

AVALIACAO DAS CARACTERISTICAS DE SUPERFICIE E DO DESGASTE ABRASIVO DE REVESTIMENTOS APLICADOS EM HASTES DE CILINDROS HIDRAULICOS PELAS TECNICAS DE ASPERSAO (HVOF) E ELETRODEPOSICAO

R. M. Castro¹, A. S. Rocha², L. C. C. Cavaler¹, N. Z. Kejelin¹, F. M. Marques¹

Rua Pascoal Meller, 73 - CEP 88.805-380 - CP 362 - Criciuma - SC - Brasil.

e-mail: richard.castro@satc.edu.br

¹Departamento de Engenharia Mecânica |V Faculdade SATC

²Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) - UFRGS

RESUMO

Devido a necessidade de obtenção de uma superfície resistente ao desgaste e a oxidação, os cilindros hidráulicos são tradicionalmente revestidos com cromo duro eletrodepositado. Todavia, este tipo de revestimento apresenta uma redução gradual do coeficiente de atrito, interferindo diretamente na lubrificação da haste, ocasionando danos aos elementos de vedação e promovendo consequentes vazamentos. Outro apelo contrário a utilização do processo de revestimento com cromo e a presença, em elevados níveis, de cromo hexavalente Cr+6, apresentando alto poder cancerígeno e de contaminação ambiental. Atualmente, o processo de aspersão térmica de alta velocidade (HVOF - High Velocity Oxi-Fuel) se caracteriza como uma técnica de revestimento alternativa ao cromo duro, utilizando materiais compostos que propiciam baixas taxas de desgaste. Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho do revestimento WC-CoCr aspergido pelo processo HVOF, em comparação ao revestimento de cromo duro eletrodepositado, através das técnicas de análise microestrutural, ensaio de desgaste e medições de rugosidade.

Palavras-chave: Cromo duro, Aspersão térmica, HVOF, Desgaste, Cilindros hidráulicos.

1. INTRODUÇÃO

O desgaste é um dos grandes problemas encontrados nas indústrias em componentes que ficam submetidos a esforços de fricção, como por exemplo os cilindros hidráulicos. Esses componentes além de trabalharem da forma citada, ainda dependem da eficiência de filtração do fluido para que o desgaste não seja ainda mais acentuado pelos agentes contaminantes internos(1,2). Além desse meio contaminante, os cilindros hidráulicos estão sujeitos a contaminação externa, devido a ação linear que é produzida pela haste na movimentação das cargas, acarretando como consequência as fugas de óleo e a perda de sua eficiência. Há muito tempo a eletrodeposição de cromo duro tem sido uma prática comumente utilizada para proteger hastes de cilindros hidráulicos contra desgaste, corrosão e para dar uma melhor condição superficial, minimizando os efeitos de vazamento de óleo(3).

Existem vários processos que estão sendo avaliados e/ou aplicados como fontes alternativas para a cromagem, incluindo-se a deposição química e física de vapor (CVD - Chemical Vapor Deposition e PVD - Physical Vapor Deposition) e aspersão térmica. Estudos mostram que a

tecnica de aspercao termica ultrasonica (HVOF iV High Velocity Oxygen Fuel) vem sendo empregada na fabricacao de hastes hidraulicas, apresentando um aumento consideravel na vida util dos componentes que interagem com essa superficie(4). As tres ligas utilizadas em HVOF que são promissoras na substituicao do cromo sao: 83%WC-17%Co, 86%WC-10%Co-4%Cr e Tribaloy 400, 28% molibdenio, 8% cromo, 2.5% silicio e cobalto em equilibrio(5).

Basicamente ha duas razoes por tras das atividades para substituir o cromo duro como revestimento de componentes hidraulicos. O principal impulsionador e a restricao sobre os niveis permitidos de cromo hexavalente (Cr+6), altamente cancerigeno e em segundo lugar, a necessidade de uma consideravel melhoria na eficiencia dos componentes hidraulicos, aumentando a vida util dos elementos de vedacao e hastes(6). Para isso um bom revestimento deve cumprir tambem requisitos de acabamento, ou seja, a eficacia de um revestimento tambem esta condicionada aos parametros de rugosidade, como Ra, Rz e Rmax [μm] e com a area total de apoio da vedacao, chamado de parametro Rmr [%](7). Estudos mostram que para se obter um bom funcionamento das vedacoes sobre as hastes, um otimo Ra deve ter seu valor correspondente a 0,2 μm e um Rmr de 80 %(8).

