

Reibung und Verschleiß unter Extrembedingungen beherrschen

Tribologisches Verhalten von SiC-Keramiken bei Mangelschmierung und Trockenlauf

DYNAMISCHE DICHTUNGEN/WERKSTOFFE – SiC-Gleitlager und Gleitringdichtungen haben sich in weiten Bereichen der Technik aufgrund der hohen Abrasions- und Korrosionsbeständigkeit und ihres günstigen tribologischen Verhaltens sowohl in Eigenpaarungen als auch gegenüber anderen Werkstoffen etabliert. Unter Mangelschmierung und insbesondere unter Trockenlauf sind aber auch diese Werkstoffe nicht dauerhaft beständig, sondern werden geschädigt. Die Vermeidung derartiger Schädigungen war das Ziel diverser werkstofftechnischer Entwicklungen in der Vergangenheit. Zur Ermittlung der Effektivität dieser Maßnahmen wurden einige Werkstoff-Varianten hinsichtlich ihres tribologischen Verhaltens unter Mangelschmierung und Trockenlauf untersucht. In diese Untersuchung wurde eine neuartige Beschichtung der Keramik mit polykristallinem Diamant (PKD) mit einbezogen, um zu klären, ob diese eine Lösung für derartige extreme Bedingungen bietet.

Das Versagen von Gleitringdichtungen ist nach wie vor eine der wichtigsten Ausfallursachen von Pumpen und Kompressoren. Es gab hierbei zwar enorme Fortschritte in der Vergangenheit, nach wie vor existiert aber keine zuverlässige Lösung für Mangelschmierung und Trockenlauf, wie sie bei Betriebsstörungen immer wieder auftreten. Um dieses Defizit zu beheben, wurde eine Vielzahl werkstofftechnischer Entwicklungen ausgeführt, wie z.B. SiC-basierende Composite mit C-Einlagerungen oder anderen Feststoff-Phasen, die eine Art Feststoff-Schmierfilm ausbilden sollen, oder einer gezielten Porosität als Reservoir für Schmierstoff oder Feuchtigkeit.

Experimentelle Untersuchungen

Bei der Schwingungsverschleiß-Prüfung, die in Kooperation mit BAM, Berlin, durchgeführt wurde, wird eine Kugel gegen eine Probe des zu charakterisierenden Werkstoffes mit planer Oberfläche gedrückt und mit einer zyklischen, gleitenden Relativbewegung beaufschlagt. Die gewählten Versuchs-

bedingungen waren wie folgt – Gegenkörper: Kugel 100Cr₆ (10 mm Durchmesser), Schwingweite: 0,2 mm, Frequenz: 20 Hz, Normalkraft: 10 N, Zyklen: 100.000, Temperatur: 24 °C, Rel. Feuchte: ~4%, ~50%, 100%.

Für anwendungstechnisch relevantere Ergebnisse wurde in Zusammenarbeit mit der FH Ingolstadt ein Großteil der im Schwingreibverschleiß bewerteten Werkstoffvarianten zusätzlich mittels eines Wazau-Gleitverschleiß-Tribometers untersucht. Hierfür wurde eine Ring/Scheibe-Anordnung mit jeweils werkstoffgleichem stationärem Ring (mittlerer Durchmesser 48 mm) und rotierender Scheibe gewählt. Die Laufflächen von Ring und Scheibe waren geläppt und wiesen eine definierte Oberflächenrauheit Ra von 0,1 µm auf. Die hierbei angewandten Versuchsparameter waren wie folgt: Atmosphäre: Stickstoff, rel. Feuchte (r. F.): < 2%, > 96%, Temperatur: Raumtemperatur zwischen 20 und 26 °C, Gleitgeschwindigkeit: 0,1 m/s, Flächenpressung: 0,3 N/mm², Laufzeit: 2 h.

