



Cryogenic – Zerspanen mit tiefkaltem Stickstoff



© MAG Europe GmbH

23.10.2012

Cryogenic - Zerspanen mit tiefkaltem Stickstoff

Dr.-Ing. Heiner Lang, MAG Europe GmbH, Göppingen

Einleitung

Kühlstrategien zur Verringerung der Temperatur bei Zerspanprozessen werden derzeit in Nassbearbeitung, Trockenbearbeitung, Minimalmengenschmierung und kryogener Kühlung unterteilt (Bild 1).



Abbildung 1: Kühlschmierkonzepte in der spanenden Fertigung

Die heute gängigste Kühlstrategie stellt die Nassbearbeitung dar, bei der Werkzeuge und Werkstück mit Kühlschmierstoff überflutet werden. Abhängig vom Werkstoff und Einstellgrößen werden hierbei große Mengen von Wasser, Kühlmedium und chemischen Zusätzen verwendet. Dieses sehr einfach umzusetzende, unkomplizierte Kühlkonzept ist jedoch ökologisch und ökonomisch umstritten. Kühlschmierstoffe gelten als schwer umweltverträglich und gesundheitsgefährdend. Des Weiteren entstehen bis zu 17% der Gesamtkosten eines Werkstückes durch die Kosten der Nassbearbeitung. Hierzu zählen Bereitstellung sowie Entsorgung des Kühlmittels, sowie Kosten während des Maschinenbetriebs.

Ein möglicher Ansatz zur gänzlichen Vermeidung des Kühlschmierstoffeinsatzes stellt die Trockenbearbeitung dar, bei dem entweder die eingeschränkte Kühlung durch Luft realisiert, oder auf eine Kühlung vollständig verzichtet wird. Besondere Bedeutung kommt hierbei den Werkzeugbeschichtungen zu, diese reduzieren die sehr hohe thermische Belastung des Substrates und verringern Adhäsions- und Reibvorgänge zwischen Werkzeug und Werkstück.

Nachteile der Trockenbearbeitung sind höhere Wärmeentwicklung, welche die Maßhaltigkeit negativ beeinflussen kann und der Wegfall des Späneabtransports durch Kühlschmierstoffe.

Kann auf die schmierende Wirkung der Kühlschmierstoffe nicht verzichtet werden, kann bei der Bearbeitung zusätzlich Minimalmengenschmierung (MMS) eingesetzt werden. Dabei wird ein Aerosol (Gemisch aus Luft und Schmierstoff) über Düsen oder über die Werkzeuge der Zerspanungsstelle zugeführt.

Ein neues Kühlungskonzept stellt die sogenannte kryogene Schneidenkühlung dar. Der Begriff „Kryogen“ bezeichnet Stoffe und Prozesse im Zusammenhang mit tiefkalten Temperaturen (kleiner -50°C). Die kryogene Bearbeitung verwendet zur Kühlung tiefkalte verflüssigte Gase, wie Stickstoff (Siedepunkt -195,8°C), Helium (Siedepunkt -268,93°C) oder Kohlenstoffdioxid (Siedepunkt -78,5°C). Kohlenstoffdioxid hat aufgrund der höheren Temperatur im Gegensatz zu flüssigen Stickstoff eine geringere Kühlleistung und gilt aufgrund seiner schlechten Umweltbilanz als bedenklich.

Kryogene Bearbeitung Zerspanprozess und Einfluss der Temperatur

Der Zerspanprozess unterliegt hohen statischen, dynamischen und thermischen Belastungen. Die Eingangsgrößen eines Zerspanprozesses, die sich unterteilen lassen in Systemgrößen (z.B. Werkzeugmaschine, Werkzeug, Spannsystem, Werkstoff, Rohteilgeometrie, ...) und Stellgrößen (z.B. Schnittgeschwindigkeit, Vorschubgeschwindigkeit, Schnitttiefe/-breite, Kühlschmierstoff) wirken sich je nach Kombination unmittelbar auf die Ausgangsgrößen des Zerspanprozess aus, die sich ebenfalls unterteilen lassen in Wirkgrößen (z.B. Geometrie Werkstück, Rauheiten, Randzonenbeeinflussung, Werkzeugverschleiß, ...) und Prozessgrößen (z.B. Kräfte, Schwingungen, Späne, Temperatur, ...). Die für die Zerspanung aufgewendete mechanische Wirkarbeit wird in Form von Verformungsarbeit (Scherarbeit und Trennarbeit) sowie Reibungsarbeit (Freiflächenreibung und

