

Das TTT System – ein Fenster in die Tribologie

Bewertung von Kühlschmierstoffen und Werkzeug Eigenschaften mittels eines realen Metallbearbeitungsprozesses

Das TTT Tapping-Torque-Testsystem ist ein multiples, vergleichendes Bewertungssystem für die Effizienz von Kühlschmiermitteln (KSS) einerseits, und andererseits von Metallbearbeitungswerkzeugen in Bezug auf Material, Geometrien und Beschichtungen. Basierend auf der Technologie einer drehmomentkontrollierten, prozesssicheren Gewindefertigungseinheit (Schneiden und Formen sämtlicher eisen- und nichteisenhaltiger Metalle) erfolgt der Arbeitsprozess ohne Leitspindel, lediglich der Steigung des Werkzeugs folgend.

Ausgestattet mit einer spezialisierten Analyse-Software und einem Temperatursensor zur Feststellung des Delta T- Wertes (ΔT), ermittelt und speichert das TTT System entscheidende Messwerte in Bezug auf Schmierung, Reibung und Verschleiß und stellt diese in Form von Messkurven, farbunterschiedlichen Diagrammen und Tabellen auf einem angeschlossenen Computerbildschirm dar. Auf diese Weise ist es möglich, die tribologischen Auswirkungen in Abhängigkeit von Schmiermittelformulierungstechniken, Werkzeugeigenschaften und Werkstückmaterialien zu bestimmen und zu interpretieren.

Die von der deutschen „Gesellschaft für Tribologie“ GfT festgelegten technisch-physikalischen Beanspruchungsparameter bei einem Verschleißvorgang sind durch vier Werte definiert:

Normalkraft F_N

Geschwindigkeit v

Beanspruchungsdauer t_B und

Temperatur T

Innerhalb der Funktionen des TTT Systems kommen

- die Normalkraft F_N als Kalkulationsgrundlage für das Drehmoment an der Maschinenspindel
- die Geschwindigkeit v für die Drehzahl der Spindel (Schnittgeschwindigkeit)
- die Beanspruchungsdauer t_B für die Gewinde-Tiefe und Zeit
- sowie die Temperatur T für den errechneten Delta T Wert (ΔT)

zur Anwendung.

Mithilfe seiner Auswerte- und Analysesoftware erfasst und visualisiert das TTT-System folgende Parameter während des Prozesses und bereitet sie zur weiteren Analyse auf:

- **Drehmoment** als Messwert für die faktisch erbrachte Arbeitsleistung (Drehmoment M_z in Ncm)
- **Mittelwert** als Messwert für die über den ganzen Prozess durchschnittlich erbrachte Arbeitsleistung (arithmetisches Mittel in Ncm)
- **Standard Abweichung** als Messwert für die mittlere Abweichung des Drehmoments um den Mittelwert (Maß für die Streubreite)
- **Gaußsche Verteilung** als Messwert für die Häufigkeitsverteilung der Anzahl der verschiedenen Drehmomentwerte während des Prozesses visualisiert die Homogenität einer Schmiermittelformulierung
- **Integral** als Messwert für die Summe der Belastung auf das Messwerkzeug (Verschleiß). Berechnet wird mithilfe der trapezoidalen Flächenberechnung die Fläche unterhalb der Drehmomentkurve (ermöglicht die numerische Annäherung an den effektiven Reibwert)
- **Temperaturwert ΔT** als Messwert der thermischen Beeinflussung auf den Prozess zur Interpretation tribologischer Wirkkräfte (durch Prozessgeschwindigkeit, Reibwärme, Wasser-Anteil, Additive und -familien, EP's, Werkstückmaterialien sowie der Werkzeugeigenschaften (Geometrie und Beschichtung)).

Der Analyser, der die errechneten Resultate entsprechend den vorgenannten Parametern auswertet, verfügt über einen Dual-Cursor, der es ermöglicht, jeglichen Bereich der graphischen Messkurve einzugrenzen (z.B. das Arbeitstableau) und diesen einer detaillierteren Analyse zu unterziehen.

Temperatur – ein wesentlicher Parameter für die Leistungsbewertung von Schmiermedien

Die Temperatur in einem Arbeitsprozess wird maßgeblich beeinflusst von der Legierung des Werkstück-Materials, von den Eigenschaften des Werkzeugs (z.B. Beschichtung, Geometrie), von der Prozessgeschwindigkeit und den dadurch beeinflussten Drehmomenten während des Prozesses, der Beanspruchungsdauer (Tiefe und Schnittgeschwindigkeit) und nicht zuletzt von der Schmierfähigkeit des Mediums. bzw. dessen Rezeptur (Formulierung).

