

RESISTÊNCIA A *SCUFFING* DE AÇO CARBONO NITRETADO

Adelci Menezes de Oliveira¹

Deniol Katsuki Tanaka¹

Amiltom Sinatora¹

Glauco Vargas Castilho²

¹ Universidade de São Paulo, Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Mecânica, 05508-900, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: adelci@yahoo.com

Resumo.

Foi estudada a resistência a “*scuffing*” de amostras nitretadas. Utilizou-se como critério para identificação da iminência de “*scuffing*”, visualização da fumaça proveniente da queima de óleo lubrificante e medição do nível de vibração dos mancais da máquina de ensaios, através de acelerômetro. Os ensaios foram realizados em uma máquina projetada e construída no Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) – EPUSP. As amostras foram construídas de aço AISI 1020 (para pastilha) e AISI 1045 (para anel) e nitretadas em banho de sais e em atmosfera gasosa, na temperatura de 570 °C por 4 horas. Os ensaios foram realizados em amostras nitretadas nas rotações de 1000, 3000 e 4500 rpm. A aplicação de carga foi realizada através de degraus com patamares com duração de 5 minutos cada. A resistência a “*scuffing*” foi medida como sendo a máxima carga suportada pelas amostras antes da queima do óleo lubrificante ou aumento brusco na aceleração dos mancais. As amostras nitretadas em banho de sais apresentaram maior resistência à “*scuffing*” que as nitretadas a gás. O fenômeno segue uma lei $PV^n = \text{constante}$, como citado na literatura, embora uma lei exponencial, $P = a.e^{b.V}$, tenha melhor se ajustado aos resultados.

Palavras-chave: Nitretação, “*Scuffing*”, Desgaste, Vibração, Queima de óleo.

1. INTRODUÇÃO

Componentes mecânicos geralmente quando em funcionamento sob movimento relativo são submetidos a desgaste progressivo e, em alguns casos, podem sofrer danos severos. Para o primeiro tipo de dano, há modelos capazes de prever vida, pelo menos de forma aproximada. Para o último caso, de dano severo, uma predição já é mais complicada.

São considerados como danos severos, “*scuffing*”, “*galling*”, “*scoring*” e “*seizing*”. Segundo Park e Ludema (1994), “*seizing*” representa um dano em que ocorre parada total dos corpos em contato, o elemento motor do sistema não sendo capaz de vencer a força de atrito existente entre corpo e contra-corpo. “*Galling*” é o processo de aumento de rugosidade da superfície de contato proveniente das altas pressões de contato, em baixa velocidade, sem lubrificante, a não ser os lubrificantes de natureza óxida ou de gases adsorvidos nas

superfícies. “*Scuffing*” e “*scoring*” são referidos a danos em sistemas bem lubrificados, em que a temperatura do contato e o coeficiente de atrito sobem repentinamente. São modos de falha diferentes, muito embora o mecanismo de início do dano seja o mesmo.

“*Scuffing*” normalmente ocorre em sistemas came-seguidor, engrenagens, anel de segmento/cilindro em máquinas com movimento alternado e enfim em sistemas em que haja uma componente de deslizamento entre corpo e contra-corpo.

No presente trabalho será estudada a resistência a “*scuffing*” de aço carbono nitretado a gás e em banho de sais, citando-se as formas de detecção utilizadas, para o dano, bem como será apresentada uma discussão do mecanismo de dano.

2. “SCUFFING”

Muitos autores têm atribuído ao “*scuffing*” a natureza adesiva, como é o caso de Hersey (1966), Kang e Ludema (1986) e Park e Ludema (1994), enquanto outros atribuem ao “*scuffing*” um dano da natureza de fadiga de baixo ciclo, como é o caso de Jiajun *et al.* (1990). Hofer, apud Hersey (1966), concluiu, em 1931, que a carga de “*scuffing*” é inversamente proporcional à velocidade, tal como uma lei $PV^n = \text{cte}$.

