

INFLUÊNCIA DA VISCOSIDADE E DA MASSA ESPECÍFICA DO LUBRIFICANTE NA GRIPAGEM DE ENGRENAGENS FZG - A

J. Castro⁽¹⁾ e J. Seabra⁽²⁾

(1) DEM - Departamento de Engenharia Mecânica, ISEP, Porto, Portugal

(2) DEMEGI - FEUP, Porto, Portugal

RESUMO

Os resultados experimentais da gripagem de engrenagens FZG tipo A lubrificadas com óleos base com diferentes viscosidades, mostram a importância da potência dissipada por atrito na gripagem deste tipo de engrenagens (critério FPI). Neste trabalho é definida uma expressão para o coeficiente de atrito com base na validade do critério FPI para todos os resultados experimentais, que envolve a viscosidade cinemática e a massa específica do lubrificante.. É posto em evidência a existência de um valor limite para a massa específica do lubrificante a partir do qual há forte possibilidade de gripagem, que se traduz pela existência de uma temperatura máxima admissível do banho de óleo para cada lubrificante. É também apresentada uma possível relação entre o critério FPI e a espessura do filme lubrificante em condições de gripagem.

INTRODUÇÃO

Os critérios de gripagem existentes, tais como os critérios da temperatura total ou integral, têm sido sucessivamente actualizados tendo em conta vários parâmetros de contacto [1, 2], de modo a melhorarem o cálculo dos coeficientes de atrito e das temperaturas “flash”. Apesar disso, nestes critérios as propriedades físicas do lubrificante, tais como a viscosidade e a massa específica do lubrificante, têm apenas uma pequena influência ou mesmo nenhuma através do coeficiente de atrito. Por outro lado, os resultados experimentais de gripagem parecem indicar que a influência de certos parâmetros, por exemplo a temperatura do

banho de óleo, é superior à prevista pelos critérios da temperatura integral ou total [3, 4].

Em outros critérios alternativos para a previsão de avarias em engrenagens [5, 6], por exemplo “pitting”, estão frequentemente relacionados com a espessura específica do filme lubrificante, que é uma indicação da severidade do contacto ou da possibilidade da rotura do filme lubrificante. Nestes critérios as propriedades físicas do lubrificante, como a viscosidade e a temperatura do lubrificante são muito importantes, pois têm uma forte influência na espessura do filme lubrificante.

Outro tipo de critérios de gripagem, como o PV ou o FPI (potência dissipada por atrito), que estão relacionados com a potência no contacto, estão normalmente limitados a condições de funcionamento particulares e têm sido usados em conjunto com a espessura do filme lubrificante de modo a serem obtidos critérios de gripagem mais gerais [7-11].

O principal objectivo deste trabalho é desenvolver uma expressão para o coeficiente de atrito (para as engrenagens FZG tipo A) de modo a que em condições de gripagem o critério FPI seja válido e permaneça válido para diferentes lubrificantes e temperaturas. Torna-se necessário, em qualquer caso manter uma coerência com outras expressões para o cálculo do coeficiente de atrito (por exemplo a expressão ISO).

A descrição da máquina de ensaios de gripagem FZG pode ser encontrada na referência [12], e as características das engrenagens FZG tipo A podem ser encontradas nas referências [1, 13, 14]. A distribuição de carga ao longo da linha de engrenamento foi calculada de acordo com a referência [15].

RESULTADOS DOS ENSAIOS FZG DE GRIPAGEM

Os lubrificantes ensaiados, são óleos base (mistura de bases sem aditivos anti-desgaste – AW ou extrema-pressão – EP) ISO VG 68, ISO VG 220 e ISO VG 680 (as características dos óleos encontram-se no anexo 1, tabela A1).

As condições de ensaio e os resultados dos ensaios de gripagem encontram-se na tabela 1. Fizeram-se dois tipos de ensaios: os primeiros designados por ST (ensaios standard – norma DIN 51354) e os outros designados por CT que representam ensaios realizados a temperatura constante.

A avaliação gripagem é visual, baseada na avaria superficial em todos os dentes do pinhão. A condição para a existência de gripagem é a soma das marcas de gripagem no pinhão ser igual ou superior à largura do dentado.

CRITÉRIO DE GRIPAGEM FPI

O critério de gripagem FPI (potência dissipada por fricção) postula que, em condições de gripagem, a potência gerada por fricção no interior da área de contacto é constante [16], o que quer dizer que o valor máximo do produto do coeficiente de atrito

