Sonderdruck / Offprint

aus / from MTZ 02|2019 Springer Vieweg Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Reibungsminderung im Kolbensystem von Nutzfahrzeug-Dieselmotoren

Friction Reduction in Power Cylinder Systems of Commercial Vehicle Engines

Aufgrund der US-Emissionsgesetzgebung zum Ausstoß von Treibhausgasen ab 2021 und 2024 sowie den Vorschlägen zur Einführung einer Euro-VII-Norm steigt für Hersteller von Nutzfahrzeug-Dieselmotoren der Druck zur CO_2 -Reduzierung. Die Effizienz der Motoren muss steigen, und die mechanischen Systeme sollen durch Reibungsminderung dazu beitragen. Neue Getriebeauslegungen zum Downspeeding des Motors erschweren diese Aufgabe. Das Kolbensystem – aus Kolben, Kolbenringen und Zylinderlaufbahn – nimmt in Bezug auf Verschleißbeständigkeit und Reibungsreduzierung eine zentrale Rolle ein.

AUSGANGSLAGE

Das Ziel zur Reduzierung der Reibung führt direkt zum Kolbensystem (Power Cylinder System, PCS), das einen signifikanten Anteil der mechanischen Verluste im Grundmotor erzeugt. Auch wenn diese Systeme bereits niedrige Reibungsverluste aufweisen, ist eine weitere tribologische Optimierung möglich. Die Ring-Zylinder-Reibung wird durch beschichtete Kolbenringe mit einer diamantartigen Kohlenstoffschicht (Diamond Like Carbon, DLC) in Verbindung mit einer glatten Zylinderoberfläche reduziert. Ein kompakter Kolben mit optimiertem Schaftkontakt und einer reibungsarmen Schaftbeschichtung verringert die Kolbenreibung. Das System erreicht ein Potenzial zur Reibungsminderung von bis zu 37 %. Neben der numerischen Optimierung wird als Neuheit die Reibkraft an einem Einzylinder-Dieselmotor nach dem Floating-Liner-Prinzip gemessen. Der Messmotor basiert auf einem 13-l-Motor mit einer spezifischen Leistung von 30 kW/l. Die Erprobung bezüglich Blow-by und Ölverbrauch erfolgt im Vollmotor.

AUSLEGUNG KOLBEN

Im Hinblick auf reduzierte Reibleistung in Nutzfahrzeugmotoren bietet KS Kolbenschmidt maßgeschneiderte Kolbenausführungen an, um verschiedene Kundenforderungen zu realisieren. Im vorliegenden Fall kommt das Weldteks-Design mit verkürzter Kompressionshöhe zur Reibungsminderung zum Einsatz. Die geringere Höhe verringert das Gewicht des Kolbens, hat einen positiven Einfluss auf die Seitenkräfte und reduziert im Zusammenspiel mit einem verlängerten Pleuel die Reibleistung im Motor. Durch das kleinere, reibleistungsoptimierte Ringpaket ist es möglich, die Abmessungen des Ringfelds kompakt zu ge stalten, TABELLE 1.

Die Optimierung des Kolbendesigns erfolgt durch numerische Simulation, was zu ausgewogenen Deformationen am Kolben im motorischen Betrieb führt, die wiederum reduzierte Reibung im Vergleich zu einem konventionellen Design zur Folge haben. Des Weiteren wird das Schaftprofil numerisch auf geringste Kontaktdrücke und Reibung optimiert. Das moderne numerische Optimierungstool erlaubt die Sicherstellung der erforderlichen Dauerfestigkeit des Kolbendesigns und vermeidet wiederholte Konstruktionsschleifen.

Im Vergleich zu dem Serienkolben ist es mit dem Weldteks-Kolben möglich, die Kompressionshöhe um 17 mm zu verringern, wodurch sich eine Gewichtsreduzierung von 23 % ergibt. Der Gewichtsvorteil des Kolbens lässt sich durch eine Reduzierung der Motorblock-Höhe um 17 mm weiter ausbauen.

REIBUNGSSIMULATION KOLBEN

Bei modernen Nutzfahrzeugmotoren erhöht der Trend zum Downspeeding die Anforderungen bei der Auslegung von reibungsminimierten Kolben durch Finite-Elemente(FE)-Simulation. Um auch bei niedrigen Drehzahlen einen vollständigen hydrodynamischen Druckaufbau am Kolbenschaft sicherzustellen, muss die Kolbenfeinkontur sorgfältig auf das Kolbenkonzept abgestimmt werden. In Verbindung mit den Verformungen durch die mechanische und thermische Belastung bestimmt die Bearbeitungskontur die Ölfilmverteilung im Kontaktbereich zwischen Kolben und Zylinder. Eingebunden in einen Mehrkörpersystem-Algorithmus berücksichtigt das elasto-hydrodynamische Kontaktmodell die Axialbewegung des Kolbens im Zylinder sowie die kurbelwinkelabhängige Belastung durch Gas- und Massenkräfte. Ergänzend zu diesen Effekten erfasst die Berechnung der Reibungsverluste den Einfluss der Oberflächenrauheiten beim Übergang in Mischreibungszustände.

