühlung und somit Möglichkeit der Trockenbearbeitung
- Einsatz produktiverer technologischer Parameter und damit Steigerung des Zeitspannvolumens

Für die Kühlung des Zerspanungsprozesses kommen flüssiger Stickstoff (LN_2) und flüssiges Kohlenstoffdioxid (CO_2 bzw. Trockeneis) zum Einsatz. Beide Gase müssen hinsichtlich der Mechanismen der Kälteerzeugung differenziert werden, daher sind für den Einsatz als Kühlmedium unterschiedliche Anforderungen zu beachten.

Flüssiger Stickstoff, der in isolierten Tanks gelagert wird, beginnt bereits bei einer Temperatur von -196 °C zu sieden. Aufgrund dieser Charakteristik erscheint Stickstoff im Vergleich zu Kohlenstoffdioxid als Kühlmedium zunächst geeigneter. Jedoch sind die tiefen Temperaturen unter Atmosphärendruck ein Problem für die Verwendung als Kühlmedium. Zum einen müssen zur Vermeidung von Gefährdungen und Verlusten alle Zuleitungen vakuumisoliert sowie Sonderwerkzeuge mit isolierter Zuführung eingesetzt werden. Maschinenkomponenten sind ebenfalls vor Kälte zu schützen. Zum anderen beginnt flüssiger Stickstoff beim Auftreffen auf die erwärmte Oberfläche sofort zu sieden und verdampft. Infolge des sich ausbildenden isolierenden Films aus gasförmigem Stickstoff

wird die Kühlwirkung reduziert. Dagegen werden bei der Kühlung mit flüssigem Kohlenstoffdioxid (CO_2) dessen thermodynamische Eigenschaften bei unterschiedlichen Druckverhältnissen genutzt. Das unter Druck stehende flüssige CO_2 wird bei Raumtemperatur bis an die Kühlkanalöffnung des Werkzeugs gebracht. Erst beim Austritt aus dem Werkzeug kommt es infolge des Druckabfalls zu einer Expansion, verbunden mit einer Phasenumwandlung zu festem und gasförmigem Kohlenstoffdioxid. Dabei kühlt das Medium auf bis zu -78 °C ab. Anschließend sublimiert der feste Anteil rückstandsfrei. Aufgrund dieser Eigenschaften lässt sich die CO_2 -Kühlung relativ unkompliziert in bestehende Maschinensysteme integrieren.

Unsere Kompetenzen

Im Fokus unserer Forschungsarbeiten stehen insbesondere:

- Untersuchung des Wärmeübergangs in der Schnittzone
- Ermittlung des Einflusses auf Maschinenkomponenten und Entwicklung geeigneter Werkzeuge
- Strömungsuntersuchungen auf einem Spindelversuchsstand
- Integration von Schmiermedien in den kryogenen Kühlprozess
- Verfahrensentwicklungen und Ermittlung optimaler Prozessparameter
- Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen
- Entwicklung ganzheitlicher Sicherheitskonzepte

Die Überlegenheit der CO_2 -Kühlung wird beispielsweise beim Bohren von Grauguss mit gesteigerten Prozessparametern sichtbar. Effekte einer CO_2 -Kühlung sind ebenfalls beim Fräsen nachweisbar. So lassen sich beim Fräsen von Guss die Vorschubgeschwindigkeiten derart erhöhen, dass die Bearbeitungszeit um ca. 15 Prozent und gleichzeitig der Werkzeugverschleiß um 20 bis 30 Prozent reduziert werden können.

UNSER LEISTUNGSANGEBOT

Prozesskettenentwicklung

- Marktanalyse
- Prozesskettenuntersuchung
- Prozessoptimierung
- Kosten-Nutzen-Rechnung
- Entwicklung von Fertigungskonzepten
- Grob- und Feinplanung technologischer Verfahren
- Technologische Dimensionierung von Bearbeitungsmaschinen
- Empfehlungen zu Maschineninvestitionen

Entwicklung und Bewertung von Bearbeitungsstrategien

- Marktanalyse
- Machbarkeitsstudie
- Technologieentwicklung
- Erarbeitung von Verfahrenskennwerten
- Erarbeitung optimaler Bearbeitungsstrategien
- Benchmarking von CAD/CAM-Systemen

Verfügbare Software

- CAD-Systeme: Inventor, Pro-Engineer, CATIA
- CAM-Systeme: Tebis, GIB CAD&CAM
- Simulationssoftware: MARC, ANSYS, DEFORM
- Computer-Fluid-Dynamics-Software (CFD)

Verfügbare Kühlschmierstofftechnik

- MMS-Einkanalsystem, Vogel und Lubrix
- MMS-Zweikanalsystem, Bielomatik
- Aerosol-Trockenschmierung mit CO₂-Kühlung:
Aerosol Master 4000 c, Rother
- CO₂-Kühlsystem mit MMS ChilAire EI 3120, CoolClean
- Hochdruckkühlanlage Jet Break N20 POMPEs KPO 3509,
Barthod Pompes

Verfügbare Maschinenteknik

- 5-Achs-Hexapod-Fräsmaschine Mikromat 6X HEXA
- 5-Achs-Multifunktionsmaschine Dynapod
- 5-Achs-Fräsmaschine DIGMA 850 HSC
- 4-Achs-Waagrecht-Bearbeitungszentrum HEC 500D XXL
- 5-Achs-Bearbeitungszentrum HEC 630 X5
- 5-Achs-Bearbeitungszentrum DMU 210P
- CNC-Drehmaschine N20 mit Hochdruckeinheit
- Dreh-Fräszentrum GMX 250 linear
- Nagel VARIOHONE VSM 8-60 SV-NC
- Unrundschleifmaschine KEL-VARIA UR 175/1500
- Verzahnungsschleifmaschine Kapp KX 300P
- Koordinatenschleifmaschine SkoE400
- Spindelversuchsstand für CO₂-Kühlung

Verfügbare Messtechnik

- Koordinatenmessmaschine PRISMO7S-ACC (ZEISS)
- Diverse optische Rauheits- und Profilmessgeräte
- Konfokales Mikroskop, ITO Uni Stuttgart
- Weißlichtinterferometer, ITO Uni Stuttgart
- MikroCAD, GFM Teltow
- Raster-Elektronen-Mikroskop, LEO Oberkochen
- EDX-System, Oxford Instruments
- Tastende Rauheits- und Profilmessgeräte HOMMEL und
Mitutoyo
- Formmessgerät F2002, HOMMEL
- Ultraschallwanddickenmessgeräte
- Profilprojektor PJ300
- Optische Messtechnik von GOM
- Lasertriangulationssystem Steinbichler T-Scan CS
- Röntgendiffraktometer Xstress 3000G2, Stresstech

Herausgeber

Fraunhofer-Institut für
Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU
Reichenhainer Straße 88
09126 Chemnitz

Telefon +49 371 5397-0
Fax +49 371 5397-1404
info@iwu.fraunhofer.de
www.iwu.fraunhofer.de

Abteilung Zerspanungstechnologie

Dipl.-Ing. Carsten Hochmuth
Telefon +49 371 5397-1811
carsten.hochmuth@iwu.fraunhofer.de

Titelbild: Wälzfräsen

© Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen
und Umformtechnik IWU 2021