Die tribologischen Untersuchungen umfassten als erste Gruppe jeweils ein dichtes, handelsübliches gesintertes SiC (SSiC, einphasig mit mittlerer Korngröße), ein Si-infiltriertes SiC (SiSiC, zweiphasig) sowie ein Gasdruckgesintertes Si₃N₄ (GPSN, zweiphasig). Ein SSiC-Paar wurde zusätzlich mit polykristallinem Diamant beschichtet. Als zweite Gruppe wurden spezielle, kommerziell verfügbare SiC-Qualitäten in die Untersuchung mit einbezogen, die laut Hersteller günstigere tribologische Eigenschaften aufweisen. Diese Werkstoffe mit den Kurzbezeichnungen C, F, G und P sind dadurch charakterisiert, dass die Qualität C ein bimodales Gefüge mit einer Korngröße von 10 bis 1.500 µm, die Qualität F ein feines, homogenes Gefüge mit einer Korngröße von ca. 5 µm aufweist. Das Gefüge des Werkstoffes G ist ebenfalls bimodal mit einer Korngröße von 10 bis 1.000 µm und enthält eingelagerte Graphitpartikel, die im Falle von Trockenlauf verbesserte Notlauf-eigenschaften bewirken sollen. Die Qualität

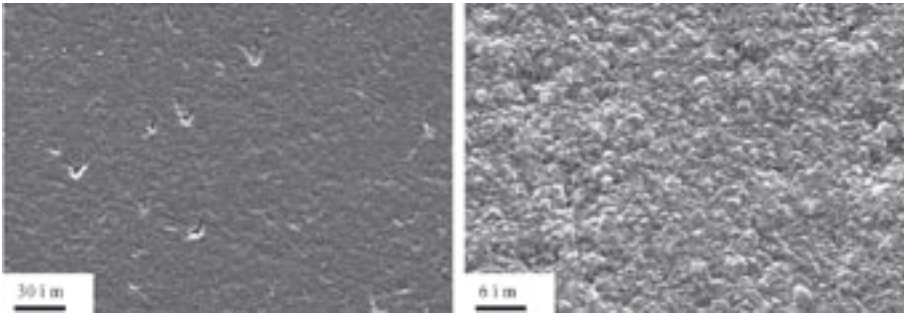
P mit einer Korngröße von ca. 5 µm gleicht dem Gefüge von F, enthält jedoch gezielt erzeugte Poren mit einem Durchmesser von 50 bis 200 µm. Diese Poren sollen Schmierstoff bevorraten und damit ebenfalls die Trockenlaufeigenschaften verbessern.

Ergebnisse

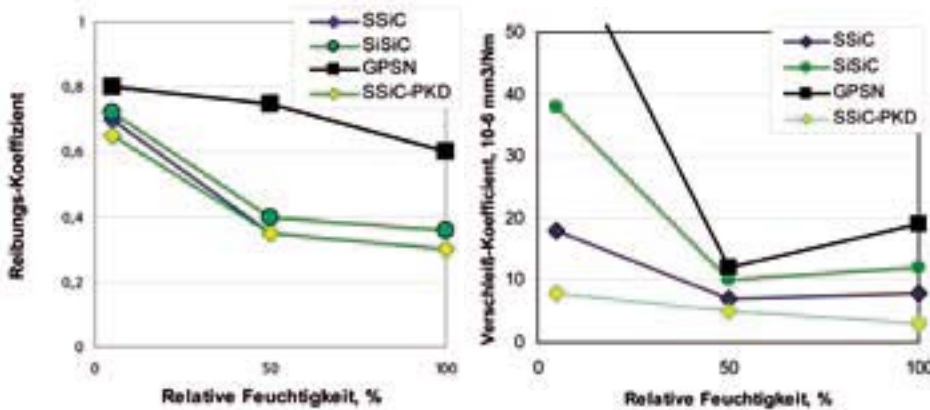
Schwing-Reibverschleiß-Test (Kugel-Scheibe)