Diese Eigenschaften sind essentiell für die Bestimmung und Interpretation tribologischer Einflüsse und unverzichtbar für eine Entscheidung zugunsten eines bestimmten Schmiermittels bzw. für die Auswahl einer (bestimmten) Formulierungstechnik.

Der Temperatur Differenzwert ΔT dokumentiert deutlich den Einfluss der Temperatur auf tribologisch relevante (z.B. von Additiven gebildete) Schichten, sowie ob und unter welchen Bedingungen sich solche Schichten bilden.

Meinungen zu diesen Phänomenen gibt es viele. Entscheidend ist es deshalb, die Parameter und Voraussetzungen zu erkennen unter denen positive oder negative Wechselwirkungen auftreten oder nicht.

Die exakte Temperatur an der Spitze des Werkzeugs zum Zeitpunkt seiner größten Erhitzung lässt sich jedoch nicht ohne sehr hohen Aufwand erfassen. In der praktischen Anwendung würde dies beinahe unlösbare Probleme hervorrufen.

Ermittelt man bei Beginn einer Messung an der Spitze des Messwerkzeuges jedoch die Ausgangstemperatur, und unmittelbar nach dem Messvorgang die End-Temperatur und stellt diese dem Ausgangswert gegenüber, erhält man den Temperatur-Differenz-Wert ΔT .

Obwohl nicht darstellbar in absoluten Gradzahlen, sind die ermittelten ΔT -Werte aussagekräftig und liefern einen diagnostischen Wert (z.B. zur Interpretation von Temperatureinflüssen).

Der Einfluss der Temperatur auf die Bildung von Reaktionsschichten

Wie allgemein bekannt, sind in der Literatur Temperaturbereiche, in denen Additive und EPs zu wirken beginnen, nicht besonders präzise beschrieben, und auch nicht, dass sich verschiedene Additive nicht nur synergetisch erweisen, sie können sich in ihrer Wirkkraft unter bestimmten Bedingungen auch gegenseitig ausschließen.

Damit Additive nicht wirkungslos oder gar schädigend in der Formulierung „herumschwimmen“ ist es notwendig, die mechanische Realität darzustellen und daraus nachweisbare und wiederholbare Schlüsse zu ziehen.

Eine besondere Bedeutung kommt hier der Temperatur bzw. der Reibungswärme zu, die u.a. Voraussetzung ist, damit diese Prozesse überhaupt stattfinden.

Das bedeutet, dass ein kompatibles Schmiermittel-Mischungsverhältnis, also die Rezeptur unter Berücksichtigung der Wasseranteile (Kühlfaktor) und den verwendeten Labor-Parametern wie zum Beispiel Geschwindigkeit und Werkzeugbeschichtung, und schließlich auch von den Inhaltsstoffen der Formulierung, zum Beispiel den eingesetzten Additiv-Familien, abhängig ist.

Additive, insbesondere EPs, benötigen eine gewisse Temperatur, bedürfen also einer gewissen Reibung, um Reaktionsschichten bilden zu können, die letztlich wirksam werden sollen.

Selbst messbare kleine Unterschiede können einen großen Einfluss auf die Standzeit von Werkzeugen haben, deren Verschleiß so gering wie möglich ausfallen soll. Das bedeutet, dass der Wirkmechanismus, der wie schon gesagt, von der Temperatur während eines realen Arbeitsprozesses und gegebenen Laborbedingungen abhängig ist, genau beobachtet werden muss.

Einer dieser Wirkmechanismen ist zum Beispiel der sogenannte Carry-Over-Effekt, der nachweisbar auftreten kann, wenn in Verbindung mit bestimmten Temperaturen oberflächenaktive Additive während der Bearbeitung lokal sogenannte Reaktionsschichten bilden, wie z.B. Eisensulfide.

Diese Schichten verändern beispielweise das kristalline Gefüge von Oberflächen, beeinflussen lokal die elektronische Struktur und verändern die Oberfläche, Dabei ist zu vermuten, dass diese Schichten (zumindest) im Moment ihres Wirkens nicht mehr auf der Oberfläche sitzen – wie es oft in Büchern beschrieben wird – sondern sie selbst zur Oberfläche werden.