Für den verbrauchsrelevanten Stra-



AUTOREN

Wolfgang Hanke ist Technischer Senior Referent Kolbensysteme bei der KS Kolbenschmidt GmbH in Neckarsulm.



Dr. Naoki lijima ist Senior Engineer Functional Analysis bei der Riken Corporation in Kashiwazaki (Japan).



Jochen Müller ist Leiter Bereich Entwicklung & Technologie bei der KS Kolbenschmidt GmbH in Neckarsulm.



Dr. Marco Voigt ist Technischer Referent Simulation bei der KS Kolbenschmidt GmbH in Neckarsulm.



TABELLE 1 Kolbendesign für ein LF PCS, Modelljahr 2021 (© Kolbenschmidt)

ßenbetrieb bei 1025/min und 100 kW Leitung wird der deutliche Reibungsvorteil mit dem reibungsarmen (Low Friction, LF) Kolben in **BILD 1** veranschaulicht. Der verbesserte hydrodynamische Druckaufbau führt zu einem Anstieg der Ölfilmdicke im Arbeitstakt zwischen 360 und 540 °KW. In Verbindung mit der kleineren ölbenetzten Schaftfläche sinkt der kumulierte Reibmitteldruck von 3,1 kPa für den Serienkolben auf 2,0 kPa für den LF-Kolben, das heißt um 35 %. Bei Nennleistung hat der Gesamtvorteil mit dem LF-Kolbenkonzept die gleiche Größenordnung, entsteht aber überwiegend durch eine Absenkung der Mischreibungsverluste im Arbeitstakt bei hoher Seitenkraftbelastung. Die simulierte Kraftstoffeinsparung liegt für unterschiedliche Betriebsbedingungen im Bereich 0,11 bis 0,20 %. Hiermit besteht eine gute Übereineinstimmung zu dem beim OEM gemessenen Wert von 0,15 % in einem typischen Nfz-Fahrzyklus.

AUSLEGUNG KOLBENRINGE

Mit dem Ziel Reibung an der Lauffläche zu reduzieren, wird das reibungsarme LF-Ringpaket unter Nutzung reduzierter Ringhöhen, niedriger Tangentialkräfte und DLC-Beschichtung [1, 2] ausgelegt, TABELLE 2. Im Vergleich zur Serie weist das LF-Ringpaket mit $h_1 = 2,5$ und 2,0 mm niedrigere Ringhöhen am Top-Ring und dem zweiten Ring auf, was jeweils zu geringerer Gaskraft am Innendurchmesser des Rings und zu einer kleineren Kontaktfläche am Zylinder führt. Die Ringhöhe des Ölabstreifrings ist unverändert, allerdings ist die wirksame Kontaktfläche durch die konisch gestalteten Stege deutlich verringert. Dadurch wird die wirksame Fläche für die Ölscherung kleiner und die hydrodynamische Reibkraft reduziert.

Für das gesamte reibungsarme Ringpaket sinkt die Tangentialkraft um 33 %, wodurch sich die Ringreibung reduziert. Wie in Abschnitt Erprobungsergebnisse Kolbensystem ausgeführt, wird das Risiko eines Ölverbrauchsanstiegs durch zu niedrige Ringspannung erfolgreich im Vollmotor abgesichert. Insgesamt wird durch die kleineren Ringquerschnitte auch das Formfüllvermögen der Kolbenringe positiv beeinflusst.



BILD 1 Ölfilmverteilung und Reibmitteldruck für Serie und LF-Stahlkolben bei Straßenbetrieb (© Kolbenschmidt)