Blok, apud Lee e Cheng (1991), postulou que quando a temperatura de contato entre dois corpos atinge um valor crítico, ocorre “*scuffing*”. Genkin e co-autores, apud Hersey (1966), verificaram que a temperatura crítica de Blok era excedida quando prevaleciam condições de alta pressão hidrodinâmica, no contato. Isto também foi confirmado por Lee e Cheng (1991). Este fenômeno está baseado na influência da pressão e temperatura na concentração de compostos adsorvidos nas superfícies de contato.

Existem outros critérios para predição de “*scuffing*”. Existe o critério λ que declara que quando a espessura do filme lubrificante, no contato, for menor que a rugosidade das superfícies compósitas, ocorrerá “*scuffing*”. Existe, ainda, o critério do índice de plasticidade, que declara que “*scuffing*” ocorrerá quando as asperezas deformarem plasticamente durante o contato, numa pequena extensão de 2 %, de acordo com Wilson e Sheus (1988). Parece que o critério que melhor explica o fenômeno de “*scuffing*” é aquele que leva em consideração a influência da pressão e temperatura do contato.

Normalmente, quando são realizados ensaios para identificar a carga de “*scuffing*” para um determinado sistema tribológico, é aplicada carga em degraus, com uma duração finita. No momento em que o coeficiente de atrito e a temperatura do contato sobem rapidamente, a carga aplicada é a carga crítica de “*scuffing*”. Nesse momento, ou ligeiramente antes, ocorre queima do lubrificante, um fenômeno denominado “*white smoke*”, como observado por Soejima *et al.* (1995).

Associada ao aumento brusco de temperatura do contato, aumento brusco do coeficiente de atrito, queima de lubrificante, está a mudança de fases que podem sofrer os corpos em contato durante a ocorrência de “*scuffing*”. Torrance e Cameron (1974) verificaram austenitização, transformação martensítica bem como subsequente revenimento.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizadas amostras de aço AISI 1045 (para anel) e AISI 1020 (para pastilha). A configuração do contato entre estes corpos pode ser vista na Figura 1. O contato ocorreu entre uma pastilha (corpo inferior) e um anel (corpo superior), buscando simular um sistema came-seguidor. Este sistema foi montado em uma máquina de ensaios projetada e construída no LFS (Laboratório de Fenômenos de Superfície) – EPUSP. Esta máquina é constituída, fundamentalmente, por bloco estrutural e um cabeçote, no qual são montadas as amostras, um motor AC para acionamento do eixo-árvore, um sistema de lubrificação constituído de reservatório, bomba de óleo de deslocamento positivo, filtro de óleo, condutos e manômetro

para monitorar a pressão do lubrificante. Ainda são utilizados inversores de frequência que permitem controlar e monitorar a rotação do eixo-árvore e da bomba de óleo. No bloco é montado o sistema de aplicação de carga (P), através da compressão de uma mola helicoidal.

Os corpos de prova tinham as seguintes dimensões: pastilha tinha diâmetro de 25 mm por 7 de altura; o anel tinha 37 mm de diâmetro por 5 de espessura. O acabamento superficial das amostras foi um acabamento de torneamento mecânico (Ra aproximadamente 5 μm).

As amostras após usinagem foram submetidas à limpeza em ultrassom, sob banho de álcool PA, com finalidade de que resíduos de fluido refrigerante e cavacos de usinagem fossem eliminados. Após limpeza foi procedido o tratamento de nitretação gasosa e em banho de sais, em temperatura de 570 °C, por 4 horas.

Anteriormente a cada ensaio, as amostras foram submetidas a outra fase de limpeza, ultrassonicamente em álcool PA. As amostras, então, foram montadas no eixo-árvore e no porta-pastilha. O carregamento foi efetuado em degraus, cada degrau com duração de 5 minutos, até que a carga crítica de “*scuffing*” fosse atingida. A forma de carregamento pode ser vista na Figura 2.