Spanflächenreibung) nahezu vollständig in Wärmeenergie umgewandelt. Die dabei entstehenden Wärmeströme aus der Zerspanzone werden nur zu gut 75% mit dem Span abgeführt, die restlichen ca. 25% werden in das Werkzeug bzw. in das Werkstück eingebracht, was sich sowohl in Werkzeugverschleiß als auch in Maßungenauigkeit im Werkstück bemerkbar macht.

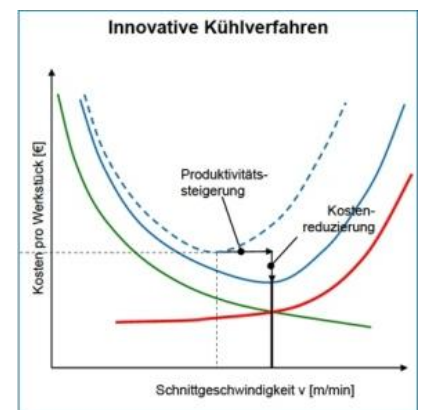
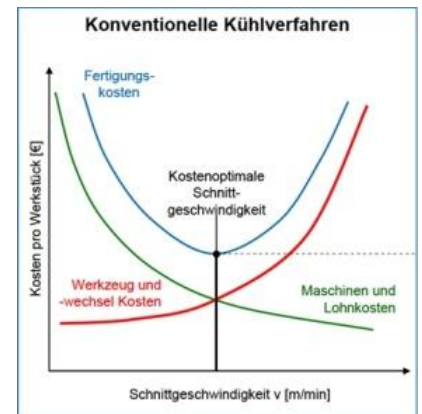


Abbildung 2: Wirtschaftlichkeitsvergleich unterschiedlicher Kühlschmierverfahren

Ebenfalls negativ auf den Werkzeugverschleiß wirken sich hohe Schnittgeschwindigkeiten aus, die zwar die Wirtschaftlichkeit begünstigen, da mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit die Bearbeitungszeit sinkt, die Ausbringung dementsprechend steigt und die Maschinen- und Lohnkosten sinken, gleichzeitig aber



mit höherer Schnittgeschwindigkeit auch die Temperatur steigt, was zu einem erhöhten Verschleiß und somit höheren Werkzeugkosten führt.

Die Zerspanung mit flüssigem Stickstoff ermöglicht eine signifikante Steigerung der Schnittgeschwindigkeiten für höhere Zerspanungsproduktivität, längere Werkzeugstandzeiten oder eine Kombination dieser beiden Vorteile. Dieses innovative Kühlverfahren trägt somit im Vergleich zu konventionellen Kühlverfahren maßgeblich zur Wirtschaftlichkeit eines Unternehmens bei (Bild 2).

Umsetzung kryogener Kühlung an Werkzeugmaschinen

Der Schlüssel für die Effizienz des von MAG neu entwickelten Systems liegt in der Möglichkeit, die Kühlung durch die Spindel direkt an das Zentrum des Schneidstoffes zu leiten und so den Kühleffekt im Körper des Schneideneinsatzes zu konzentrieren (Bild 3).