Tabela 1- Resultados dos ensaios de gripagem FZG

Teste N°	Teste Tipo	Óleo ISO VG	V _{SB} (m/s)	To (°C)	k	P _{oB} (GPa)	v _o (cSt)	ρ _o (kg/m ³)	αη _o (s)	βη _o / K _{lub}	λ _{oB}	T _M (°C)
1	ST	68		105	4	0.46	7.4	834	0.99x10 ⁻¹⁰	0.00109	0.280	118
2		220	5.8	119	8	0.91	11.3	838	1.59x10 ⁻¹⁰	0.00173	0.328	165
3		680		143	12	1.37	12.0	844	1.66x10 ⁻¹⁰	0.00174	0.316	241
4	CT		2.9		10	1.14					0.176	158
5		68	5.8	100	6	0.68	8.3	837	1.15x10 ⁻¹⁰	0.00129	0.285	127
6			11.6		3	0.34					0.424	109
7			2.9		12	1.37					0.207	200
8		220	5.8	120	7	0.80	11.0	837	1.54x10 ⁻¹⁰	0.00167	0.331	155
9			11.6		4	0.46					0.466	135
10			11.6	110	8	0.91	14.1	843	2.10x10 ⁻¹⁰	0.00237	0.468	166
11		680	5.8	150	9	1.03	10.4	840	1.39x10 ⁻¹⁰	0.00141	0.300	207

pela pressão máxima de Hertz e pela velocidade de escorregamento, ao longo da linha de engrenamento, permanece constante em condições de gripagem.

Existem dois pontos críticos nas engrenagens FZG tipo A, que têm praticamente o mesmo valor para o critério FPI. Um dos pontos corresponde ao ponto de pressão de Hertz máxima (ponto W), e o outro é o ponto com máxima velocidade de escorregamento (ponto B). Todos os cálculos e expressões apresentadas foram desenvolvidas para o ponto B da linha de engrenamento, onde a espessura do filme lubrificante também é mínima. O critério FPI pode ser escrito como:

$$\mu P_{oB} V_{sB} = \text{Constante} \quad (1)$$

Este critério é fortemente dependente do coeficiente de atrito. As expressões para o coeficiente de atrito, quer seja a expressão DIN [14] quer seja a expressão de Michaelis [1] são dependentes da viscosidade dinâmica do óleo.

A expressão DIN utiliza a viscosidade dinâmica do óleo à temperatura de massa das engrenagens enquanto que a expressão Michaelis usa a viscosidade dinâmica à temperatura do banho de óleo.

Estes coeficientes de atrito, para o ponto B da linha de engrenamento das engrenagens FZG tipo A ($C_{\mu\text{DIN}}$ e $C_{\mu\text{MIC}}$ representam constantes geométricas), são definidos por:

$$\mu_{\text{DIN}} \rightarrow C_{\mu\text{DIN}} \left(\frac{P_{oB}}{V_{sB}} \right)^{0.25} \frac{1}{\eta_M^{0.25}} \quad (2)$$

$$\mu_{\text{MIC}} \rightarrow C_{\mu\text{MIC}} \left(\frac{P_{oB}}{V_{sB}} \right)^{0.2} \frac{1}{\eta_o^{0.05}} \quad (3)$$

O cálculo da temperatura de massa T_M é baseado numa expressão desenvolvida especialmente para a máquina de ensaios FZG [1] que envolve a temperatura "flash" com o coeficiente de atrito μ_{MIC} .

Considerando a influência da pressão e da velocidade de escorregamento no coeficiente de atrito (quer seja μ_{DIN} ou μ_{MIC}), o critério FPI pode ser escrito em

termos genéricos e para temperatura constante como: $P_{oB}^{1+\delta} V_{sB}^{1-\delta} = \text{Const ante}$.

Nos ensaios a temperatura constante realizados na máquina FZG com as engrenagens tipo A, o critério FPI mostrou-se perfeitamente válido, para cada óleo base a temperatura constante (ISO VG 68 a 100°C ou ISO VG 220 a 120°C), como mostra a figura 1. Infelizmente a diferentes temperaturas ou com óleos diferentes, os resultados deixam de ser satisfatórios, e o cálculo dos coeficientes de atrito parece inadequado.

Os resultados experimentais mostram uma forte dependência da viscosidade, mas talvez a viscosidade dinâmica não seja suficiente para explicar a influência das propriedades reológicas do lubrificante no comportamento das engrenagens à gripagem. Uma expressão alternativa para o cálculo do coeficiente de atrito (μ_{calc}) foi desenvolvida com base nas equações (2) e (3) mas introduzindo a massa específica e a viscosidade cinemática do lubrificante em vez da viscosidade dinâmica.

A seguinte expressão foi obtida,

$$\mu_{\text{calc}} \rightarrow C_{\mu\text{calc}} \left(\frac{P_{oB}}{V_{sB}} \right)^{\delta} \frac{1}{\nu_o (\rho_o - \rho_R)} \quad (4)$$

A aplicação do critério FPI com μ_{calc} resulta em:

$$\mu_{\text{calc}} P_{oB} V_{sB} \Leftrightarrow \frac{P_{oB}^{1+\delta} V_{sB}^{1-\delta}}{\nu_o (\rho_o - \rho_R)} = \text{Const ante} \quad (5)$$

É necessário definir os três parâmetros δ , ρ_R e $C_{\mu\text{calc}}$. δ é o expoente da razão P/V e para os ensaios a temperatura constante dos óleos 220 e 68 a 120°C e 100°C respectivamente, foi obtido o valor $\delta = 0.14$. A figura 1 mostra os resultados experimentais obtidos com estes dois óleos e as correspondentes curvas correlacionadas numericamente. A correlação é bastante aceitável. Considerando, em seguida, todos os restantes resultados a temperatura constante, foi obtido o valor para ρ_R , resultando $\rho_R = 826 \text{ Kg/m}^3$.