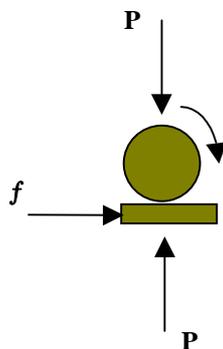


Figura 1. Desenho esquemático das amostras utilizadas, representando as forças envolvidas: força normal e de atrito.

O processo de “*running-in*” foi realizado por um período de 5 minutos, sob carga mínima de contato. As amostras foram lubrificadas através do método de lubrificação padrão utilizado em motores de combustão interna (vazamento lateral dos mancais hidrodinâmicos, do eixo-árvore). Em geral o processo de “*running-in*” é realizado sob carga mínima de contato, monitorando-se a evolução do coeficiente de atrito, até que este atinja um valor estável. No presente equipamento não foi possível realizar este procedimento, visto o fato de, ainda, não ser possível medir o coeficiente de atrito.

Para o monitoramento do início do processo de “*scuffing*” foi utilizado um acelerômetro e inspeção visual da queima de lubrificante, “*white smoke*”. O acelerômetro foi um sensor alternativo, visto o fato de não ter sido possível medir coeficiente de atrito e temperatura de contato. O princípio que direcionou a detecção do início de “*scuffing*” através de acelerômetro, foi aquele de que a natureza do fenômeno é adesiva, e que durante o início de “*scuffing*”, “soldas” intermitentes ocorreriam entre os corpos em contato. Estas soldas intermitentes atuariam como sinal perturbador, levando os mancais e estrutura da máquina a modificarem abruptamente o comportamento dinâmico. No instante que iniciava o dano por “*scuffing*”, conhecia-se a carga crítica para aquele sistema tribológico, que era a carga limite acima da qual ocorreria o dano.

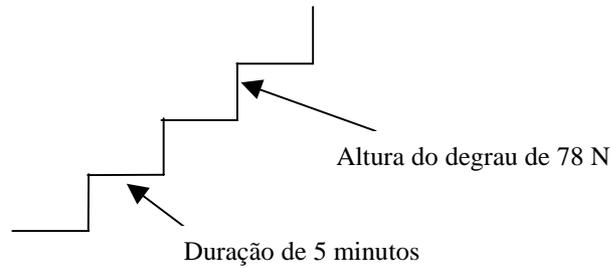


Figura 2. Representação da forma de carregamento, até se atingir a carga crítica de “scuffing”.

Os ensaios foram realizados em rotações de 1000 rpm (1,94 m/s), 3000 rpm (5,81 m/s) e 4500 rpm (8,72 m/s).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 3 pode-se visualizar as amostras nitretadas a gás e nitretadas em banho de sais.

A espessura de camada de compostos (camada branca) para amostra nitretada a gás é em média duas vezes a espessura para a amostra nitretada em banho de sais, sendo cerca de 30 μm e 15 μm , respectivamente. Na amostra nitretada a gás a camada de compostos é formada por duas fases: uma externa porosa e uma interna compacta. Esta camada porosa pode ser o nitreto ϵ , enquanto a compacta pode ser γ' . Na amostra nitretada em banho de sais há, predominantemente, apenas um tipo de nitreto na camada composta, o nitreto ϵ . A existência de uma camada dupla na amostra nitretada em atmosfera gasosa, através das propriedades diferentes que têm as fases, cria uma zona de tensão na interface, que pode acelerar o processo de dano, de “scuffing”.