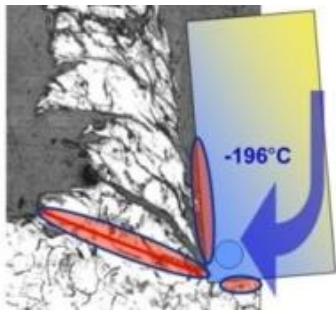


Abbildung 3: Kryogene Zerspanung

Der geringe Verbrauch und die relativ niedrigen Beschaffungskosten für Flüssigstickstoff sowie der Wegfall von Dekontaminations-, Entsorgungskosten sowie verschiedenen Kühlmittel-Aggregaten ermöglichen signifikante Kosteneinsparungen. Darüber hinaus verringern die chemischen Eigenschaften von Stickstoff die Belastungen für Umwelt, Mitarbeiter, Fertigungsmittel und Prozess. Die Vorteile der kryogenen Zerspanung liegen somit auf der Hand:

- | Erhöhung der Produktivität durch höhere Schnittwerte bei gleichbleibendem Werkzeugverschleiß
- | Steigerung der Werkzeuglebensdauer bei gleichen Schnittwerten wie in der konventionellen Zerspanung
- | Senkung der Kosten für die Kühlschmierstoffaufbereitung und Entsorgung (Trockenbearbeitung)
- | Schonung der Umwelt

Bei den Zuführstrategien lässt sich prinzipiell unterscheiden zwischen der kryogenen Überflutungskühlung sowie der kryogenen Innenkühlung (Bild 4). Ähnlich wie bei der Nassbearbeitung wird bei der kryogenen Überflutungskühlung das ganze sich im Eingriff befindliche System mit dem flüssigen Stickstoff überflutet. Obwohl einfach in der Umsetzung ist diese Strategie jedoch ineffektiv, da das Kühlmedium die Werkzeugschneide nur unzureichend erreicht und ein hoher Verbrauch von flüssigem Stickstoff entsteht. Trotz etwas aufwändigerer Umsetzung wird mit der kryogenen Innenkühlung eine wesentliche größere Kühlleistung erreicht, da der flüssige Stickstoff direkt in die Schneidplatte geführt wird. Daneben lässt sich mit dieser Strategie auch der Verbrauch von flüssigem Stickstoff deutlich verringern.

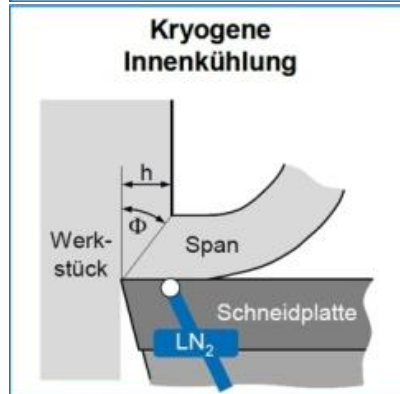
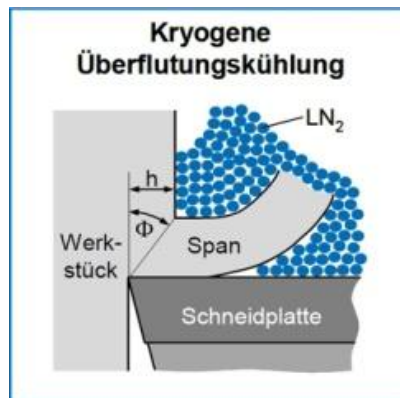


Abbildung 4: Zuführstrategien der kryogenen Kühlung

Die durchgängig umgesetzte Spindel-Innenkühlung erlaubt eine schnelle und unkomplizierte Integration des Systems in Fräs- und Drehmaschinen. Die notwendigen Komponenten für die kryogene Technologie lassen sich unterteilen in:

- | Stickstoffversorgung
- | Stickstoffzuführung
- | Spindel bzw. Revolver
- | MAG Cryogenic Werkzeugprogramm

Stickstoffversorgung: Die Stickstoffbereitstellung und -zuführung kann der Fertigungsanlage entsprechend ausgelegt werden (Bild 5). Somit sind Einzelmaschinen mit Tank und Zuführungssystem, Mehrmaschinenlösungen mit Zentraltank

und zwei bis sechs Maschinen im Verbund bis hin zu Systemlösungen mit Zentraltank und Anlageinstallation möglich.