Es sind aber nicht nur die Temperatur und die Zusatzstoffe, die in einem KSS zu tribologisch relevanten Auswirkungen führen:

„Die Art der Wechselwirkung ist abhängig von der Natur der Additive und der chemischen Natur der Metalloberfläche“, schreibt Prof. Dr. Joachim Schulz ²⁾ vom „Institut für Materialwissenschaften“ in Bremen in einer vielbeachteten Studie aus dem Jahre 2013. So seien etwa „die chemischen Oberflächeneigenschaften von z.B. „karboniertem“ und „rostfreiem“ Stahl völlig unterschiedlich und haben einen gewaltigen Einfluss auf die Wechselwirkungen mit KSS Additiven.“

Als Beispiel fügt Schulz hinzu: Zitat: *„Oxide beziehungsweise oxidische Oberflächen (rostfreier Stahl, Aluminium, Titan) sind nicht wirklich in der Lage, mit ionischen Additiven wie etwa sauren Verbindungen oder phosphorisierten oder stark basischen Sulfonaten zu interagieren.“*

Diese Art von Oberflächen gehen eine Wechselwirkung nur mit nichtionischen Additiven, z.B. chlorinierte Paraffine oder neutrale Schwefelverbindungen ein.

Die oxidische Bindung zwischen Metallen (Eisen, Chrom oder Nickel) und Sauerstoff (Oxygen) ist [dagegen] sehr stabil und kann in einem Metallbearbeitungsprozess von Additiven nicht getrennt werden.“

Diese Aspekte genau zu hinterfragen ist allerdings nicht die Aufgabe der Maschinenbauer, sondern die der Chemiker und Tribologen.

Die Hauptanwender des TTT Systems sind:

- Nationale und internationale Öl- und Schmiermittelhersteller mit Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen (F&E / R&D) weltweit
- Nationale und internationale Werkzeughersteller mit ebenfalls länderübergreifenden Forschungs- und Verkaufsaktivitäten sowie
- Universitäts- und Industrielaboratorien für anwendungsorientierte Forschung und Entwicklung, für überprüfte prozesssichere Fertigungstechnik und zur Findung neuer Erkenntnisse und Einsichten in die tribologische Realität.

Um all deren Anforderungen auf der Basis wissenschaftlicher Methoden gerecht zu werden, ist es notwendig, kompatible Konditionen in Bezug auf Material, Messtechnik und physikalische Bedingungen zur Verfügung zu stellen.

Das TTT System und seine Standards

- Metrisches System mm
- Kraftbemessung in Ncm
- Standard Drehzahlen min⁻¹ / rpm
- Temperatur °C

Zur Anwendung im TTT-System kommen ausschließlich vermessene Werkzeuge und Materialien (unter folgenden Standards) zum Einsatz:

Vermessene Werkzeuge

- **TTT_M4F-NT** Forming vaporized nitrated with gauged pitch-diameter
- **TTT_M4F-TINT** Forming TIN coated with gauged pitch-diameter
- **TTT_M4C-T** Cutting-Standard blank with gauged pitch-diameter

Manuel geprüfte Testplatten mit 140 Grundlöchern für 20 mm Gewindelänge (5xD)

- Testbars Stahl, **X6CrNiMoTi17-12-2 / 1.4571** (V4A) / 316Ti
Tensile strength R_m 725N/mm² / 225 HB / 112 PSIx1000
Elongation A_5 (%) > 40 / $R_m = 775$ N/mm²
- Testbars Alu, AlZnMgCu01,5 / 3.4365 / 7075
Tensile strength R_m 420-450 N/mm² / $R_{p0,2} = 420$ N/mm²
Elongation $A_5 > 5-7\%$ / 140 HB / density 2.78 Kg/dm³
(*Aircraft – CarEngine standard/classic*)

Standard Drehzahl / Schnittgeschwindigkeit

- Stahl 800 min⁻¹
- Aluminium 1200 min⁻¹

Bei der Gestaltung bzw. der Bewertung von Kühlschmiermitteln entspricht es dem TTT-Standard, stets nur nitriert bedampfte (vaporized nitrated) Werkzeuge zu benutzen, da sich mit beschichteten Werkzeugen chemische Unverträglichkeiten oder Neutralisierungen zwischen den KSS Bestandteilen und der Beschichtung ergeben können.

Ähnliches gilt für Werkzeughersteller, denen empfohlen wird, beim Design oder der Evaluierung eines neuen Werkzeugs nur ein klar identifiziertes Standard Kühlschmiermittel zu verwenden, damit die gewonnenen Resultate (auch andernorts) unter- und miteinander vergleichbar sind und jederzeit wiederholt werden können.