-	-	Serie	Low Friction
Top-Ring	Querschnitt		
	Ringtyp	KBA IF	KBA IF
	$h_1 \times a_1$ [mm]	3,0 × 4,7	2,5 × 4,3
	Stoßspiel (s1) [mm]	0,37	0,35
	Tangentialkraft (F_t) [N]	30,9	16,5
	Material	Stahl	Stahl
	Laufflächenbeschichtung	Chrom-Diamant, gekammert	nitriert + DLC
Zweiter Ring	Querschnitt		
	Ringtyp	M IFU	MIFU
	$h_1 \times a_1 \text{ [mm]}$	2,5 × 4,7	2,0 × 4,1
	Stoßspiel (s1) [mm]	1,1	1,1
	Tangentialkraft (F_t) [N]	19,6	14,0
	Material	Guss	Stahl
	Laufflächenbeschichtung	nitriert	nitriert
Dritter Ring	Querschnitt	S.	
	Ringtyp	DSF	SOR
	$h_1 \times a_1$ [mm]	3,0 × 2,95	3,0 × 2,5
	Stoßspiel (s1) [mm]	0,5	0,45
	Tangentialkraft (F _t) [N]	32,5	25,0
	Material	Guss	Stahl
	Laufflächenbeschichtung	Chrom-Diamant	DLC

TABELLE 2 Design Kolbenringe (© Kolbenschmidt)

Die Lauffläche von Topring und Ölabstreifring ist mit einer DLC-Schicht bewehrt. Aufgrund des niedrigen Reibkoeffizienten der DLC-Schicht sinkt die Reibkraft in der Mischreibung. Durch die hohe Verschleißbeständigkeit der DLC-Beschichtung behalten die Kolbenringe deutlich länger ihr ursprüngliches Laufflächenprofil als die chrombasierte Serienlösung. Mit der laufzeitstabilen Kontur bleibt der Vorteil der niedrigen Ringreibung auch über lange Laufzeiten erhalten. Das LF-Ringpaket erfüllt somit die Anforderungen von modernen Nutzfahrzeug-Dieselmotoren in Bezug auf Robustheit und Verschleißbeständigkeit.

AUSLEGUNG ZYLINDEROBERFLÄCHE

Die Kombination glatt gestalteter Reibpartner aus Kolbenringen mit reibungsgünstiger Beschichtung und Zylinderoberfläche für niedrige Ring-Zylinder-Reibung ist von der Anwendung in Ottomotoren [3] bekannt. Für die Anwendung in Nutzfahrzeug-Dieselmotoren ist zusätzlich eine hohe Fress- und Verschleißbeständigkeit erforderlich, des Weiteren kann Korrosionsbeständigkeit von Vorteil sein. Die thermische Spritzschicht von Kolbenschmidt mit einem eisenbasierenden Draht erfüllt diese Anforderungen: Die optimierte gleichmäßige Porenverteilung sorgt durch Ölhaltevolumina für niedrigen Verschleiß, Hartphasen und Legierungselemente reflektieren die

zusätzlichen Anforderungen hinsichtlich Verschleißbeständigkeit und Korrosion. Eine spiegelgehonte Oberfläche mindert den Reibkoeffizienten. Präferierte Laufpartner sind DLC-beschichtete Kolbenringe, die nicht mit den Legierungsbestandteilen mit der applizierten Rotating-Single-Wire-Beschichtung (RSW) auf der Zylinderoberfläche interagieren.

BILD 2 zeigt eine Weißlicht-Interferrometrie-Aufnahme der RSW-Zylinderoberfläche, die erfolgreich bezüglich Ölverbrauch, Dauerhaltbarkeit und Reibungsminderung gemeinsam mit dem LF-Ringpaket aus **TABELLE 2** erprobt wurde.

REIBUNGSSIMULATION KOLBENRINGE

Vorbereitend mussten für die Simulation Randbedingungen für die neue Reibpaarung DLC-beschichtete Ringe und spiegelgehonte RSW-Beschichtung erarbeitet werden. Für die Reibkoeffizienten wurden Stribeck-Kurven auf einem Ring-Zylinder-Tribometer gefahren und ausgewertet, für die Mikrohydrodynamik wurden Flussfaktoren aus den Weißlicht-Interferrometrieanalysen der Oberflächen simuliert. Für die Reibungssimulation wurde eine weiterentwickelte Version von Kori3D verwendet.

Die Simulationsergebnisse der Reibungsreduktion des LF-Ringpakets im Vergleich zur Serie sind in **BILD 3** dargestellt. Bei einem repräsentativen Straßenbetriebspunkt und der derzeitigen Getriebeauslegung reduziert sich die Ringreibung um 21,8 %, bei der





BILD 2 Zylinderoberfläche: RSW-Beschichtung mit Spiegelhonung © Kolbenschmidt)

künftigen Getriebeübersetzung für Downspeeding um 26,8 %. Bei Nennleistung nimmt die Ringreibung um 28,6 % beziehungsweise 37,6 % ab. Die Reibungsreduzierung unter den betrachteten Betriebsbedingungen ist hauptsächlich auf geringere Mischreibung beim LF-Ringpaket zurückzuführen. Einflussfaktoren sind die kleineren Tangentialkräfte des reibungsarmen Ringsatzes und der niedrigere Reibkoeffizient in der Paarung DLC-Schicht und RSW-Beschichtung. Zusätzlich mindert die geringe Rauheit des RSW-Zylinders deutlich den Festkörperkontakt bei Relativbewegung.