Abbildung 5: Stickstoffversorgung

Stickstoffzuführung: Der flüssige Stickstoff wird vom Maschine- oder Zentraltank über vakuumisolierte Leitungen der Spindel oder dem Revolver zugeführt, abhängig von der jeweiligen Ausführung der Maschine bzw. des Prozesses (Bild 6). Das System gewährleistet eine verlust- und erwärmungsfrei Zuführung des Mediums mit einer Temperatur von -196°C direkt an die Schneide. Zudem ist das System in der Lage, die Menge, Fließgeschwindigkeit und den Druck des zugeführten Stickstoffs zu regeln und zwar angepasst auf die Anforderungen des jeweiligen Prozesses.

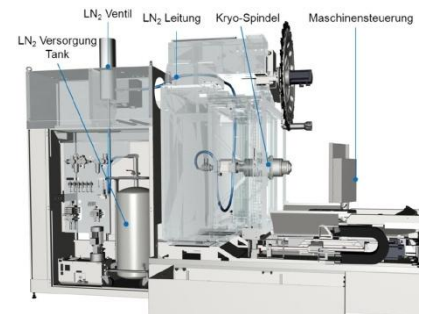


Abbildung 6: Stickstoffzuführung

Spindel bzw. Revolver: Die verschiedenen Schnittstellensysteme ermöglichen die Zuführung des Stickstoffs zum Werkzeug durch Spindel (Bild 7) oder Revolver ohne die Leistung oder Funktion der Komponenten zu beeinträchtigen. Die Spindeln und Bearbeitungseinheiten für die Stickstoffbearbeitung sind in verschiedenen Ausführungen verfügbar, mit HSK oder ANSI Schnittstellen und als 4- und 5-Achslösungen. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Isolierung gelegt. Um die volle Kühlwirkung an der Schneide zu erreichen, wurden vakuumisolierte Leitungen ebenfalls in diese Komponenten integriert.



Abbildung 7: Spindel mit Stickstoffzuführung

MAG Cryogenic Werkzeugprogramm: Die Zuführung des Flüssigstickstoffs erfolgt durch Spindel und Werkzeug direkt an die Werkzeugschneide. Dadurch lassen sich je nach Anwendung höhere Schnittgeschwindigkeiten erreichen, was in der Folge zu höheren Zerspanraten, höheren Werkzeugstandzeiten und zu einer Ener-



gieeinsparung führt. Der flüssige Stickstoff verflüchtigt sich durch die beim Zerspanprozess entstehende Hitze vollständig, so dass Belastungen für Mensch und Umwelt im Gegensatz zu herkömmlichen Kühlmitteln eliminiert werden. Im Bereich der Werkzeuge liegt der Fokus der kryogenen Technologie auf Vollhartmetall-Fräsern, Vollhartmetall-Bohrern, Drehwerkzeuge, Wendeschneidplatten-Fräser und Bohrstangen mit WSP (Bild 8).



Abbildung 8: MAG Cryogenic Werkzeugprogramm

Mit geeigneten Schneidstoffen wie z.B. Hartmetall, CBN, PKD oder Keramischen Schneidstoffen lässt sich ein breites Feld von Werkstoffen mittels flüssigen Stickstoffs bearbeiten. Als ideal geeignete Anwendungen seien hier die höchst anspruchsvolle Bearbeitung von schwer zu zerspanenden Werkstoffen wie z.B. Titan, nickelbasierte Legierungen, Sphäroguss oder GGV aber auch Compositematerialien wie z.B. GFK und CFK genannt.

Anwendungsfälle

Anwendung Renewable Energy & Aerospace – Bearbeitung von GFK und CFK



Abbildung 9: Composite-Bearbeitung eines Windflügelendstückes

Am Beispiel der Composite-Bearbeitung eines Windflügelendstückes mittels eines Bearbeitungsroboters sollen nachfolgend

die Möglichkeiten in den Bereichen Renewable Energy und Aerospace aufgezeigt werden (Bild 9).