Hiermit wurden zunächst die Standardwerkstoffe gesintertes SiC (SSiC) und Si-infiltriertes SiC (SiSiC) sowie das Gasdruckgesinterte Si₃N₄ (GPSN) bewertet. Dieses Probenstet wurde ergänzt um ein mit polykristallinem Diamant-(PKD)beschichtetes SiC von ca. 10 µm Dicke. » 1 zeigt die diamantbeschichtete SSiC-Oberfläche im neuen, unbenutzten Zustand und die Diamantkristalle mit einer Größe von ca. 0,5 bis 1 µm. Die Ergebnisse der Prüfung dieser Werkstoffe gegen den Reibpartner „Kugel 100Cr6“ sind in » 2 zusammengestellt. Hier ist ersichtlich, dass die Reibungszahl des GPSN nahezu unabhängig von der relativen Luftfeuchte auf einem hohen Niveau liegt, was für Si₃N₄, aber auch für Keramiken wie Al₂O₃ oder ZrO₂ typisch ist. Für die SiC-Varianten SSiC und SiSiC liegen die Anfangswerte bei geringer Luftfeuchte etwas niedriger, die Kennwerte nehmen jedoch mit zunehmender Feuchte stark ab, was das Potenzial dieser Werkstoffvarianten zumindest für Mangelschmierungs-Anwendungen verdeutlicht. Ein praktisch identisches Verhalten zeigt in diesem Test die PKD-beschichtete SiC-Probe.

Wesentlich deutlichere Unterschiede ergeben sich dagegen für den Verschleiß » 2 rechts. Bei geringster Luftfeuchte tritt beim GPSN sehr hoher Verschleiß auf, gefolgt von der SiSiC-Variante. Das SSiC erweist sich dagegen bereits als recht verschleißbeständig und wird diesbezüglich nur noch vom PKD-beschichteten SSiC übertroffen. Mit zunehmender Feuchtigkeit nimmt für alle Werkstoffvarianten der Verschleißkoeffizient deutlich ab. Das monolithische und das PKD-beschichtete SSiC erweisen sich



» 1 REM-Aufnahmen der Oberfläche einer PKD-beschichteten SSiC-Probe



» 2 Reibungs- und Verschleiß-Koeffizient verschiedener Keramiken gegen 100Cr₆- Stahl in Abhängigkeit von der Luftfeuchte

in diesem Vergleich als die verschleißbeständigsten Werkstoffe. Das SiSiC zeigt gegenüber SSiC keinerlei Vorteile, wodurch sich für SSiC die Bedeutung in der industriellen Praxis für Tribonanwendungen bestätigt. Für das PKD-SSiC zeichnet sich jedoch das Potenzial einer noch weiter verbesserten Verschleißbeständigkeit ab.

Untersuchungen mittels Gleitverschleiß-Tribometer: Reibung und Verschleiß arteigener Tribopaarungen

Um anwendungstechnisch relevantere Ergebnisse zu erhalten, wurden die im Schwingreibverschleiß bewerteten monolithischen SiC-Werkstoffvarianten, das PKD-SiC beschichtete SSiC sowie die speziellen kommerziell verfügbaren „Tribowerkstoffe“ zusätzlich mittels eines Wazau-Gleitverschleiß-Tribometers unter Wasser sowie unter definiert variierten Feuchtigkeiten (2% - 50% - 96% rel. F.) in Stickstoff untersucht. Dies erfolgte mit der beschriebenen Ring/Scheibe-Anordnung mit jeweils werkstoffgleichem stationärem Ring und rotierender Scheibe. Die Laufflächen von Ring und Scheibe waren geläppt und wiesen eine definierte Oberflächenrauheit Ra von ca. 0,1 µm auf. Die Oberflächen wurden vor und nach dem Verschleißtest mittels REM untersucht und dokumentiert.

