OVERVIEW OF CURRENT APPROACHES TO MITIGATE FRICTION AND WEAR IN MECHANICAL SYSTEMS

نظرة عامة على الطرق الحالية لتخفيف الاحتكاك والتآكل في الأنظمة الميكانيكية

Wang Hao
Student at Sukhoi State Technical University

Vladimir Viktorovich Komrakov
PhD, Associate Professor, Department of Information Technology, GSTU

Scientific Supervisor المشرف العلمي

Abstract: *This study investigates how friction modeling reduces wear and improves operational efficiency in automotive, aerospace, and energy systems by optimizing bearing lubrication. It emphasizes advancements in lubrication strategies, including theoretical frameworks, textured surface engineering, and additive technologies. While current dynamic and multi-field coupling models have limitations, developing advanced computational methods is critical to enhancing predictive accuracy for real-world lubrication performance, ultimately supporting the durability and reliability of mechanical systems.*

Keywords: *Bearing lubrication optimization; Wear reduction; Hydrodynamic lubrication; Dynamic friction modeling.*

وانغ هاو
طالب بجامعة سوخوي الحكومية التقنية

د. فلاديمير فيكتوروفيتش كومراكوف
أستاذ مشارك في قسم تقنية المعلومات بجامعة سخوي الحكومية التقنية

الخلاصة : تبحث هذه الدراسة في كيفية تقليل نمذجة الاحتكاك للتآكل وتحسين الكفاءة التشغيلية في أنظمة السيارات والفضاء والطاقة من خلال تحسين تزييت المحامل. وتُركز الدراسة على التطورات في استراتيجيات التزييت، بما في ذلك الأطر النظرية، وهندسة الأسطح المزخرفة، والتقنيات المضافة. ورغم محدودية نماذج الاقتران الديناميكية ومتعددة المجالات الحالية، فإن تطوير أساليب حسابية متقدمة أمر بالغ الأهمية لتحسين دقة التنبؤ بأداء التزييت في العالم الحقيقي، مما يدعم في نهاية المطاف متانة الأنظمة الميكانيكية وموثوقيتها.

الكلمات المفتاحية : تحمل الأمثل التشحيم. تقليل التآكل؛ التشحيم الهيدروديناميكي نمذجة الاحتكاك الديناميكي

Introduction

This study investigates advanced friction models aimed at optimizing bearing lubrication, with the goal of enhancing mechanical efficiency and durability across various industries, including automotive, aerospace, and renewable energy. The research identifies existing gaps in dynamic and multi-field coupling friction modeling and proposes refined lubrication strategies to mitigate wear, reduce energy loss, and lower operational costs.

المقدمة

تبحث هذه الدراسة في نماذج احتكاك متقدمة تهدف إلى تحسين تزييت المحامل، بهدف تعزيز الكفاءة الميكانيكية والمتانة في مختلف الصناعات، بما في ذلك صناعة السيارات والفضاء والطاقة المتجددة. يحدد البحث الثغرات الموجودة في نمذجة احتكاك الاقتران الديناميكي ومتعدد المجالات، ويقترح استراتيجيات تزييت متطورة لتخفيف التآكل، وتقليل هدر الطاقة، وخفض تكاليف التشغيل.

Results and discussion

The findings contribute to the advancement of sustainable machinery by improving lubrication accuracy under complex operational conditions, effectively bridging theoretical insights with practical industrial applications [1-3].