Die Ausschlussmethode

Bei der Entwicklung eines neuen Schmierstoffs oder eines neuen Werkzeugs ist es (äußerst) empfehlenswert, sich des sog. Ausschlussprinzips zu bedienen, um herauszufinden, ob eine Veränderung positive oder negative Ergebnisse zur Folge hat.

Schmiermittel- und Werkzeugdesigner haben es mit allen möglichen Anforderungen und Materialien zu tun, die stets spezielle Lösungen erfordern. Durch zielorientiertes Ausprobieren verschiedener Rezepturen und Formulierungstechniken werden sich die Effekte – seien sie positiv oder negativ – herauskristallisieren. Um verschiedene Realitäten herzustellen, zum Beispiel Zu- oder Abnahme der Temperatur (da gewisse Additive nur bei bestimmten Temperaturen ihre Wirkkraft entwickeln, während andere unter gleichen Bedingungen ihre Wirkkraft verlieren) ist es möglicherweise notwendig, die Prozessgeschwindigkeit zu erhöhen oder zu reduzieren.

Weitere Schritte sind die Hinzufügung oder das Weglassen von Schmier-Grundsubstanzen, Additiven, Wasser oder etwa der Austausch von Messwerkzeugen, nicht nur, weil ein Werkzeug eventuell beschädigt sein könnte. Es muss auch beachtet werden, dass ein beschichtetes Werkzeug im Gegensatz zu einem unbeschichteten in der Kombination mit bestimmten Additiven unterschiedliche Leistungswerte liefern kann.

So ist es also durchaus denkbar, dass ein vermutetes „physikalisches Problem“ eine „chemische Ursache“ hat – und umgekehrt. Deshalb ist es notwendig, für jeden einzelnen Entwicklungsschritt und für jede einzelne Veränderung eine vergleichbare und beweiskräftige Kontroll-Messung durchzuführen.

Nachweise für Auswirkungen und Effekte sind unverzichtbar, das heißt, sämtliche Ergebnisse müssen nachvollziehbar und wiederholbar sein.

Einer solchen Vorgehensweise kann gar nicht genug Bedeutung beigemessen werden, zeigen die Resultate doch möglicherweise völlig neue und wertvolle Wirkmechanismen bzw. chemische Intoleranzen oder physikalisches Unvermögen auf.

Das Ergebnis jeder Veränderung offenbart sich in der anschließenden TTT Analyse.

Ist es positiv, und die veränderte Probe liefert bessere Messwerte, wird dies für jeden Schmiermittel- oder Werkzeug-Designer von höchstem Interesse sein.

In letzter Konsequenz bedeutet dies, dass die Merkmale, die während eines Arbeitsprozesses auftreten, nicht nur ein Maßstab für den physikalischen oder chemischen Anteil des Prozesses sind, sondern auch einen Beleg darstellen für den schöpferischen Anteil beim Entwickeln und Herstellen einer Formulierung, einer Werkzeuggeometrie oder einer Beschichtung.

Diejenigen, die sich mit aller Kreativität dieser Aufgabe widmen und herausfinden wollen, aus welchen Gründen und unter welchen Bedingungen ein Reibmoment bei gleicher mechanischer Effektivität größer oder kleiner wird, werden von der Flexibilität und der Bandbreite des TTT Systems sowie der neuen Standards und Methoden und ihren Möglichkeiten profitieren. Auch wenn es sich aufgrund der enormen Komplexität tribologischer Vorgänge stets nur um Annäherungen an absolute Werte handeln kann. In den meisten Fällen ist es die eigene Erfahrung, die den empirischen Beweis liefert, der mit der Lösung eines Problems einhergeht – in diesem Fall im Kontaktbereich von aufeinander einwirkenden Oberflächen in relativer Bewegung.

Das TTT System ermöglicht es, die tribologischen Wirkkräfte und die effektive Kraft komplexer Formulierungen besser zu verstehen und nachzuweisen. Es ist ein Instrument für die Entwicklung und Optimierung ökonomisch und hoffentlich auch ökologisch erfolgreicher Schmiermittel Formulierungen sowie erfolgreicher Metallbearbeitungswerkzeuge und Beschichtungen in einem wissenschaftlichen und industriellen Kontext.

1) GFT, Tribologie, 2002, worksheet 7, page 8)

2) Lubricants 2013, S. 84, Joachim Schulz 1

1. "On the Interactions of Additives in Metalworking Fluids with Metal Surfaces"
2. Theoretical Model of the Interactions between Additives and Metal Surfaces
Explanation of (Re)Action of Additives in Metalworking Process (General)

microtap GmbH
TTT-Systems / Thread Tapping Technology
www.tapping-torque-test.com