- Wasser – Die unter Wasser ausgeführten Versuche zeigten, dass sich die einzelnen Qualitäten hinsichtlich des Reibungs- und Verschleiß-Verhaltens nur unwesentlich unterscheiden. Die resultierenden Reibungszahlen starten jeweils bei ca. 0,03 und fallen im Laufe von 60 Minuten auf ca. 0,01 ab, so dass sich bei allen Qualitäten eine mittlere Reibungszahl zwischen 0,010 und 0,016 ergibt, d.h. es liegt reine Flüssigkeitsreibung vor. Nach vierstündigem Dauerlauf trat zwar bei allen SiC-Qualitäten eine leichte Glättung der Oberfläche, aber kein messbarer Massenverlust bzw. Verschleiß auf. Damit erweist sich Wasser für diese Tribosysteme und die gewählten Bedingungen als ausreichendes Schmiermittel.
- 96% relative Feuchte – Unter diesen Bedingungen ergaben sich deutlichere Unterschiede zwischen den verschiedenen SiC-Qualitäten, wie » 3 zeigt. Für die meisten Varianten resultiert eine Reibzahl um 0,5. Dies verdeutlicht, dass diese relativ hohe Umgebungsfeuchtigkeit ausreicht, um eine Schmierwirkung zu erzeugen und den Verschleiß gering zu halten. Seitens der monolithischen Werkstoffe weist nur der graphithaltige Werkstoff G eine noch geringere Reibzahl auf, was zeigt, dass der eingelagerte Graphit unter diesen Versuchsbedingungen eine Schmierwirkung entfaltet. Eine noch



ACHEMA 2009

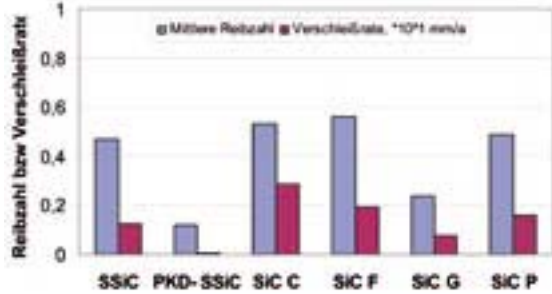
Halle 9.1 | Stand 010 – R12
11. – 15. Mai 2009 | Frankfurt a. Main

Dichtungen und mehr!

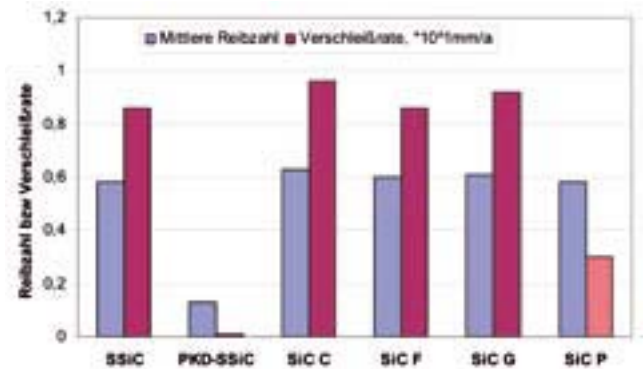
Sie wollen mehr Qualität und mehr Erfolg mit Ihren Produkten erzielen? Sie brauchen 100%ige Dichtungen und multifunktionale Konstruktionsteile? Dann sind Sie bei SPÄH richtig. Wir kennen uns aus mit Elastomer- und Kunststofftechnologien und produzieren Dichtungen und mehr: Stanz-, Isolier- und Präzisionsteile in Serie oder Sonderanfertigung. Wir halten immer dicht. Schnell, zuverlässig, just in time.

www.spaeh.de





» 3 Gemittelte Reibungszahlen und Verschleißraten der verschiedenen Werkstoffe in feuchtem Stickstoff mit ca. 96% relativer Feuchte