2. MATERIAIS E METODOS

Visando-se estabelecer um comparativo quanto a microestrutura, resistencia ao desgaste, dureza e rugosidade entre os revestimentos, foram utilizados neste trabalho os processos de eletrodeposicao de cromo duro e, aspersao termica HVOF com material de adicao a base de carboneto de tungstenio (WC). Como substrato, foram fabricados corpos de prova (CP) em aco AISI/SAE 1045 de 50 mm de diametro, cuja composicao quimica esta apresentada na Tab. I.

Tabela I – Composição química do aço AISI/SAE 1045

Composicao Quimica (% em peso)						
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0,45	0,16	0,70	0,013	0,030	0,11	0,093

Foi preparado CP cilindricos de 30 x 30 mm para a analise metalografica e de microdureza conforme Fig. 1(a), atendendo os requisitos superficiais exigidos para a desposicao de cada revestimento. Para o ensaio de desgaste abrasivo e medições de rugosidade, foram feitos de acordo com a Tab. II e representados de acordo com a Fig. 1(b).

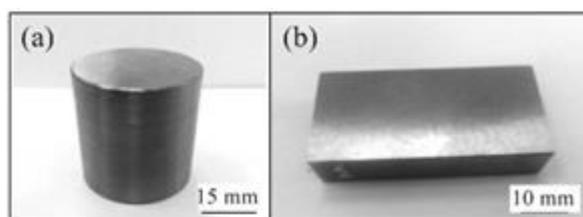


Figura 1 - Corpos de prova utilizados na caracterizacao dos revestimentos

Tabela II - CP utilizados no ensaio de desgaste e medicões de rugosidade

Quant.	Formato dos CP e revestimentos	Ensaio/medições
05	Retangular 11 x 25 x 52 mm (WC10Co4Cr)	Desgaste (ASTM G65) e Rugosidade
05	Retangular 11 x 25 x 52 mm (Cromo duro)	Desgaste (ASTM G65) e Rugosidade

Para atender as especificações quanto a deposição do revestimento aspergido, os substratos foram jateados com óxido de alumínio (Al₂O₃) granulometria 24 (mesh), conferindo um parâmetro de rugosidade (Ra) de 6,4 µm. Os revestimentos depositados pelo processo HVOF, foram fabricados utilizando-se o equipamento TAFAPRAXAIR JP-5000 iV modelo 5120, com pistola a b modelo JP5000. Os parâmetros de aspersão térmica estão expressos nas Tab. III e o material escolhido para a deposição foi o WOKA 3653 (86%WC-10%Co4%Cr), fabricado pela SULZER METCO.

Tabela III - Parâmetros da aspersão utilizados na deposição do WC-CoCr

Descrição	Unidades	Descrição	Unidades
Tamanho do canhão	152,4 mm	Pressão do oxigênio	9,7 ± 0,3 bar
Distância da pistola ao CP	305 mm	Vazão do oxigênio	72,59 l/h
Taxa de alimentação	90 g/min	Pressão do querosene	9,1 ± 0,3 bar
Pressão do nitrogênio	15 ± 1 bar	Vazão do querosene	23,2 l/h
Vazão do nitrogênio	311,48 ± 0,3 l/h	Pressão da combustão	7,0 ± 0,3 bar

Ao término do processo de deposição dos revestimentos, os corpos de prova foram submetidos ao processo de acabamento superficial de forma manual, através das técnicas de lixamento e polimento, para possivelmente adquirir uma rugosidade adequada ao uso em hastes de cilindros hidráulicos.

Após o processo de deposição e acabamento superficial, seguiu-se para a caracterização microestrutural dos revestimentos depositados, onde foram seccionadas os corpos de prova (Fig. 1a) para análise metalográfica e a obtenção dos perfis de microdureza Vickers HV0.01. Essas medições e imagens foram adquiridas com auxílio de um microduremetro modelo HMV-02 TADW - SHIMADZU, e as imagens foram capturadas com ampliações de 200x e 500x, empregando-se um microscópio óptico, modelo BX 51M iV OLYMPUS.