Die Temperatur spielt bei der Bearbeitung von Verbundwerkstoffen eine besondere Rolle. Sie darf, abhängig vom Werkstoff, 70 – 160°C nicht übersteigen, um ein Schmelzen des Harzes und eine Delaminierung des Werkstoffes zu vermeiden. Durch den Einsatz der Stickstoffkühlung kann die Temperaturkontrolle verbessert und höhere Bearbeitungsgeschwindigkeiten erreicht werden. Späne und Stäube bleiben trocken, was das Recycling vereinfacht.

Die Vorteile der Stickstoffkühlung bei der Composite-Bearbeitung liegen in einem stabilen Prozess, da durch die Stickstoffkühlung, die für eine unkritische Bearbeitungstemperatur sorgt, die Schnittgeschwindigkeiten für die Bearbeitungsprozesse Fräsen und Bohren deutlich gesteigert werden können. Somit sind signifikante Produktionssteigerungen von bis zu 150 zusätzlichen Blättern pro Jahr möglich. Zusätzlich stellt die hochflexible Lösung mit einem 6-Achs-Roboter im Vergleich zu einem Bearbeitungszentrum einen geringen Invest dar. Neben der Bearbeitung von Windflügelendstücken aus GFK mit Epoxydharz eignet sich die Prozessführung mit Stickstoffkühlung auch für die CFK-Bearbeitung, auch hier bleiben die bei der Bearbeitung entstehenden Späne trocken.

Anwendung Automotive – Bearbeitung GJV-Zylinderblock



Abbildung 10: Bearbeitung GJV-Zylinderblock

Am Beispiel der Fräs- und Bohrbearbeitung eines GJV-Zylinderkurbelgehäuses sollen nachfolgend die Möglichkeiten im Bereich Automotive gezeigt werden. Die Bearbeitung von Gusseisen mit Vermiculargraphit ist technologisch anspruchsvoll und kostenintensiv. Die Eigenschaften des Materials führen zu hohen Temperaturen bei der Zerspanung. Die Parameter müs-

sen dieser besonderen Belastung angepasst werden, so dass der Verschleiß nicht Überhand nimmt. Bei den Bearbeitungsfällen Aufbohren der Zylinder sowie Planfräsen des Zylinderkopfes kommt flüssiger Stickstoff zum Einsatz.

Die Vorteile der Stickstoffkühlung bei der Gussbearbeitung liegen in einem 50% höheren Vorschub. Des Weiteren sind 25% mehr Teile fertigbar, was eine deutliche Investeinsparung in der Fertigungslinie darstellt, da bei Einsatz von flüssigem Stickstoff jede fünfte Maschine durch die Produktivitätserhöhung kompensiert werden kann. Weiterhin kann dies als umweltfreundliche Trockenbearbeitung angesehen werden, was einerseits das Späne-Recycling erleichtert, zum anderen auch kein entsprechender Platzbedarf für eine zentrale oder lokale Kühlmittleinrichtung vorzusehen ist.

Anwendung Aerospace – 5-Achs-Bearbeitung Titanblisk

Am Beispiel der 5-Achs-Titan-Bearbeitung eines Blisks sollen nachfolgend die Möglichkeiten im Bereich Aerospace aufgezeigt werden (Bild 11). Die Titanbearbeitung ist aufgrund der spezifischen Eigenschaften des Materials mit hohem Werkzeugverschleiß verbunden und daher kostenintensiv. Die Zähigkeit des Materials sowie die geringe Wärmeleitfähigkeit und hohe Wärmekapazität führen hier ebenfalls zu hohen Temperaturen bei der Bearbeitung, so dass auch bei der Titanbearbeitung die entsprechenden Parameter dieser Belastung angepasst werden müssen, um Temperaturen und Werkzeugverschleiß auf einem akzeptablen Niveau zu halten. Durch den Einsatz der Stickstoffkühlung sollen Werkzeugstandzeit und Produktivität erhöht werden.