» 4 Gemittelte Reibungszahlen und Verschleißraten der verschiedenen Werkstoffe nach Trockenlauf in Stickstoff mit ca. 2% relativer Feuchte

deutlich geringere Reibzahl resultiert dagegen durch die Diamantbeschichtung im Vergleich zu den monolithischen Keramiken. Die Verschleiß-Ergebnisse, die hier in Materialabtrag pro Jahr (mm/a) dargestellt werden, sind ähnlich. Die meisten Materialien weisen Werte zwischen 1 – 3 mm/a auf, mit Ausnahme der Qualität G, deren Verschleiß infolge der geringeren Reibzahl ebenfalls geringer ist. Tendenziell zeigen Werkstoffe mit einer geringen Korngröße einen etwas geringeren Verschleiß. Als herausragend bezüglich des Verschleißes erweist sich wiederum die Diamantbeschichtung, die auch unter diesen Testbedingungen keinen Materialabtrag erleidet. Nach den Versuchen zeigen die meisten Proben im REM eine raue Oberfläche mit scharfkantigen Ausbrüchen. Die glatteste Oberfläche weist der Werkstoff G auf, der mit einer dunklen, glatten Schicht aus Graphit überzogen ist und auch die Diamantschichten haben sich geglättet.

- 50% relative Feuchte – Die entsprechenden Ergebnisse von Versuchen unter ca. 50% rel. F. waren nicht zuverlässig auszuwerten. Es traten bei verschiedenen Werkstoffen starke Sprünge der Reibungszahl auf, was auf beginnende Mangelschmierungs- und Trockenlaufprobleme deutet, eine Mittelung der Werte würde diese Problematik unterdrücken, so dass davon abgesehen wird.
- 2% relative Feuchte – Eindeutige Ergebnisse resultieren aus den Versuchen mit 2% rel. F. in Stickstoff, die Ergebnisse in Form gemittelter Reibungszahlen und Verschleißraten sind in » 4 zusammengestellt.

Charakteristisch für diese Versuchsbedingungen unter minimaler Feuchtigkeit in Stickstoff-Atmosphäre ist das konstant hohe Niveau der Reibung. Diese Aussage trifft praktisch auf alle Werkstoffe – mit Ausnahme des PKD-beschichteten SiC – zu. Die mittleren Reibungszahlen liegen nahezu werkstoffunabhängig zwischen 0,55 und

0,63 und sind reproduzierbar. Insbesondere ist festzustellen, dass der graphithaltige Werkstoff G keine signifikant niedrigeren Reibungszahlen aufweist, der Graphit im Gefüge führt unter diesen Versuchsbedingungen nicht zu reibmindernden Effekten. Bei der porenhaltigen Qualität P treten starke, diskontinuierliche Reibungszahlabsenkungen auf, die in dieser Mittelwertdarstellung unterdrückt werden, jedoch auf einen Poreneffekt hinweisen. Offensichtlich ist dagegen der reibmindernde Effekt der Diamantbeschichtung, die über den zeitlichen Verlauf des Versuches auch zu einer nur geringen Temperaturentwicklung in der Reibpaarung führte. Der eingelagerte Graphit besitzt unter diesen Prüfbedingungen weder eine selbstschmierende noch eine verschleißmindernde Wirkung.

Im Gegensatz zu den monolithischen Keramiken verbessert sich die Oberflächenqualität der Diamantbeschichtung unter diesen Versuchsbedingungen von einem Ra-Wert von 0,076 µm im Neuzustand auf 0,066 µm nach 2h Trockenlauf.

Die Versuchsbedingungen mit Stickstoff von < 2% Restfeuchte stellen somit für alle monolithischen Varianten eine sehr hohe tribologische Belastung dar, verbunden mit hohen linearen Verschleißraten und Zunahmen der Oberflächenrauheit. Diese SiC-Werkstoffe sind somit, im Gegensatz zu den PKD-beschichteten SiC-Proben, als nicht dauerhaft trockenlauffähig anzusehen.