Com o objetivo de caracterizar as propriedades de resistência ao desgaste foi empregado o ensaio de desgaste por roda de borracha e areia (ASTM G65-00), através dos corpos de prova (Fig. 1b). Nesse ensaio, foram utilizados os parâmetros de acordo com a Tab.IV. A resposta frente ao desgaste (perda de volume) foi obtida conforme a norma ASTM G65, Eq.(A).

$$Perda\ de\ volume = \frac{perda\ de\ massa\ (g)}{densidade\ (g/cm^3)} \times 1000 [mm^3] \quad (A)$$

Tabela IV - Parametros do ensaio de desgaste

Dados do ensaio	Valores	Dados do ensaio	Valores
Diametro da roda de borracha	228,6 mm	Granulometria da areia	0,212 a 0,300 mm
Tempo do ensaio	30 min	Vazao de areia	(SiO ₂) 320 g/min
Rotacao da roda de borracha	200 rpm	Carga aplicada	130 N

As condicoes superficiais dos CP para a realizacao desse ensaio estao de acordo com a rugosidade Ra, denominado pela ASTM G-65, limitado em 0,8 μ m.

3. RESULTADOS E DISCUSSAO

As Fig. 2a e 2b apresentam uma sequencia de micrografias obtidas apos a analise por microscopia optica dos dois revestimentos estudados WC-CoCr e cromo duro, Fig. 3a e 3b respectivamente.

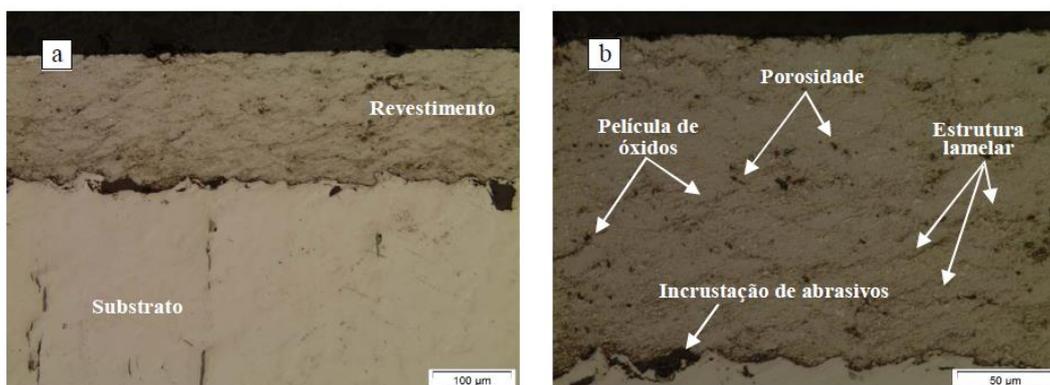


Figura 2 - Micrografias da camada aspergida com WC-CoCr por HVOF.
(a) ampliação de 200x e (b) ampliação de 500x

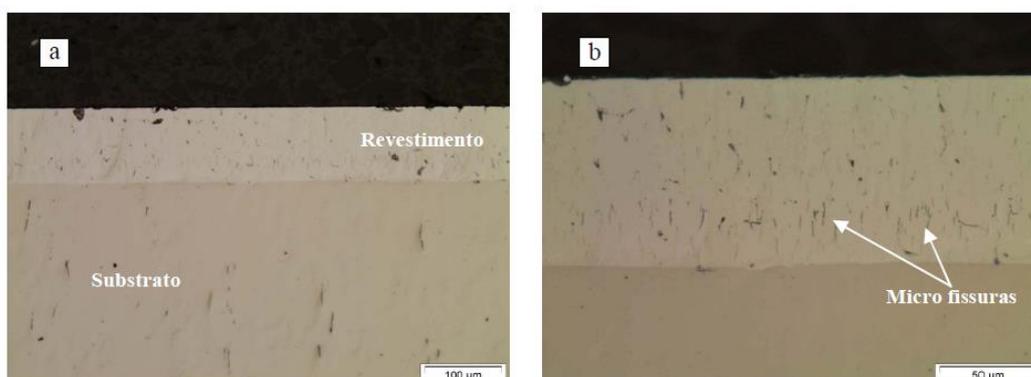


Figura 3 - Micrografias da camada de cromo duro eletrodepositado.
(a) ampliação de 200x e (b) ampliação de 500x

Em relação as microestruturas encontradas nos revestimentos de WC-CoCr depositadas por HVOF, foi possível observar a característica lamelar típica de revestimentos aspergidos, contendo em seu contorno uma discreta película de óxidos. Observa-se também que houve incrustações de partículas abrasivas, provavelmente oriundas do processo de jateamento.

O nível de porosidade indicado na Fig. 2b foi avaliado segundo um software de análise de imagem (Image-Tool). Os revestimentos a base de carboneto de tungstênio apresentam-se com uma porosidade média de 1,0 % com um desvio padrão de 0,26 %, estando de acordo com o critério especificado pelo fabricante SULZER METCO, (porosidade média menor que 1,0%).