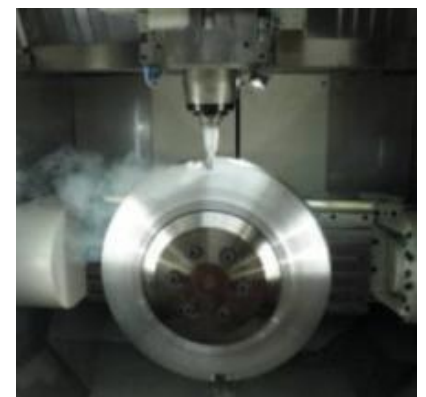
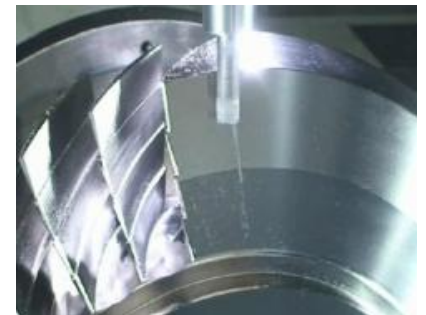


Abbildung 11: 5-Achs-Bearbeitung Titanblisk



Die Vorteile der Stickstoffkühlung bei der Titan-Bearbeitung liegen in einem um 30% höheren Vorschub durch die Möglichkeit, den Kontaktwinkel des Werkzeuges zu vergrößern sowie in einer erhöhten Werkzeugstandzeit (von 1 auf 2 Blisks). Darüber hinaus ist die kombinierte Minimalmengenschmierung von Vorteil, welche deutlich verbesserte Oberflächenqualitäten ab Werkstück ermöglicht.

Anwendung Automotive & Industrial Equipment – Fertigdrehen gehärteter Stahlwellen

Am Beispiel des Fertigdrehens einer gehärteten Stahlwelle sollen nachfolgend die Möglichkeiten im Bereich Automotive und Industrial Equipment aufgezeigt werden (Bild 11). Beim Hartdrehen wird zur Optimierung der Oberflächen und der Zykluszeiten üblicherweise die Schnittgeschwindigkeit erhöht. Um thermische Schocks zu vermeiden, wird trocken bearbeitet.

Durch die Werkzeug-Innenkühlung mit Stickstoff wird die Schneide besser gekühlt und die maximale Wärmeabfuhr über den Span kann beibehalten werden. Dies führt zu längeren Werkzeugstandzeiten und höheren Schnittgeschwindigkeiten.



Abbildung 12: Fertigdrehen gehärteter Stahlwellen

Die Vorteile der Stickstoffkühlung beim Fertigdrehen gehärteter Stahlwellen liegen in einer um 50% höheren Vorschubgeschwindigkeit.

Zusammenfassung

Im Vergleich zu konventionellen Kühlverfahren wie der Nass- und Trockenbearbeitung ermöglicht die kryogene Kühlung eine Erhöhung der Werkzeugstandzeit sowie der Produktivität. Mit diesem Verfahren sind Hochgeschwindigkeitsbearbeitungen verschiedenster Werkstoff wie z.B. Titan, nickelbasierte Legierungen, Edelstahl, GGK oder Metallmatrix-Verbundwerkstoffe möglich, so dass ein breites Anwendungsspektrum industriell eingesetzter Werkstoffe damit abgedeckt werden kann. Darüber hinaus ist mit dieser Technik eine thermische Kontrolle für hochpräzise Anwendungen und Composite-Bearbeitung möglich. Schließlich wird dem Thema Umweltfreundlichkeit dadurch Rechnung getragen, dass der eingesetzte Stickstoff keine toxischen Eigenschaften besitzt, kein Treibhausgas darstellt und die entstehenden Späne und Stäube trocken bleiben, so dass ein vereinfachtes Recycling möglich ist. Schließlich werden mit dem flüssigen Stickstoff auch die eingesetzten Energie- und Fluidverbräuche reduziert. Die kryogene Zerspanung hat somit vergleichbares Erfolgspotenzial und industrielle Etablierungschancen wie die Minimalmengenschmierung.