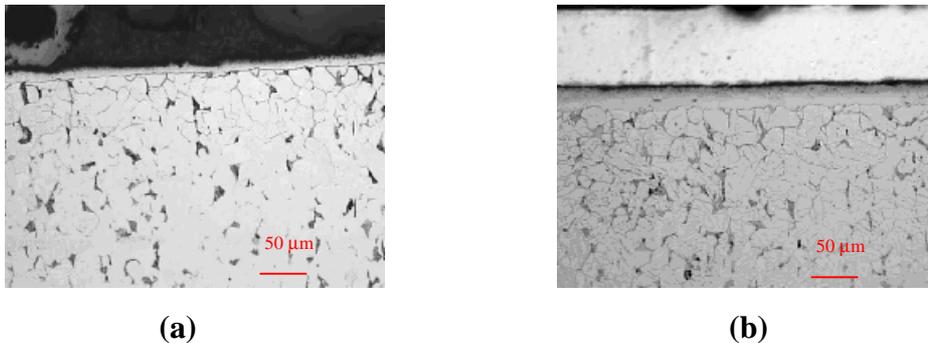


Figura 3. Amostras nitretadas. (a) banho de sais e (b) a gás. 500x.

As camadas apresentam microdureza superficial de 1000 a 1100 HV0,05 e em torno de 600 HV0,05 no substrato, para ambas amostras (Figuras 4 e 5).

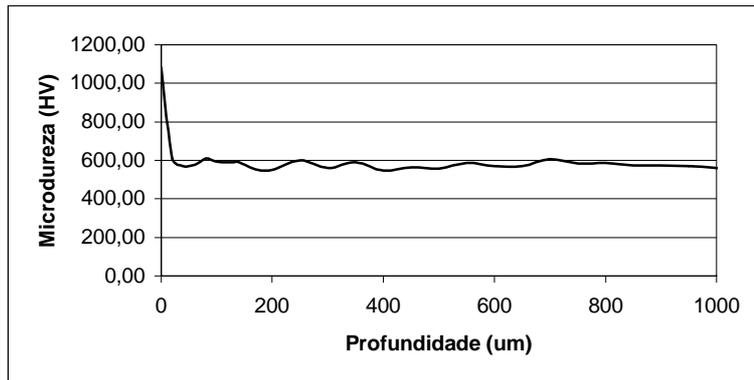


Figura 4. Perfil de microdureza para amostra nitretada em gás.

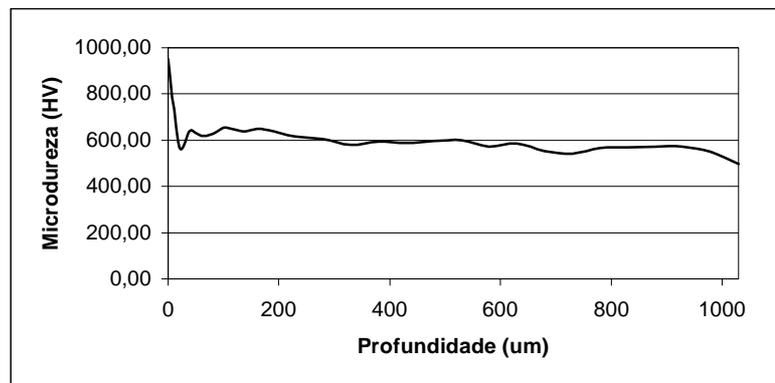


Figura 5. Perfil de microdureza para amostra nitretada em banho de sais.

Na Figura 6 pode-se visualizar a resposta das amostras nitretadas em banho de sais e a gás, referente à carga crítica de “*scuffing*”.

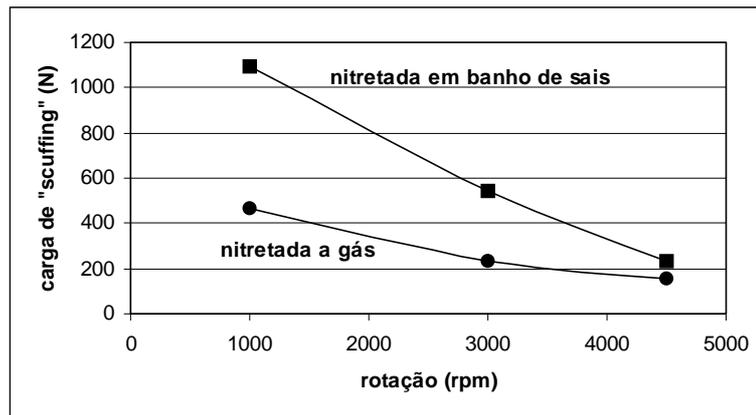


Figura 6. Resposta de amostras nitretadas a gás e em banho de sais à carga crítica de “*scuffing*”.