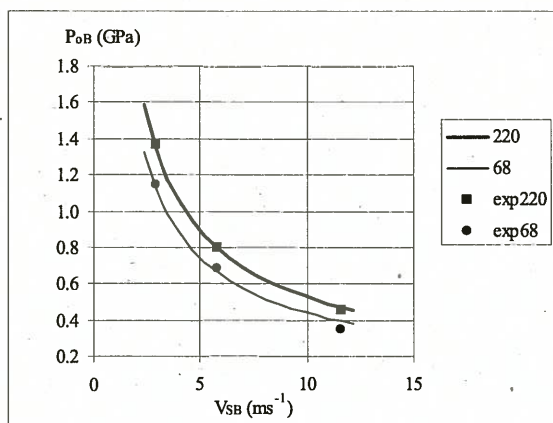


Fig 1 - Curvas $P^{1+0.14}V^{1-0.14}=\text{Constante}$.

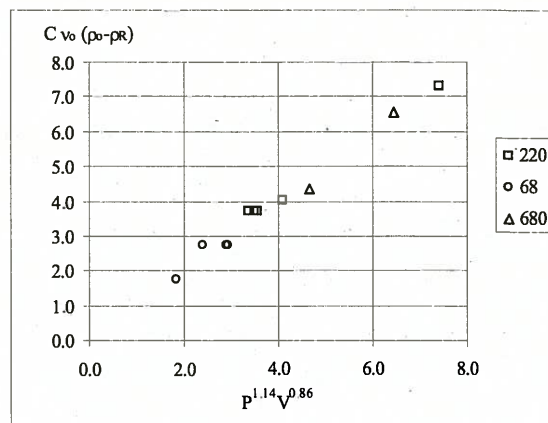


Fig 2 - Critério de gripagem FPI:
 $P^{1.14}V^{0.86} = C v_o (\rho_o - \rho_R)$

A figura 2 mostra a relação entre os resultados experimentais com o produto $P^{1.14}V^{0.86}$ e os parâmetros reológicos $v_o(\rho_o - \rho_R)$. Há, claramente, uma estreita relação entre a expressão (5) e os resultados experimentais.

Os coeficientes de atrito μ_{DIN} , μ_{MIC} e μ_{calc} e os correspondentes produtos FPI encontram-se na tabela 2 e nas figuras 3 e 4.

Pode-se observar na figura 3 e na tabela 2, que os coeficientes de atrito μ_{ISO} e μ_{calc} são normalmente superiores aos μ_{MIC} , o que se deve ao facto do regime de lubrificação considerado neste último caso

ser sempre por filme completo, o que origina valores inferiores para o coeficiente de atrito, relativamente ao regime de lubrificação misto, que é bastante mais provável em condições de gripagem e é considerado no cálculo do coeficiente de atrito ISO (com a introdução do cálculo da viscosidade à temperatura de massa).

O valor para a constante $C_{\mu_{calc}}$ foi obtido considerando o valor médio do critério FPI aplicado com o coeficiente de atrito DIN ($0.436 \text{ GPa.ms}^{-1}$, ver figuras 3 e 4 e a tabela 2) e o valor da constante resultou em $C_{\mu_{calc}}=1.15$.

Tabela 2 - Coeficiente de atrito e critério FPI

Teste Nº	μ_{MIC}	μ_{DIN}	μ_{CALC}	μ_{MICPV}	μ_{DINPV}	μ_{CALCPV}
1	0.038	0.057	0.174	0.100	0.151	0.460
2	0.049	0.084	0.085	0.259	0.443	0.447
3	0.057	0.116	0.054	0.455	0.922	0.430
4	0.062	0.126	0.140	0.206	0.417	0.463
5	0.044	0.073	0.118	0.176	0.290	0.469
6	0.029	0.040	0.097	0.116	0.158	0.386
7	0.066	0.138	0.106	0.262	0.546	0.422
8	0.046	0.076	0.090	0.215	0.350	0.414
9	0.032	0.044	0.075	0.171	0.233	0.397
10	0.042	0.071	0.042	0.445	0.746	0.444
11	0.051	0.091	0.079	0.306	0.543	0.467
Valores médios (GPa.ms^{-1})				0.246	0.436	0.436

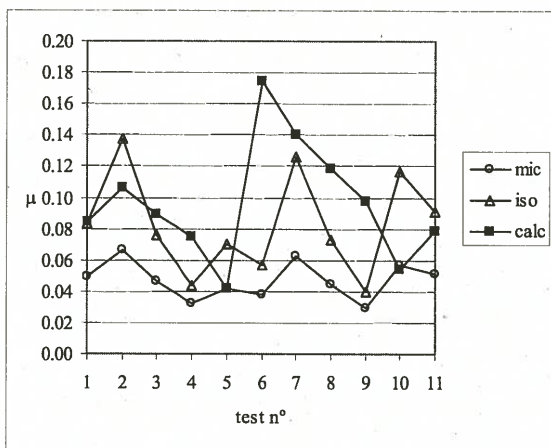


Fig 3 – Coeficientes de atrito.