Tendenziell erhöht sich die hydrodynamische Reibung zwischen LF-Ringpaket und RSW-Zylinder, da die niedrige Rauheit der glatten RSW-Oberfläche einen dünneren Schmierfilm zwischen Ring und Zylinder zur Folge hat. Die Reduzierung der benetzten Kontaktfläche des LF-Ringsatzes allerdings kompensiert den Nachteil der hydrodynamischen Reibung wieder.

ERPROBUNGSERGEBNISSE KOLBENSYSTEM

Die Funktionserprobung des reibungsarmen Kolbensystems (LF PCS), bestehend aus Weldteks-Kolben, DLCbeschichteten LF-Kolbenringen und RSW-Zylinder, erfolgte in einem Nutzfahrzeug-Dieselmotor des Modelljahrs 2015. Zum Ausgleich der kürzeren Kompressionshöhe des Kolbens wurde ein längeres Pleuel verwendet. **BILD 4** zeigt







BILD 5 Reibkraftmessung im Floating Liner bei 1000/min und 90 bar (© Kolbenschmidt)

Ölverbrauch und Blow-by mit gemeinsamer Grenzwertlinie für das LF PCS und die Serienausführung. Beide Ausführungen sind gut im Ölverbrauch, die Durchblasemenge der Serienbestückung wurde deutlich durch das LF PCS verbessert.

Für die Messung der Reibkräfte des Kolbensystems steht bei Kolbenschmidt ein Einzylinder- Dieselmotor zur Verfügung, der nach dem Floating-Liner-Prinzip arbeitet. Der Zylinder des Messmotors wird von vier Kraftaufnehmern in axialer Richtung gehalten, die axiale Kraftkomponente des Zylinderdrucks ist am oberen Ende über einen Kompensationseinzug nach Furuhama [3, 4] ausgeglichen. Die Zylinderoberfläche kann mit Wechseleinsätzen in der gewünschten Legierung, Beschichtung und Oberflächenkonfiguration geändert werden. Die Reibkraftverläufe über dem Arbeitsspiel von Serie und LF PCS sind in **BILD 5** im Straßenbetrieb bei 1000/min und 90 bar Spitzendruck dargestellt. Der Vorteil des LF PCS ist in allen Phasen des Arbeitsspiels zu erkennen, besonders ausgeprägt in Kompressions- und Expansionsphase. Hier bewirken die reduzierten Kontaktflächen in Kombination mit den niedrigen Reibkoeffizienten kleinere Reibkräfte, die zu kleinerem Reibmitteldruck p_{mr} führen.

REIBUNG IM KOLBENSYSTEM

Die Komponentenreibung ist als Reibmitteldruck p_{mr} in **BILD 6** für die Betriebsbedingungen Nennleistung und Straßenbetrieb dargestellt. Die beiden linken Säulen stellen die Reibver-

luste für die heutige Getriebeübersetzung bei den Betriebsbedingungen dar, die beiden rechten Säulen jeweils für die Downspeeding-Variante mit einer auf die künftige US-Emissionsgesetzgebung für Treibhausgase für 2021 ausgelegten Getriebeübersetzung. Blau steht für die Kolbenreibung, Rot für die Ring-Zylinder-Reibung. Da die Serienkolben bereits reibungsoptimiert waren. wurde für eine weitere Verbesserung, besonders mit Blick auf Downspeeding, nur eine Optimierung des gesamten Kolbensystems als erfolgversprechend angesehen. Eine reduzierte Kontaktfläche des Kolbenschafts mit Nanofriks-Beschichtung und DLC-beschichtete Kolbenringe werden mit einer sehr glatten Zylinderoberfläche kombiniert. Beide Reibpaarungen reduzieren ihren Reibungsanteil um mindestens 22 %. Das LF PCS weist im Vergleich zur Serie je nach Betriebsbedingung einen deutlich reduzierten Reibmitteldruck auf, um 25 % bei derzeitiger Getriebeauslegung und Straßenbetrieb und um 36 % bei künftiger Getriebeauslegung und Nennleistung. Im Straßenbetrieb liegt der Reibungsvorteil bei mindestens 25 %. Berücksichtigt man das Downspeeding in der Verlustleistungsbilanz, verliert das LF PCS bei Straßenbetrieb nur 148 W im Vergleich zu 234 W für die Serie bei heutiger Getriebeübersetzung, was einem Vorteil von 37 % entspricht. Der LF-Kolben weist hier nur geringfügige Mischreibungsverluste auf.