Os resultados apresentados na Figura 6 confirmam os resultados de Hofer, de que a carga crítica de “*scuffing*” é inversamente proporcional à velocidade em que os ensaios são realizados. Uma análise do comportamento das curvas também confirmam os resultados de

Hofer, no sentido de que $PV^n = \text{constante (k)}$. No entanto um comportamento $P = a.e^{b.V}$ tem-se ajustado melhor aos resultados, conforme pode-se verificar nas Tabelas 1 e 2.

Onde

(P) – Carga crítica de “*scuffing*” (N).

(V) – Velocidade de ensaio (m/s).

(n), (k), (a) e (b) – Constantes que dependem do sistema tribológico.

(e) – Base exponencial, característica de processos termicamente ativados.

Tabela 1. Comparação de ajustes para amostras nitretadas a gás.

	k	N	A	B	R²
Proposto por Hofer	763,14	-0,7103			0,9930
Exponencial			630,06	-0,1630	0,9962

Tabela 2. Comparação de ajustes para amostras nitretadas em banho de sais.

	k	N	A	B	R²
Proposto por Hofer	2193,19	-0,9428			0,9315
Exponencial			1780,15	-0,2246	0,9793

O comportamento exponencial sugere que o dano por “*scuffing*” seja um fenômeno de natureza termicamente ativada, uma vez que a temperatura de contato é função da velocidade, dentre outras variáveis, tais como propriedades dos materiais das amostras. Isto confirma qualitativamente o modelo de Lee e Cheng (1991) que contempla a influência da pressão hidrodinâmica e a temperatura do contato, e portanto, a natureza adesiva do fenômeno.

A melhor resposta das amostras nitretadas em banho de sais pode ser devida à interação mecânica e química entre as superfícies, provavelmente composta de nitretos diferentes daqueles formados na superfície das amostras nitretadas a gás. Uma outra possibilidade pode ser o fato de que a maior espessura de camada das amostras nitretadas a gás, composta por nitretos diferentes, seja um elemento que facilite sua fratura, quebra, permitindo a remoção dos compostos formados (provenientes da ação mecânica e química dos contatos lubrificadas) e o contato entre substratos seja efetivado, acelerando portanto o fenômeno de “*scuffing*”.

Um aspecto que deve ser observado é a carga crítica de “*scuffing*” para os dois tipos de amostras, para ensaios realizados em alta velocidade (4500 rpm). Esta resposta mostra que pode haver uma velocidade crítica, na qual a atuação dos sistemas tribológicos em estudo é idêntica, independente dos compostos intermetálicos (nitretos) formados e dos compostos provenientes da ação mecânica e química dos contatos.

As cargas críticas de “*scuffing*” foram determinadas através de dois métodos. Um método visual, através do qual podia-se ver uma fumaça branca, “*white smoke*”, proveniente da queima do óleo lubrificante. Esta fumaça era um indicativo da queda na eficiência do lubrificante, da remoção dos compostos moleculares protetores das superfícies. O segundo método foi o monitoramento da aceleração dos mancais do eixo-árvore. A utilização de acelerômetro foi baseada na hipótese de que o fenômeno de “*scuffing*” era de natureza adesiva e que no momento de sua ocorrência as “soldagens” intermitentes entre as superfícies em contato seriam traduzidas através de um aumento na aceleração dos mancais. Na Figura 7 é apresentada uma curva de resposta do acelerômetro instalado sobre os mancais do eixo árvore. Este sinal é um indicativo do início de “*scuffing*”, através do aumento brusco na aceleração dos mancais. É uma confirmação adicional da natureza adesiva do fenômeno de “*scuffing*”.