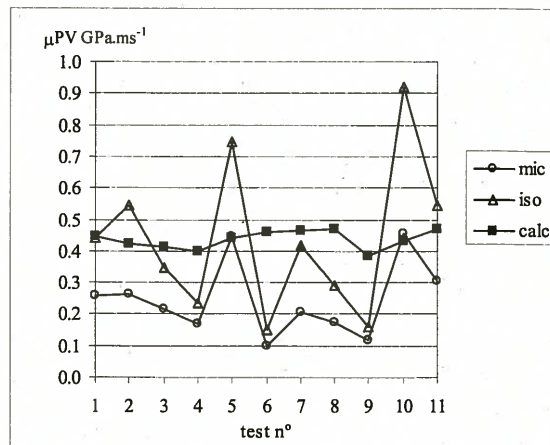


Fig 4 – Aplicação do critério FPI.

A figura 4 mostra claramente que o critério FPI com os coeficientes de atrito μ_{DIN} e μ_{MIC} , produz resultados bastante aleatórios e com uma gama de variação alargada, ou seja, em desacordo com o critério. Pelo contrário, o critério FPI com o coeficiente de atrito μ_{calc} resulta em valores relativamente constantes.

A figura 5, mostra a relação entre o coeficiente de atrito μ_{calc} e a espessura específica do filme lubrificante em condições de gripagem. De uma forma geral, os valores mais elevados do coeficiente de atrito estão relacionados com baixas espessuras específicas do filme lubrificante, que é característico do regime de lubrificação misto [17].

Outro resultado interessante, é que para um determinado valor da espessura específica do filme lubrificante, ao óleo mais “fino”, com menores valores de massa específica e viscosidade de referência, correspondem os coeficientes de atrito mais elevados. Finalmente é de salientar que para um mesmo óleo à mesma temperatura o valor do coeficiente de atrito varia linearmente com a espessura específica do lubrificante e para o mesmo óleo com valores similares de espessura de filme lubrificante, o coeficiente de atrito aumenta com o aumento da temperatura do banho de óleo.

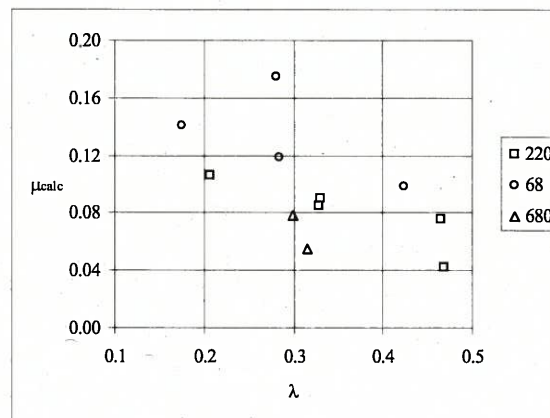


Figura 5 – Relação λ - μ_{calc} .

Aplicação aos ensaios normalizados

Nos ensaios standard (DIN 51354), a temperatura do banho de óleo aumenta linearmente com o estágio de carga aplicado (na realidade este aumento é proporcional à pressão máxima de Hertz). Esta evolução é representada pela seguinte expressão:

$$T_o = 72 + 6k \quad (6)$$

Aplicando a expressão (5) para a velocidade de escorregamento dos ensaios standard e relacionando a pressão máxima de Hertz com o estágio FZG de carga (k), a expressão seguinte é obtida:

$$k = [0.08 v_o (\rho_o - 826)]^{(1/1.14)} \quad (7)$$

As expressões (6) e (7) estão representadas na figura 6 em função da temperatura do banho de óleo e para cada

lubrificante. As intersecções entre estas curvas, representam, para cada óleo, os valores calculados da carga de gripagem. Os valores calculados estão próximos dos valores experimentais.

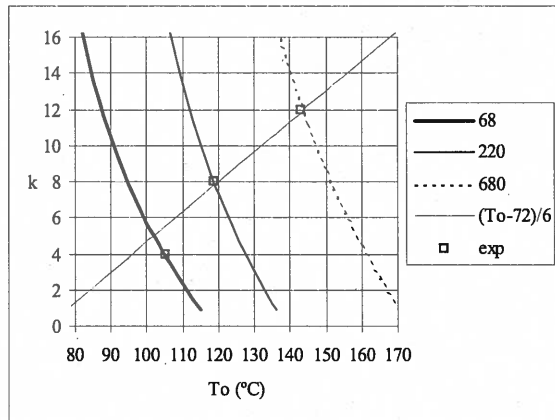


Figura 6 – Aplicação aos ensaios standard.