Reibung und Verschleiß von Tribopaarungen mit und ohne PKD-Beschichtung

Um zu klären, ob die mittels PKD-Beschichtung erzielten sehr positiven Ergebnisse auch erhalten werden, wenn nur ein Reibpartner mit PKD beschichtet ist, wurden mittels des Gleitverschleiß-Tribometers entsprechende Versuche mit einer PKD-beschichteten SSiC-Scheibe und einem unbeschichteten SSiC-Ring sowohl bei 96% als auch 2% relativer Feuchte in N₂ ausgeführt. Diese Versuche sind auch unter dem

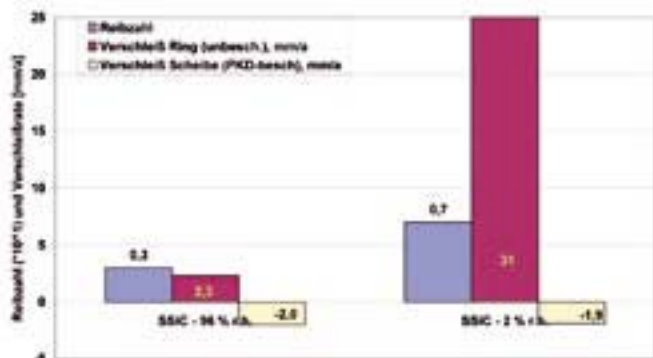
Aspekt interessant, dass eine PKD-Beschichtung kein kostengünstiges Verfahren ist. Wären entsprechend günstige Ergebnisse mit der Beschichtung nur eines Reibpartners erzielbar, so könnten 50% der Kosten eingespart werden. Die hierbei – unter den gleichen wie vorab beschriebenen Bedingungen – erzielten Ergebnisse sind in » 5 zusammengestellt.

Es zeigt sich hierbei, dass die unter 96% relativer Feuchte erzielten Ergebnisse in etwa vergleichbar sind mit Reibpaarungen, bei denen beide Partner PKD-beschichtet waren » 4. Gemittelte Reibungszahlen und Verschleißraten von SSiC-Paarungen mit und ohne PKD-Beschichtung bei unterschiedlicher Feuchte zeigen, dass die Feuchtigkeit offenbar für eine gewisse Schmierung ausreicht. Unterschiedlich dazu ist jedoch, dass die PKD-beschichtete SSiC-Scheibe in diesem Versuch eine Gewichtszunahme zeigt.

Unter 2% relativer Feuchte steigt die Reibzahl deutlich an und der Verschleiß des unbeschichteten Rings nimmt drastisch zu, während die PKD-beschichtete SSiC-Scheibe wiederum eine Gewichtszunahme aufweist. Dies zeigt, dass die PKD-beschichtete Scheibe in diesem Fall wie eine verschleißfeste Schleifscheibe wirkt und vom unbeschichteten Ring massiv Material abträgt. Hierbei kommt es zum Materialauftrag auf die relativ raue PKD-beschichtete Scheibe, wie entsprechende REM-Analysen » 6 zeigen. Somit ist die Kombination eines PKD-beschichteten mit einem unbeschichteten Reibpartner keine Lösung der Trockenlaufproblematik von SiC-Paarungen.

Fazit

Das günstige Reibungs- und Verschleißverhalten verschiedener keramischer Werkstoffe, insbesondere von speziellen SiC-Varianten, hängt in gewissem Maße von der Gefügebeschaffenheit ab. Dies gilt aber nur so lange, wie eine ausreichende Feuchtigkeit vorhanden ist. Unter echten Trockenlaufbedingungen in Stickstoff mit nur 2% Feuchtigkeit treten dagegen durchweg hohe




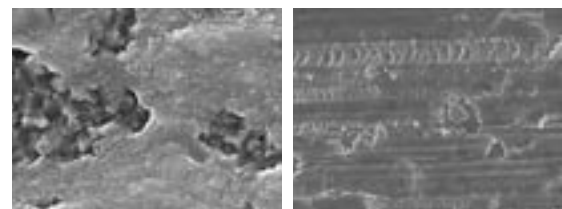
» 5 Gemittelte Reibungszahlen und Verschleißraten von SSiC-Paarungen mit und ohne PKD-Beschichtung bei unterschiedlicher Feuchte

Reibung, Verschleiß und Temperaturanstiege auf, so dass diese Systeme nicht für längere Zeit zuverlässig trockenlauffähig sind. Entsprechende Tests mit SiC-Paarungen, die mit polykristallinem Diamant (PKD) beschichtet wurden, erwiesen sich dagegen als trockenlauffähig. Zumindest während der Versuchslaufzeit kam es nur zu einem geringen Anstieg der Reibzahl und der Temperatur und es trat ein kaum nachweisbarer Verschleiß auf. Das Lebensdauerlimit der Diamantschicht wurde während der Versuchslaufzeit bei weitem nicht erreicht.