Um die gleiche Leistungsabgabe bei niedrigerer Motordrehzahl (Downspeeding bei künftiger Getriebeübersetzung) zu erreichen, sind höhere Spitzendrücke im Zylinder nötig. Diese vergrößern den Mischreibungsanteil, wie in den Tortendiagrammen in **BILD 6** zu erkennen. Das LF PCS überkompensiert den Anstieg der Mischreibung im Serien-PCS bei Downspeeding.

Die prognostizierte CO₂-Reduzierung des LF PCS gegenüber der Serie zeigt **BILD 7**: Bei Nennleistung beträgt der CO₂-Vorteil 0,27 % und 0,40 %, bei Straßenbetrieb 0,33 % und 0,38 %.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Minderung des Kraftstoffverbrauchs durch Verbesserung des Reibverhaltens des Kolbensystems ist eine Herausforderung, besonders unter Berücksichtigung des Downspeedings künftiger







BILD 7 CO₂-Reduzierung durch LF PCS (© Kolbenschmidt)

Motorauslegungen. Der Schlüssel zum Erfolg sind der Systemansatz und die Nutzung der effektivsten Maßnahmen zur Reibungsminderung unter Verwendung zeitgemäßer Simulationsmethoden zur Optimierung und Synthese des Systems.

Kolbenschmidt und Riken haben trotz Downspeeding mit einer reibungsoptimierten Kolben- und Ringauslegung und durch Nutzung neuester reibungsmindernder Beschichtungen an Kolbenschaft (Nanofriks), Ringlauffläche (Riken DLC) und Zylinderoberfläche (spiegelgehontes RSW) einen Reibungsvorteil von 37 % erreicht. Die Reibungsminderung im Motorbetrieb wurde mit einem hauseigenen Einzylinder-Messmotor für Nutzfahrzeuge belegt, der nach dem Floating-Liner-Prinzip arbeitet. Erprobungen im Vollmotor haben ein gutes Ergebnis bezüglich Ölverbrauch und Blow-by nachgewiesen.

LITERATURHINWEISE

 Iijima, N.; Susuda, M.; Iwata, Y.;
 Usui, M.; Utashiro, K.: Effect of Peripheral Configuration of Piston Rings for Friction Force and Oil Consumption. In: JSAE paper 20145343, 2014
 Higuchi, T.; Mabuchi, Y.; Ichihara, H.;

[2] Higuchi, I.; Mabuchi, Y.; Ichinara, H.; Murata, T.; Moronuki, M.: Development of Hydrogen Free DLC Coating for Piston Ring: In: JSAE paper 20115707, 2011
[3] Hanke, W.; Fahr, M.; Rehl, A.; Voigt, M.; Ando, H.: Friction Reduction in Power Cylinder Systems for Downsize Gasoline Engines with Modern Surface Technologies of Aluminum Crankcases. In: SAE 2012-01-1332, 2012
[4] Hanke, W.; Ando, H.; Fahr, M.; Voigt, M.: Reibungsreduzierung im Kolbensystem bei Pkw-Dieselmotoren. In: MTZ 75 (2014), Nr. 2, S. 44-51

DANKE

Wir danken Ingo Roth für die Unterstützung durch die Entwicklungsabteilung Kolbensysteme HD & MIR und seinen Beitrag zu dieser Veröffentlichung, Kenichi Utashiro für die Reibungsoptimierung des LF-Ringpakets, Dr. Serkan Demiray für die Reibungssimulation und Jochen Schumacher für die Messungen am Floating-Liner-Motor.

Friction Reduction in Power Cylinder Systems of Commercial Vehicle Engines

Due to US emissions legislation on greenhouse gas emissions for 2021 and 2024 and proposals for inventing a Euro-VII standard, the pressure on commercial vehicle engine manufacturers to reduce CO_2 emissions is increasing significantly. The efficiency of the engines has to be improved and the mechanical systems are addressed to reduce the related frictional losses. The trend toward new gear ratios for downspeeding of the engines makes this more difficult. The power cylinder system – consisting of piston rings, pistons and cylinder surface – plays a central role in terms of wear resistance and friction reduction.