Temperaturas críticas

Se a temperatura do banho de óleo atinge um determinado valor para o qual a massa específica do lubrificante é similar ao valor de referência (ρ_R), o coeficiente de atrito μ_{calc} atinge valores típicos do contacto metal-metal, o que quer dizer que ocorreu rotura do filme lubrificante. As temperaturas do banho de óleo para as quais os lubrificantes atingem a massa específica de referência ($\rho_R = \rho_o$) podem ser chamadas temperaturas críticas de gripagem (T_{cr}).

Na tabela 3 encontram-se as temperaturas críticas para cada óleo, acima das quais a gripagem pode ocorrer em quaisquer condições.

Tabela 3 - Temperaturas críticas

Óleo	T_{cr} (°C)
ISO VG 68	118
ISO VG 220	138
ISO VG 680	173

Espessura específica do filme lubrificante para as temperaturas críticas

A espessura do filme lubrificante (para contactos lineares) é definida de acordo com a expressão de Dowson [18] para a espessura de filme no centro do contacto (h_o) e é corrigida devido ao

aquecimento piezo-viscoso de corte do lubrificante na entrada do contacto EHD [19] (ver anexo 1).

A espessura específica do filme lubrificante (λ) é definida como a razão entre a espessura corrigida do filme (h_{oc}) e a rugosidade composta das superfícies em contacto.

Para as engrenagens FZG tipo A, e para o ponto B da linha de engrenamento, λ é definida por,

$$\lambda_B^{FZGA} = \frac{1.54 \times 10^6 (\eta_o \alpha)^{0.727} V_{SB}^{0.727} P_{OB}^{-0.182}}{1 + 1.835 \left(\frac{\beta \eta_o}{K_{lub}} \right)^{0.64} V_{SB}^{1.28}} \quad (8)$$

A espessura específica do filme calculada para cada óleo às temperaturas críticas do banho de óleo e para um valor baixo de pressão (correspondente ao primeiro estágio de carga), pode-se considerar que representa a espessura específica mínima do filme lubrificante (ou a espessura específica crítica do filme lubrificante em condições de gripagem, λ_{CR}).

Nestas condições, a espessura do filme lubrificante é calculada por:

$$\lambda_{CR} = \frac{2.28 \times 10^6 (\eta_M \alpha)^{0.727} V_{SB}^{0.727}}{1 + 1.835 \left(\frac{\beta \eta_M}{K_{lub,M}} \right)^{0.64} V_{SB}^{1.28}} \quad (9)$$

e para cada óleo a expressão pode ser resumida por,

$$\lambda_{CR} = \frac{C_\lambda V_{SB}^{0.727}}{1 + C_\phi V_{SB}^{1.28}} \quad (10)$$

onde os valores de C_λ e C_ϕ , encontram-se na tabela 4.

Tabela 4 - Fatores para λ_{CR}

Óleo	C_λ	C_ϕ
68	0.093	0.0164
220	0.117	0.0197
680	0.106	0.0170

Na figura 7, a espessura do filme lubrificante às temperaturas críticas

(espessura específica crítica do filme lubrificante, λ_{CR}) está representada para cada óleo, em função da velocidade de escorregamento.

A figura 7 mostra que há uma forte concordância entre as curvas da espessura específica crítica do filme lubrificante e a espessura do filme lubrificante calculada para cada uma das condições de ensaio em condições de gripagem.

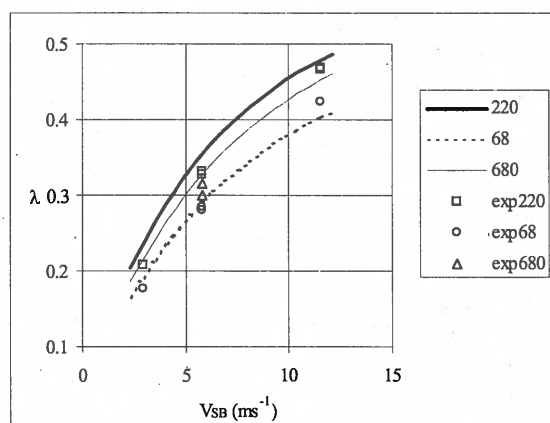


Fig 7- Variação da espessura específica do filme lubrificante com a velocidade de escorregamento em condições de gripagem.

A espessura específica crítica do filme lubrificante, λ_{CR} , parece ser um parâmetro interessante, que pode ser usada como informação suplementar aos critérios clássicos de gripagem. Pode representar uma rotura do filme lubrificante, ou uma condição necessária para iniciar e desenvolver a gripagem, como foi sugerido por Foussat [3].