Conforme as análises metalográficas, o revestimento de WC-CoCr apresentou espessura média de 167 μm , com desvio padrão de 7,05 μm . Por outro lado, o corpo de prova de cromo duro obteve uma espessura média de 101 μm com um desvio padrão de 3,65 μm , sugerindo que a manutenção da espessura é mais regular no processo de eletrodeposição de cromo duro. Estudos mostram que as espessuras dos revestimentos de cromo duro aplicados em hastes hidráulicas devem estar compreendidas entre 10 a 20 μm (9). Neste trabalho, optou-se pela utilização de espessuras de revestimentos da ordem de 100-150 μm com objetivos de: atender as condições do ensaio de desgaste, facilitar a análise da microestrutura e obter melhores resultados quanto a dureza de cada revestimento. Os resultados de microdureza Vickers são apresentados na Tab. V, para os revestimentos de WCCoCr, cromo duro e substratos.

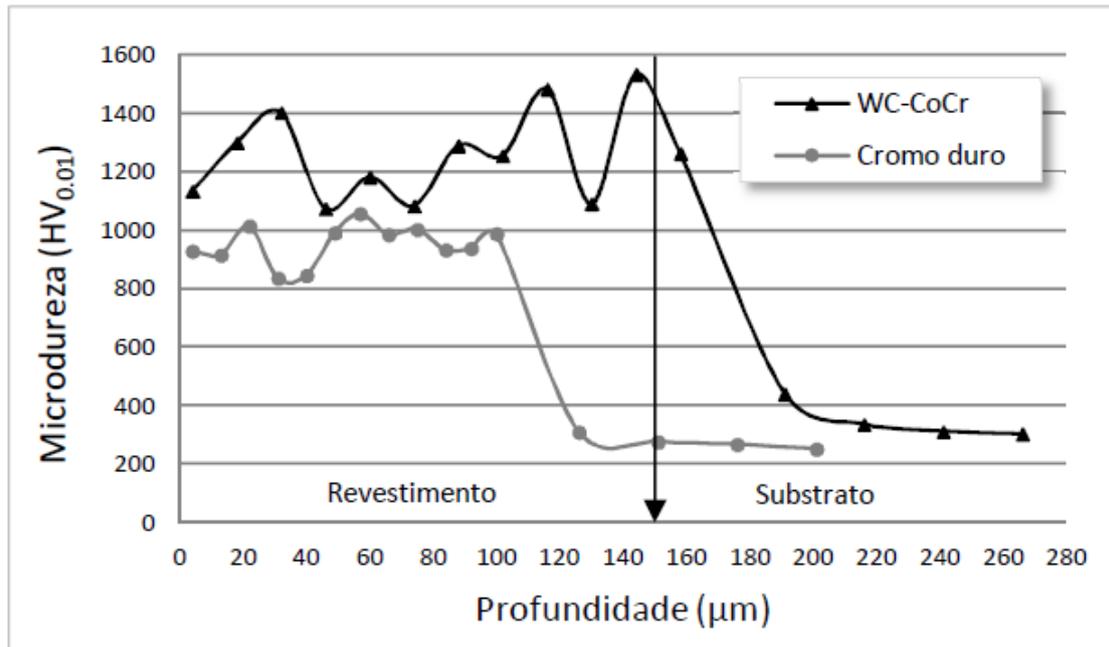
Tabela V - Resultados das medidas de microdureza Vickers

	Microdureza – seção transversal (HV0.01)			
	Aspersão térmica		Eletrodeposição	
	WC-CoCr	Substrato	Cromo duro	Substrato
Média	1256	346	952	275
Desvio Padrão	154,73	63,29	66,42	24,49

De acordo com os valores de microdureza ao longo da seção transversal do revestimento aspergido, verificou-se que houve variações devido a não uniformidade das fases, enquanto no cromo duro, por se tratar de um revestimento mais homogêneo, obteve-se um menor desvio padrão. É possível observar que quando se trabalha com subcamadas (revestimentos aspergidos), ocorre a não linearidade dos valores de microdureza, pois, cada ponto da indentação pode estar localizado em microestruturas diferentes, nesse caso, carbonetos, óxidos, inclusões e a própria matriz (Fig.4).

De acordo com algumas pesquisas, os revestimentos aspergidos com materiais a base de WC apresentam-se como compostos metais-cerâmicos, sendo que os valores de microdureza encontrados estão associados a cada microconstituente(7).