© Kolbenschmidt

STARTING POINT

The target of friction reduction leads directly to the Power Cylinder System (PCS), which accounts for a significant amount of friction in the base engine. Even if these systems are already low in frictional losses, a further tribological optimization in regard to lower friction is possible. Diamond-like Carbon (DLC) ring coatings in combination with a smooth cylinder surface reduce the ring to cylinder friction. A compact piston with optimized skirt to cylinder contact and low friction skirt coating lowers piston friction. The system shows a friction reduction potential of up to 37 %. As a novelty for a commercial vehicle diesel engine, friction forces are analyzed using a single-cylinder research engine with floating liner principle based on a heavy duty 13-l engine with a specific power of 30 kW/l. Tests on blow-by and oil consumption are conducted on the complete engine.

PISTON DESIGN

For reduced friction losses in truck applications, KS Kolbenschmidt is able to offer tailor-made piston designs in order to address different customer needs. In this case the Weldteks design was used with a shortened compression height and friction optimized design. The reduced height results in a lower piston weight, has a positive impact on the skirt loads and leads to less friction losses when combined with a longer conrod. The smaller dimensions of the low friction ring pack enable the design of a compact ring zone, **TABLE 1**.

The optimization of the piston design was carried out by numerical simulation, which leads to balanced deformations of the piston during engine operation, which in turn leads to reduced friction compared to a conventional design. In addition, the skirt profile was numerically optimized for minimum contact pressure and friction. Furthermore this modern simulation tool leads to a design with reliable fatigue factors without having to go through many design iterations.

In comparison to the series production piston it was possible to decrease the compression height by 17 mm using the Weldteks design, which leads to a weight reduction of 23 %. The weight advantage from the low friction piston can be improved further by reducing the engine block height by the same 17 mm.

PISTON FRICTION SIMULATION

The trend of modern commercial vehicle engines toward downspeeding increases the requirements in the low friction layout of pistons by Finite Element (FE) simulation. To ensure a robust hydrodynamic pressure build-up at the piston skirt even at low engine speeds

the piston profile must be carefully adjusted to the design. In conjunction with the deformations due to mechanical and thermal load the machining shape of the piston skirt determines the oil film distribution at the interface between piston and cylinder. Integrated into a superior multibody system the elasto-hydrodynamic contact model considers the axial motion of the piston relative to the cylinder and the crank angle-related loading by gas and mass forces. In addition to these effects the computation of the frictional power loss takes into account the roughness characteristics for the transition into mixed lubrication.

For the fuel consumption-relevant road load condition at 1025 rpm and 100 kW power the significant friction advantage of the Low Friction (LF) piston is illustrated in **FIGURE 1**. The improved hydrodynamic pressure build-up leads to an increase of the oil film thickness in the power stroke



AUTHORS

Wolfgang Hanke is Senior Technical Specialist Piston Systems at KS Kolbenschmidt GmbH in Neckarsulm (Germany).



Dr. Naoki lijima is Senior Engineer Functional Analysis at Riken Corporation in Kashiwazaki (Japan).



Jochen Müller

is Vice President Development & Technology at KS Kolbenschmidt GmbH in Neckarsulm (Germany).



Dr. Marco Voigt is Technical Officer Simulation KS Kolbenschmidt GmbH in Neckarsulm (Germany).



TABLE 1 Piston design for LF PCS model year 2021 (© Kolbenschmidt)

between 360 and 540 °CA. In connection with the minimized area of the oil-wetted piston skirt the accumulated frictional mean effective pressure decreases from 3.1 kPa for the serial piston to 2.0 kPa for the LF piston, that is by 35 %. At nominal rate conditions the overall advantage with the LF piston design is of the same order of magnitude but is mainly caused by a lowering of boundary friction in power cycles with large lateral force loads. The simulated reduction of the brake-specific fuel consumption is in the range of 0.11 to 0.20 % for several load conditions. This is in good correlation to the value of 0.15 % in a typical commercial vehicle driving cycle measured by an OEM.

RING DESIGN

In order to reduce ring friction force in the outer periphery, the LF ring package was designed with a reduced axial width, lower tangential tension and DLC coating [1, 2], **TABLE 2**. In relation to series, the LF ring set has lower widths of top and second ring, h1 = 2.5 and 2.0 mm. The load on the ring back side and the sliding surface are smaller having a smaller ring width. The height of the oil control ring is unchanged, but the effective contact surface is reduced by the conically designed ring lands. Therefore, the area for oil shear stress is smaller, and the hydrodynamic friction force is reduced.

When ring tension is lower, the ring friction is reduced. In this low friction ring package, the total ring tangential tension is reduced by 33 %. As a consequence of lower ring tension, increased oil consumption is a risk, however the LF ring package was successfully tested in the engine (see section Engine Test Results Piston Cylinder System). Furthermore, the ring conformability for cylinder bore distortion is better having a smaller ring cross section.