A extrapolação destes resultados para outro tipo de engrenagens para outro tipo de engrenagens ainda não é possível. As engrenagens FZG tipo A, têm uma geometria especial, com uma taxa de escorregamento máxima de 75%, e muito bom acabamento superficial do flanco dos dentes ($Ra = 0.35 \mu m$) [1, 12]. As engrenagens são fabricadas num aço bem definido, e o comportamento à gripagem também depende do material das engrenagens.

Por outro lado, os resultados experimentais utilizados nesta análise só dizem respeito a óleos base (mistura de

bases), e os aditivos dos lubrificantes para engrenagens introduzem profundas modificações nas características de gripagem do mecanismo engrenagem/lubrificante.

A rugosidade e outros parâmetros de contacto (como temperaturas locais e espessura de filme local) foram tratadas globalmente, porque neste trabalho pretendeu-se relacionar a gripagem global com as propriedades genéricas do lubrificante (à temperatura do banho de óleo) e com as condições de contacto. Uma solução que considere a rugosidade local, a reologia do lubrificante e as temperaturas locais é importante para se obter um mecanismo de gripagem mais compreensivo.

CONCLUSÃO

Os resultados experimentais e os resultados analíticos sugerem que a gripagem está relacionada com um valor de potência dissipada por atrito acima da qual a gripagem ocorre.

A influência da viscosidade do óleo base na gripagem é superior à prevista pelo critério FPI calculado com expressões comuns para o coeficiente de atrito.

Considerando a influência da massa específica do óleo no coeficiente de atrito, foi possível correlacionar todos os resultados experimentais, obtendo uma expressão mais genérica para o critério FPI.

A definição proposta para o coeficiente de atrito, permitiu encontrar temperaturas críticas de gripagem para cada óleo base considerado. O cálculo da espessura do filme lubrificante a essas temperaturas, para uma baixa carga ou baixa pressão, produz valores críticos de espessura de filme, abaixo dos quais a gripagem ocorre. Estes valores críticos dependem da velocidade tangencial da engrenagem e dependem da viscosidade do óleo base.

Símbolos

(unidades SI, com as exceções indicadas)

- g_i - parâmetro do material.
- h_o - espessura do filme lubrificante no centro do contacto.
- h_{oc} - espessura corrigida do filme lubrificante.
- k - estágio de carga FZG.
- u_i - parâmetro de velocidade.
- w_i - parâmetro de carga.
- E - módulo de Young.
- E^* - módulo de Young equivalente.
- F_{ni} - carga normal no ponto de contacto.
- K_{lub} - condutividade térmica do lubrificante.
- L - parâmetro térmico do lubrificante.
- P_o - pressão máxima de Hertz.
- Re_{qi} - raio de curvatura equivalente no ponto de contacto.
- R_a - rugosidade média (μm).
- S_o - expoente de Roelands.
- T_o - temperatura do banho de óleo ($^{\circ}C$).
- T_M - temperatura de massa ($^{\circ}C$).
- V_e - taxa de escorregamento.
- V_i - velocidade tangencial do ponto de contacto.
- V_{roli} - velocidade de rolamento do ponto i de contacto.
- W - ponto W da linha de engrenamento (transição de 1 para dois pares de dentes engrenados no contacto).
- α - coeficiente de piezo-viscosidade.
- β - coeficiente de termo-viscosidade.
- ϕ_T - factor de correcção térmica.
- η_o - viscosidade dinâmica.
- λ - espessura específica do filme lubrificante.
- μ_i - coeficiente de atrito no ponto de contacto.
- ν - coeficiente de Poisson.
- ν_o - viscosidade cinemática (cSt).
- ν_{40} - viscosidade cinemática a $40^{\circ}C$ (cSt).
- ρ - massa específica do lubrificante.
- ρ_R - massa específica de referência.
- σ - rugosidade composta (RMS) ($\sigma_{RMS} \approx 1.11 R_a$).

Subscritos

- i - ponto genérico da linha de engrenamento.
- o - condições à temperatura do banho de óleo.
- ref - valor de referência.
- s - escorregamento.
- B - ponto B da linha de engrenamento (cabeça do pinhão - pé da roda).
- CR - condições de gripagem.

Referências

1. Winter, H. and Michaelis, K.: Scoring Load Capacity of Gears Lubricated with EP-oils. AGMA, Fall Technical Meeting Montreal, Canada, October, 1983.