Versuche, mit nur einem PKD beschichteten Reibpartner das Trockenlaufverhalten zu verbessern, erwiesen sich dagegen als absolut ungeeignet. Die harte und grobe PKD-Schicht wirkt in diesem Fall wie eine Schleifscheibe und führt zu extrem hohem Verschleiß beim unbeschichteten Reibpartner.

Somit bieten PKD-beschichtete SSiC-Reibpaare erstmals eine Perspektive für eine zuverlässige Lösung der Mangelschmierungs- und Trockenlauf-Problematik derartiger Tribosysteme, ohne Veränderung der ansonsten bewährten Eigenschaften wie hoher Korrosionsbeständigkeit etc. Die beschriebenen Ergebnisse beruhen natürlich auf Laboruntersuchungen, die nur annähernd den Bedingungen in praktischen Einsätzen entsprechen. Erste Ergebnisse von technischen Anwendungen zeigen jedoch, dass sich diese Beschichtungen auch unter derartigen, deutlich härteren Bedingungen bewähren.

 FCT Hartbearbeitungs GmbH
www.fct-keramik.de
 von Dr.-Ing. G. Wötting, Leiter Entwicklung und W. Martin, Geschäftsführer



» 6 REM-Aufnahmen der Gleitflächen der PKD-beschichteten SSiC-Scheibe (links) und des unbeschichteten SSiC-Rings (rechts) nach dem Gleitverschleißtest unter 2% rel. F.; Materialtransfer auf die Scheibe und starker Verschleiß des Rings

FAKTEN FÜR KONSTRUKTEURE

- PKD-beschichtete SSiC-Reibpaare bieten erstmals eine Perspektive für eine zuverlässige Lösung der Mangelschmierungs- und Trockenlauf-Problematik von Tribosystemen, ohne Veränderung der ansonsten bewährten Eigenschaften wie hoher Korrosionsbeständigkeit etc.

FAKTEN FÜR QUALITÄTSMANAGER

- Hohe Lebensdauer für PKD-beschichtete SSiC-Reibpaare

Anm.: Teile dieser Ergebnisse wurden schon in Dichtungstechnik H2/2006 veröffentlicht

Intelligente High Performance Elastomere



Hochwertige, dauerhafte Dichtungen
 aus FFKM, FKM, CSM, H-NBR

- Profile, Rundschnüre, Platten
- Laborschläuche
- Rund- Profilschnurringe
- FKM-Moosgummi-Schnüre und Platten
- FFKM/Perfluorelastomer O-Ringe, auch FDA
- FKM high and low temperature Typen

Best Quality
 Jürgen Riesch · Kautschuktechnologie GmbH




Damaschkestraße 20 · D-31275 Lehrte/Germany
 Tel.: +49 (0)5132/78 52 · Fax: +49 (0)5132/86 69 27
www.gummi-riesch.de · e-mail: Riesch@t-online.de



Rubber-Products

Bessere Effizienz durch:

- Materialeinsparung
- Hohe Produktivität
- Bessere Schnittqualität
- Auto-Nesting Software
- Visuelle Projektion



Cutting technologies

ATOM-MB  

Stanz- und Schneidesysteme GmbH

Im Tälchen 12a, D-66976 Rodalben, Telefon +49 (0)6331 8007-0, Fax +49 (0)6331 8007-28
 E-Mail: info@atom-mb.de, www.atom.it