A DLC coating was applied to the running surface of top ring and oil control ring. The friction coefficient of the DLC coating is lower, and the friction force is reduced in boundary lubrication condition. Furthermore, the wear resistance of the DLC coating is better than the series surface solutions (chromium-based). The ring profile remains unchanged for a long running time, and so lower ring friction is ensured over its lifetime. The LF ring



FIGURE 1 Oil film distribution and FMEP for Series and LF steel piston at road load conditions (© Kolbenschmidt)

-	-	Series	LF
Top ring	Cross section		
	Ring type	KBA IF	KBA IF
	$h_1 \times a_1$ [mm]	3.0 × 4.7	2.5 × 4.3
	Gap (s ₁) [mm]	0.37	0.35
	Tangential tension (F_t) [N]	30.9	16.5
	Material	Stainless steel	Stainless steel
	OD surface treatment	Inlaid chrome diamond	Nitriding + DLC
Second ring	Cross section		
	Ring type	M IFU	M IFU
	$h_1 \times a_1$ [mm]	2.5 × 4.7	2.0 × 4.1
	Gap (s ₁) [mm]	1.1	1.1
	Tangential tension (F_t) [N]	19.6	14.0
	Material	Cast iron	Stainless steel
	OD surface treatment	Nitriding	Nitriding
Third ring	Cross section	Š	
	Ring type	DSF	SOR
	$h_1 \times a_1$ [mm]	3.0 × 2.95	3.0 × 2.5
	Gap (s ₁) [mm]	0.5	0.45
	Tangential tension (F _t) [N]	32.5	25.0
	Material	Cast iron	Carbon steel
	OD surface treatment	Chrome diamond	DLC

TABLE 2 Piston ring design (© Kolbenschmidt)

package fulfills the robustness and wear resistance requirements for a modern truck engine.

CYLINDER SURFACE FINISH

A smooth interface combination of piston rings with low friction coating and cylinder surface enables low ring to cylinder friction as known from serial applications in gasoline engines [3]. The application in commercial vehicle diesel engines requires in addition a high resistance to scuff and wear; furthermore corrosion resistance would be beneficial. Kolbenschmidt's steel-based wire spray coating technology fulfills these requirements: Pores are distributed evenly over the liner surface, serving as oil retention volumes for lubrication. Optional hard phases and alloy elements in the coating enable high wear and corrosion resistance. The cylinder is honed to a very smooth mirror-like surface to achieve the lowest friction coefficients. Preferred interface partners are DLC-coated rings, which do not interact with the alloy compositions of the applied Rotating Single Wire (RSW) spray coating of the cylinder. FIGURE 2 shows a white light interferometry image of the liner surface, which was successfully tested for oil consumption, durability and friction reduction with the LF ring set from TABLE 2.

RING FRICTION SIMULATION

Prior to simulation, boundary conditions for the new interface of DLC-coated rings and the smooth RSW cylinder surface had to be generated. For the friction coefficients, Stribeck curves were evaluated from a ring-cylinder tribotester; for the micro-hydrodynamics, flow factors were simulated from a white light interferometry surface characterization. For the friction simulation a modified version of Kori3D was used.

The simulation results on friction reduction of the LF ring package in relation to series are displayed in FIGURE 3. In a representative road load engine operating condition, the ring friction is reduced by 21.8 % for serial operation and 26.8 % at future gear ratio for downspeeding operation. For rated power, friction is reduced by 28.6 %, respectively 37.6 %. The lower friction in these operating conditions is mainly achieved by the reduction of boundary friction in the LF ring package. Factors are the reduced ring tension of the LF ring package and the lower friction coefficient of the interface DLC coating to the smooth RSW surface. Furthermore the smooth liner surface strongly reduces the asperity contact at relative motion.

The low roughness of the smooth RSW liner surface reduces the oil film



FIGURE 3 Ring friction at rated power and road load conditions (© Kolbenschmidt)



FIGURE 2 Cylinder surface finish: RSW spray coating with mirror hone (© Kolbenschmidt)

thickness between ring and liner, which leads to increased hydrodynamic friction. This is however compensated by the smaller wetted sliding surface of the LF ring package.

ENGINE TEST RESULTS PISTON CYLINDER SYSTEM

The functional analysis of the low friction piston cylinder system (LF PCS) consisting of Weldteks piston, DLC-coated rings and RSW cylinder, was conducted in a commercial vehicle diesel engine, model year 2015. For compensation of the reduced piston compression height, a longer conrod was applied.

FIGURE 4 shows the oil consumption and blow-by of the LF PCS and of the serial configuration, displayed with a common target line. Both configurations are within the oil consumption target, the blow-by of the series configuration was significantly improved by the LF PCS.