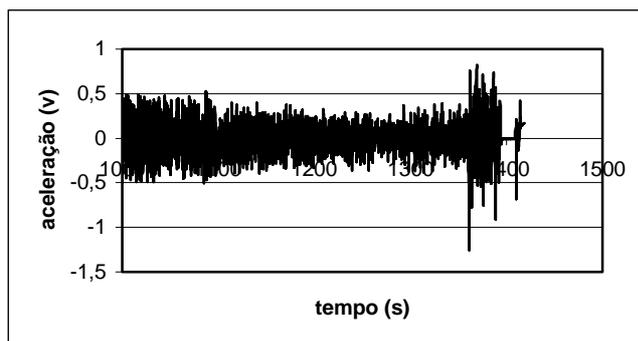


Figura 7. Resposta do acelerômetro sobre mancais do eixo árvore. Um dos métodos usados para identificação de início de “*scuffing*”.

Trabalhos futuros estão sendo realizados, no sentido de verificar a influência dos nitretos formados e da espessura de camada branca sobre a carga crítica de “*scuffing*”.

5. CONCLUSÕES

Deste trabalho pode-se concluir:

Nitretados em banho de sais apresentam maior eficiência no que diz respeito à carga de “*scuffing*” em relação às amostras nitretadas a gás. Isto pode ser devido à influência das fases formadas, da espessura da camada de compostos ou ainda da interação entre estes dois fatores.

O comportamento exponencial dos resultados sugere que o fenômeno é termicamente ativado. Sendo assim, a teoria de remoção de camadas protetoras moleculares (compostos adsorvidos nas superfícies) e atuação adesiva entre as superfícies é confirmada.

A partir de uma dada rotação de ensaio os sistemas tribológicos em estudo parecem atuar de forma idêntica, independente do tipo de tratamento utilizado, dos compostos formados e da espessura de camada branca (camada de compostos).

É possível identificar início de “*scuffing*” através de medição da aceleração dos mancais, o que mais uma vez fortalece a hipótese da natureza adesiva, para fenômeno de “*scuffing*”.

6. Agradecimentos

Agradecemos à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo apoio financeiro, concedido através da bolsa de doutorado do pesquisador Adelci M. Oliveira.

7. REFERÊNCIAS

HERSEY, M.D. Theory and Research in Lubrication – foundations for future developments. John Wiley & Sons, Inc, 1966. 487p. p. 320-367.

JIAJUN, L.; ZHIQIANG, L. and YINQIAN, C. The Study of Scuffing and Pitting Failure of Cam-Tappet Rubbing Pair. Wear, v.140, p.135-147, 1990.

KANG,S.C. and LUDEMA, K.C. The “Breaking-in” of Lubricated Surfaces. Wear, vol. 108, p.375-384, 1986.

LEE, S.C. and CHENG, H.S. Correlation of Scuffing Experiments with EHL Analysis of Rough Surfaces. Transactions of the ASME, v.113, p.318-326, 1991.

LEE, S.C. and CHENG, H.S. Scuffing Theory Modeling and Experimental Correlations. Journal of Tribology, v.113, p.327-334, 1991.

PARK, K.B. and LUDEMA, K.C. Evaluation of the Plasticity Index as a Scuffing Criterion. Wear, vol. 175, p. 123-131, 1994.

SOEJIMA, M. et al. Scuffing Characteristics of Cam and Tappet. Japanese Journal of Tribology, v. 40, n.8, p.761-775, 1995.

TORRANCE, A.A. and CAMERON, A. Surface Transformations in Scuffing. Wear, v.28, p. 299-311, 1974.

WILSON, W.R.D. and SHEU, S. Influence of Surface Topography on Viscoplastic Asperity Lubrication. Wear, p.311-325, 1988.