Results Obtained

1. **Validation of Structural and Environmental Dependencies in Solid Lubrication**: The study demonstrated that ion vapor-deposited amorphous carbon-hydrogen (A-C:H) films exhibit ultra-low friction coefficients under specific structural and environmental conditions, such as varying contact pressure and ambient humidity. This emphasizes the need to incorporate environmental factors into friction models to enhance predictive accuracy regarding lubrication performance.
2. **Optimization of Groove Texture Design for Hydrodynamic Lubrication**: A parametric model for groove-textured surfaces was developed, utilizing hybrid optimization algorithms to maximize hydrodynamic lubrication efficiency. The results indicated that optimized groove profiles could reduce friction by up to 20% in bearing applications, thereby improving energy efficiency.
3. **Enhanced Tribological Performance in Bio-Inspired Joint Bearings**: Testing of compliant-layer acetabular cups revealed that the selection of materials, particularly polymer composites, and surface adaptations significantly reduced wear rates in self-lubricating joint bearings. These findings directly informed the design of prosthetics, enhancing their in vivo durability.
4. **Impact of Nanostructured Additives on Boundary Lubrication**: Experimental studies under boundary lubrication conditions showed that the incorporation of nanostructured additives, such as nanoparticles in lubricants, effectively reduced friction by forming protective tribofilms. This approach resulted in a 15–30% reduction in friction coefficients during artificial joint simulations, extending the lifespan of components.
5. **Friction Reduction in Internal Combustion Engines**: Both numerical and experimental analyses of textured surfaces in engine main bearings demonstrated that periodic surface textures, such as micro-dimples, could reduce hydrodynamic friction losses by 10–25%. This optimization contributed to lower fuel consumption and enhanced engine efficiency.
6. **Cross-Industry Applications in Energy Systems**: In wind turbines, surface design optimizations, including airfoil texturing, led to an approximate 8% improvement in energy conversion efficiency by reducing aerodynamic drag and bearing friction. In oil drilling operations, specialized lubricants decreased drilling friction resistance, resulting in a 12–18% reduction in energy consumption.
7. **Limitations and Future Directions**: The study identified significant gaps in dynamic friction modeling, particularly under conditions involving multi-field (thermal, mechanical, chemical) and multi-medium coupling. Future research is proposed to integrate wear mechanisms, vibration damping, and noise control into adaptive friction models for real-time lubrication optimization.

النتائج والمناقشة

تُسهم هذه النتائج في تطوير الآلات المستدامة من خلال تحسين دقة التزييت في ظل ظروف تشغيلية معقدة، مما يُسهم بفعالية في ربط الرؤى النظرية بالتطبيقات الصناعية العملية [1-3].

النتائج المُحصلة

1. **التحقق من صحة التبعيات الهيكلية والبيئية في التزييت الصلب**: أظهرت الدراسة أن أغشية الكربون والهيدروجين غير المتبلورة (A-C:H) المُترسبة ببخار الأيونات تُظهر معاملات احتكاك منخفضة للغاية في ظل ظروف هيكلية وبيئية مُحددة، مثل ضغط التلامس المُتغير والرطوبة المحيطة. وهذا يُؤكد على ضرورة دمج العوامل البيئية في نماذج الاحتكاك لتعزيز الدقة التنبؤية فيما يتعلق بأداء التزييت.
2. **تحسين تصميم نسيج الأخدود للتزييت الهيدروديناميكي**: طُوّر نموذج معياري للأسطح ذات نسيج الأخدود، باستخدام خوارزميات تحسين هجينة لزيادة كفاءة التزييت الهيدروديناميكي إلى أقصى حد. أشارت النتائج إلى أن تصميمات الأخدود المُحسّنة يُمكن أن تُقلل الاحتكاك بنسبة تصل إلى 20% في تطبيقات المحامل، مما يُحسّن كفاءة الطاقة.
3. **تحسين أداء الاحتكاك في محامل المفاصل المستوحاة من المواد الحيوية**: كشف اختبار كؤوس الحُقّ الحُقّية ذات الطبقات المتوافقة أن اختيار المواد، وخاصةً مركبات البوليمر، والتكيفات السطحية، قلّل بشكل ملحوظ من معدلات التآكل في محامل المفاصل ذاتية التشحيم. وقد أثرت هذه النتائج بشكل مباشر على تصميم الأطراف الاصطناعية، مما عزز متانتها في الجسم الحي.
4. **تأثير الإضافات النانوية على تزييت الحدود**: أظهرت الدراسات التجريبية في ظروف تزييت الحدود أن دمج الإضافات النانوية، مثل الجسيمات النانوية في مواد التشحيم، قلّل الاحتكاك بشكل فعال من خلال تكوين أغشية احتكاك واقية. وقد أدى هذا النهج إلى انخفاض معاملات الاحتكاك بنسبة 15-30٪ أثناء محاكاة المفاصل الاصطناعية، مما أدى إلى إطالة عمر المكونات.
5. . **تقليل الاحتكاك في محركات الاحتراق الداخلي**: أظهرت التحليلات العددية والتجريبية للأسطح ذات الملمس في محامل المحرك الرئيسية أن الملمس الدوري للأسطح، مثل النتوءات الدقيقة، يمكن أن يقلل من خسائر الاحتكاك الهيدروديناميكي بنسبة ١٠-٢٥٪. ساهم هذا التحسين في خفض استهلاك الوقود وتعزيز كفاءة المحرك.
6. **التطبيقات الصناعية في أنظمة الطاقة**: في توربينات الرياح، أدت تحسينات تصميم الأسطح، بما في ذلك ملمس الجناح، إلى تحسن بنسبة 8٪ تقريبًا في كفاءة تحويل الطاقة من خلال تقليل السحب الديناميكي الهوائي واحتكاك المحمل. في عمليات حفر النفط، قللت زيوت التشحيم المتخصصة من مقاومة احتكاك الحفر، مما أدى إلى انخفاض في استهلاك الطاقة بنسبة 12-18٪.
7. **القيود والتوجهات المستقبلية**: حددت الدراسة فجوات كبيرة في نمذجة الاحتكاك الديناميكي، لا سيما في ظل ظروف تتضمن اقترانًا متعدد المجالات (حراريًا وميكانيكيًا وكيميائيًا) ومتعدد الوسائط. ومن المقترح إجراء أبحاث مستقبلية لدمج آليات التآكل، وتخميد الاهتزاز، والتحكم في الضوضاء في نماذج الاحتكاك التكيفية لتحسين التزييت في الوقت الفعلي.