2. Henriot, G.: La Lubrification Industrielle - La Lubrification de Engrenages Tome 1 - Transmissions, Compresseurs, Turbines. Publications de l'Institut Français du Pétrole. Éditions Technip, 1984, 297 - 385.
3. Foussat, E.: Approche d'un critere de grippage au travers de la rupture du film elastohydrodinamique. These pour obtenir le grade de Docteur, présentée devant l' Institut National des Sciences Appliquees de Lyon. Mai 1994.
4. Dyson, A.: Scuffing - a review. Tribology International. June, 1975, pg. 77 - 87.
5. Ku, P. M.: Gear Failure Modes - Importance of Lubrication and Mechanics. ASLE Transactions 19.3, 239 - 249.
6. Winer, W. O. and Cheng, H. S.: Film Thickness, Contact Stress and Surface Temperatures. Wear Control Handbook, 81-141.
7. Castro, J. and Seabra, J.: Scuffing FZG Gears Lubricated with base Oils. 10th International Colloquium in Tribology - Solving Friction and Wear problems. Vol. III. Pg. 2047-2061 Wilfred J. Bartz. - Ostfildern: TAE. 09-11 January 1996.
8. J. Castro and J. Seabra. New PV Scuffing Criteria considering Lubricant film Breakdown for FZG Gears Proceedings of the 11th International Colloquium Tribology: "Industrial and Automotive Lubrication". Technische Akademie Esslingen, Ostfildern, Germany, 13 to 15 January 1998. Vol I, 409-418.
9. J. Castro and J. Seabra. Scuffing and Lubricant film Breakdown in FZG Gears - Part I. Analytical and Experimental Approach. WEAR 215 (1998) 104-113.
10. J. Castro and J. Seabra. Scuffing and Lubricant film Breakdown in FZG Gears - Part II. New PV scuffing criteria lubricant and temperature dependent. WEAR 215 (1998) 114-122.
11. J. Castro, S. Gonçalves and J. Seabra. Influência da Espessura de Filme Lubrificante na Gripagem de Engrenagens FZG. Proceedings das 6as Jornadas Portuguesas de Tribologia. Universidade de Coimbra, Portugal, Junho de 1998.
12. Winter, H.; Michaelis, K.: Scoring Tests of Aircraft Transmission Lubricants at High Speeds and High Temperatures. Journal of Synthetic Lubrication, 3 (1986) 2, 121 - 135.

13. Winter, H.; Michaelis, K.: FZG Gear Test Rig - Description and Test Possibilities. Co-ordinate European Council Second International Symposium on The Performance Evaluation of Automotive Fuels and Lubricants. Wolfsburg, West Germany, June 5-7, 1985.
14. Norm DIN 51354 part 2:FZG - Zahnrad - Verspannags - Prufmaschine Prüfverfahren A/8.3/90 fur Schmierole, April, 1990.
15. Michaelis, K.: Testing Procedures for Gear Lubricants With the FZG Test Rig. Industrial Lubrication and Tribology, May - June, 1974.
16. Jackson, A. and Enthoven, J. C. "The Effect of Lubricant Traction on Scuffing". STLE - Tribology Transactions. Volume 37 (1994), 2, 387 - 395.
17. Hamrock, B. and Dowson, D.: Ball Bearing Lubrication - The Elastohydrodynamic of Elliptical Contacts. A Wiley - Interscience Publication; John Wiley and Sons . U.S. ISBN 0471-03553-X, 1981
18. Dowson, D. and Higginson, G. R.: Elastohydrodynamic Lubrication. S. I. Edition, Pergamon Press Ltd, Oxford, 1977.
19. Gohar, R.: Elastohydrodynamics. Ellis Horwood series in Mechanical Engineering, 1988.

ANEXO 1.- ESPESSURA DO FILME LUBRIFICANTE

Em qualquer ponto i da linha de engrenamento a espessura do filme é definida de acordo com a expressão de Dowson [18] para a espessura no centro do contacto (h_o), que para contactos lineares é dada por:

$$h_{oi} = 0.975 R_{eqi} u_i^{0.727} g_i^{0.727} w_i^{-0.091} \quad (A1)$$

Os parâmetros velocidade (u_i), material (g_i) e carga (w_i) são dados por:

$$u_i = \eta_o \frac{V_{roli}}{2 R_{eqi} E^*}; g_i = 2\alpha E^*; w_i = \frac{F_{ni}}{R_{eqi} E^* \ell}$$

A espessura de filme no centro do contacto isotérmica (A1) deve ser corrigida devido ao aquecimento do lubrificante por efeito piezo-viscoso de corte na entrada do contacto EHD. A espessura corrigida do filme lubrificante (h_{oci}) é definida por [19]: $h_{oci} = h_{oi} \phi_{Ti}$ com,

$$\phi_{Ti} = \left[1 + 0.1(1 + 14.8 V_{ei}^{0.83}) L_i^{0.64} \right] \quad (A2)$$

A taxa de escorregamento é dada por:

$$V_{ei} = \frac{|V_{si}|}{V_{roli}} = \frac{|V_{li} - V_{2i}|}{V_{li} + V_{2i}}$$

O parâmetro térmico do lubrificante é definido por:

$$L_i = \frac{\beta \eta_o V_{roli}^2}{K_{lub}}$$

A espessura específica do filme lubrificante pode ser determinada como a razão entre a espessura corrigida do filme lubrificante e a rugosidade composta das superfícies em contacto, que resulta:

$$\lambda_i = \frac{h_{oci}}{\sigma} \quad (A3), \quad \text{com,}$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}, \text{ e } \sigma_1 = 1.11 R_{a1}; \sigma_2 = 1.11 R_{a2}$$