For the measurement of PCS friction forces, a single-cylinder diesel engine with floating liner is available at Kolbenschmidt. The cylinder of the measurement engine is supported by four force transducers in axial direction, the related component of the cylinder pressure is balanced by a bottleneck configuration at the upper cylinder end according to the Furuhama principle [3, 4]. The cylinder surface can be exchanged using sleeves with the intended alloy, coating and surface finishing.

FIGURE 5 shows the friction forces of series and LF PCS over the engine cycle



FIGURE 4 Oil consumption and blow-by LF PCS compared to series at series conditions (© Kolbenschmidt)

for road load operation at 1000 rpm and 90 bar peak pressure. The advantage of LF PCS is evident in all phases of the working cycle, especially during compression and expansion. Here the reduced contact surfaces, in combination with the low friction coefficients show a reduced friction force, which results in lower Friction Mean Effective Pressure (FMEP).

FRICTION IN PCS

For rated power and for a representative operation point for road load, the individual friction results are displayed as FMEP in FIGURE 6. The left bars visualize the friction losses for the current gearbox configuration in road operating conditions, the right bars for downspeeding with a revised gearbox adapted to the US emissions regulation for greenhouse gases for 2021. Blue represents the piston friction, red the ring to cylinder friction. The serial piston is already friction-optimized, so a further improvement considering the impact of downspeeding was only possible with a piston system concept optimization. A reduced piston contact area with Nanofriks coating and a DLC coating on the control rings were combined with a very smooth cylinder surface. Each interface friction was reduced by at least 22 % individually. Compared to series, the FMEP of the LF PCS was reduced significantly, by 25 % at the current gear ratio and road load and

36 % at future gear ratio and rated power condition. At road load conditions, the friction advantage is at least 25 %. Changing the focus to total power loss and considering downspeeding, the power loss of the LF PCS reaches 148 W at road load conditions in relation to 234 W for series, which is an improvement of up to 37 % at road load. The boundary friction of the piston was reduced to a marginal level.

To achieve a comparable power output at lower engine speed, higher peak cylinder pressures are needed. This increases the ratio of boundary friction as displayed in the pie charts in **FIGURE 6**. The LF PCS overcompensates the increase of boundary friction of the series PCS for downspeeding.

The predicted CO_2 reduction using LF PCS is shown in **FIGURE 7**: at rated power, the CO_2 advantage is between 0.27 and 0.40 %, at road load operation between 0.33 and 0.38 %.

CONCLUSIONS

Effectively reducing fuel consumption by improved friction behavior of the piston system despite the additional impact of the trend toward downspeeding is a major challenge. The key to success is utilizing the most effective friction reduction measures in a system interface approach and using state-of-the-art simulation tools to combine and optimize the system. Kolbenschmidt and Riken have achieved a 37 % friction reduction despite downspeeding with a frictionoptimized design of piston and ring pack, utilizing the latest low-friction coatings on piston skirt (Nanofriks), ring bearing surface (Riken DLC) and liner (RSW coating, smooth mirror honed). Friction reduction in engine running conditions was proven in measurements in Kolbenschmidt's in-house commercial vehicle single-cylinder floating liner engine. Complete engine testing has also confirmed good oil consumption and blow-by values under operating conditions.



FIGURE 5 Friction force measurement in floating liner at 1000 rpm and 90 bar (© Kolbenschmidt)









REFERENCES

 Iijima, N.; Susuda, M.; Iwata, Y.; Usui, M.; Utashiro, K.: Effect of Peripheral Configuration of Piston Rings for Friction Force and Oil Consumption.
 In: JSAE paper 20145343, 2014
 Higuchi, T.; Mabuchi, Y.; Ichihara, H.; Murata, T.; Moronuki, M.: Development of Hydrogen Free DLC Coating for Piston Ring.
 In: JSAE paper 20115707, 2011 [3] Hanke, W.; Fahr, M.; Rehl, A.; Voigt, M.; Ando, H.: Friction Reduction in Power Cylinder Systems for Downsize Gasoline Engines with Modern Surface Technologies of Aluminum Crankcases.
In: SAE 2012-01-1332, 2012
[4] Hanke, W.; Ando, H.; Fahr, M.; Voigt, M.: Friction Reduction in Power Cylinder Systems for Passenger Car Diesel Engines.
In: MTZworldwide (2014), No. 2, pp. 26-31

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank Mr. Ingo Roth for his piston design department support and his contribution to this article, Mr. Kenichi Utashiro for the friction optimization of the LF ring package, Dr. Serkan Demiray for dynamic simulations and Mr. Jochen Schumacher for the floating liner measurements.