Conclusion

The results underscore the critical role of advanced friction models in reducing wear, enhancing lubrication efficiency, and extending the lifespan of bearings across various sectors, including aerospace, automotive, biomedical, and energy. The integration of advanced modeling techniques, such as parametric texture design and nanoparticle-enhanced lubrication, has led to measurable performance improvements in industrial applications. The research framework has yielded significant advancements, achieving:

- A 30–50% extension in bearing lifespan,
- A 15–25% reduction in energy consumption,
- A 20–30% improvement in load-carrying capacity.

These findings validate the essential role of friction models in connecting theoretical insights with scalable industrial solutions.

الخاتمة

تُبرز النتائج الدور الحاسم لنماذج الاحتكاك المتقدمة في تقليل التآكل، وتعزيز كفاءة التزييت، وإطالة عمر المحامل في مختلف القطاعات، بما في ذلك الفضاء والسيارات والطب الحيوي والطاقة. وقد أدى دمج تقنيات النمذجة المتقدمة، مثل تصميم الملمس البارامتري والتزييت المُحسّن بالجسيمات النانوية، إلى تحسينات ملموسة في الأداء في التطبيقات الصناعية. وقد حقق إطار البحث تقدمًا ملحوظًا، حيث حقق ما يلي:

- زيادة في عمر المحامل بنسبة 30-50%،
- انخفاض في استهلاك الطاقة بنسبة 15-25%،
- تحسين في قدرة تحمل الأحمال بنسبة 20-30%.

تُثبت هذه النتائج الدور الأساسي لنماذج الاحتكاك في ربط الرؤى النظرية بالحلول الصناعية القابلة للتطوير.

Literature المراجع والمصادر

1. Chen X, Kato T, Kawaguchi M, et al. Structural and environmental dependence of superlow friction in ion vapour-deposited aC: H: Si films for solid lubrication application[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013, 46(25): 255304.
2. Wang W, He Y, Zhao J, et al. Optimization of groove texture profile to improve hydrodynamic lubrication performance: Theory and experiments[J]. Friction, 2020, 8: 83-94.
3. Scholes S C, Burgess I C, Marsden H R, et al. Compliant layer acetabular cups: friction testing of a range of materials and designs for a new generation of prosthesis that mimics the natural joint[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine, 2006, 220(5): 583-596.