Para as engrenagens FZG tipoA, o valor mínimo de ℓ ocorre para o ponto B da linha de engrenamento (cabeça do pinhão - pé da roda) e os parâmetros necessários para o cálculo da espessura específica do filme lubrificante são:

$$E^* = 113 \text{ GPa}; \quad R_{eqB} = 0.0103 \text{ m}; \quad \ell = 0.020 \text{ m};$$

$$u_B = \frac{\eta_o V_{rolB}}{2.33 \times 10^9}; \quad g_B = 2.26 \times 10^{11} \alpha;$$

$$w_B = \frac{F_{nB}}{23.35 \times 10^6}; \quad \sigma = 0.512 \times 10^{-6} \text{ m}; \quad V_{eB} = 0.745$$

Utilizando as equações e os valores numéricos dados, a espessura do filme lubrificante pode ser definida como:

$$h_B^{FZGA} = \frac{1.311 (\eta_o \alpha)^{0.727} V_{rolB}^{0.727} F_{nB}^{-0.091}}{1 + 1.260 \left(\frac{\beta \eta_o}{K_{lub}} \right)^{0.64} V_{rolB}^{1.28}} \quad (A4)$$

que depende das condições de ensaio (carga e velocidade de rolamento) e das propriedades do lubrificante.

Esta expressão pode ser escrita em termos da pressão máxima de Hertz P_{oB} e da velocidade de escorregamento V_{sB} :

$$P_{oB} = \sqrt{\frac{2 F_{nB} E^*}{\pi \ell R_{eqB}}} = 18.69 \times 10^6 \sqrt{F_{nB}},$$

$$\text{resulta, } F_{nB} = 2.863 \times 10^{-15} P_{oB}^2 \quad \text{e } V_{rolB} = \frac{V_{sB}}{V_{eB}},$$

$$\text{ou seja, } V_{sB} = 0.745 V_{rolB}$$

Introduzindo estas relações na expressão (A4), resulta:

$$h_B^{FZGA} = \frac{34.170(\eta_o \alpha)^{0.727} V_{sB}^{0.727} P_{oB}^{-0.182}}{1 + 1.835 \left(\frac{\beta \eta_o}{K_{lub}} \right)^{0.64} V_{sB}^{1.28}} \quad (A5)$$

A relação entre a velocidade de escorregamento (no ponto B) e a velocidade linear, é: $V_{sB} = 0.671 v_t$

O parâmetro de piezoviscosidade (α) é dado por:

$$\alpha = (\alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_3) \times 10^{-8} \quad [A1]$$

com

$$\alpha_1 = 1.216 + 4.143 \left[\text{Log}(v_o 10^6) \right]^{3.0627}$$

$$\alpha_2 = 2.842 \times 10^{-4} n^{5.190} \left[\text{Log}(v_o 10^6) \right]^{1.5976}$$

$$\alpha_3 = 3.999 \left[\text{Log}(v_o 10^6) \right]^{3.0975} (\rho_o 10^{-3})^{0.1162}$$

A condutividade térmica do lubrificante:

$$K_{lub} = 0.12 \frac{1 - 5 \times 10^{-4} \frac{T_o}{3}}{\rho_o 10^{-3}} \quad [A2]$$

O parâmetro de termo-viscosidade é dado por:

$$\beta = S_o \frac{\text{Ln}(\eta_o) + 9.67}{T_o + 135}$$

com,

$$S_o = \frac{\text{Ln} \left[\frac{\text{Ln} \left(\frac{\eta_{100}}{\eta_{40}} \right)}{\text{Ln}(\eta_{40}) + 9.67} + 1 \right]}{\text{Ln} \left(\frac{40 + 135}{100 + 135} \right)}$$

A viscosidade dinâmica é calculada de acordo com a equação da norma ASTM D341:

$$\eta_o = \rho_o 10^{-6} \left[10^{(10^m - n \log T_o)} - c \right]$$

A massa específica depende da temperatura de acordo com [6]:

$$\rho_o = \rho_{ref} - 0.6 [T_o - T_{ref}]$$

Tabela A1- Características do lubrificante

ISO VG	Viscosidade cinemática (cSt)		Massa específica Kg/m ³ (15 °C)
	100°C	40°C	
68	8.3	72.8	888
220	18.52	236.8	900
680	37.7	680	921

Referências (anexo)

- A1. Frêne, J., Nicolas, D., Degueurce, B., Berthe, D., Godet, M.: *Lubrification Hydrodynamique: Paliers et Butées - Cap. 2 - Les Huiles lubrifiantes*. Direction des Études et Recherches d'Électricité de France. Editions Eyrolles, 1990.
- A2. Cameron, A.: *Basic Lubrication Theory - Cap 2 - Viscosity*. Ellis Horwood Series in Engineering Science - 3rd edition.