Figura 4 - Perfis de microdureza (HV0.01) nos CP de WC-CoCr e



Verifica-se ainda na Fig.4 que os valores de dureza do substrato são menores nos revestimentos eletrodepositados com cromo duro (275 HV) em relação aos revestimentos de WC depositados por HVOF (346 HV). Estima-se que esta significativa diferença de dureza entre os substratos esteja ocorrendo pelo processo de encruamento (oriundo do choque das partículas semi-fundidas do processo HVOF) ou mesmo por tempera localizada proveniente do elevado aquecimento. Na Tab. V é possível identificar as medições de microdureza feitas no substrato com o intuito de analisar a influência do método de deposição aplicado.

Na Fig. 5 é apresentado um corpo de prova de cada revestimento com marcas características típicas de desgaste em abrasômetro do tipo roda de borracha, os quais foram submetidos.

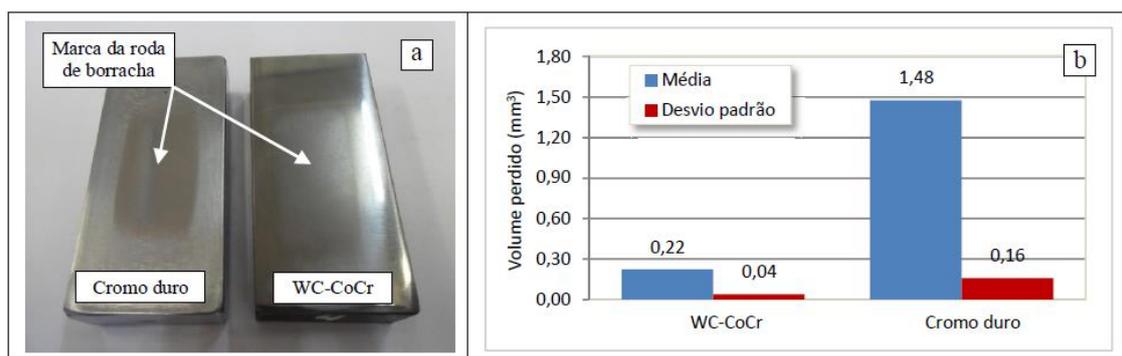


Figura 5 - Resultados do ensaio de desgaste. (a) Marcas características típicas do desgaste. (b) Comparativos do desgaste entre os revestimentos.

Observa-se que o corpo de prova revestido com cromo duro (Fig. 5a) apresenta uma condição visual de desgaste abrasivo mais acentuada em relação ao revestimento com WC-CoCr,

depositado por HVOF. A Fig. 5b apresenta um comparativo entre os volumes perdidos para os dois revestimentos. Verifica-se que o revestimento WC-CoCr apresentou um desempenho muito superior comparado ao cromo duro, resultando numa perda de volume de 0,22 mm³ contra 1,48mm³.

Apos o ensaio de desgaste, as marcas correspondentes da regio ensaiada foram submetidas as medicoes de rugosidade, afim de compara-las com as superficies nao ensaiadas, constatando quais dessas superficies, apos uma determinada condicao de trabalho, ainda resultara em um minimo acabamento exigido a superficie de vedacao (Tab. VI).

Revestimentos	Medição de rugosidade – CP			
	Média - antes do ensaio		Média – após o ensaio	
	Ra (µm)	Rmr (%)	Ra (µm)	Rmr (%)
WC-CoCr	0,12	93,57	0,17	80,29
Cromo duro	0,26	61,68	0,12	93,01

Tabela VI - Comparacoes dos parametros de rugosidade Ra e Rmr antes e apos o ensaio

Com os valores apresentados na Tab. VI, e possivel afirmar que apos os ensaios, o revestimento em WC-CoCr apresentou um melhor desempenho com relacao ao parametro Ra e Rmr, pois atenderam os melhores indices aplicados a superficies de vedacao(6). Ja a media dos CP de cromo duro, nao obtiveram bons resultados, quanto aos valores do parametro Rmr, entretanto, para o parametro Ra, o revestimento em cromo apresentou-se dentro dos valores considerados bons para superficies de vedacao.

4. CONCLUSAO

Os resultados confirmam que o revestimento WC-CoCr, pulverizados por HVOF, e uma alternativa confiavel comparado com o cromo duro eletrolitico, ou seja:

No processo de aspersao por HVOF, foram obtidas camadas com baixos niveis de porosidade (< 1,0%), com microdurezas elevadas, da ordem de 1250 HV0,01, justificando parametros adequados durante aspersao termica e o controle otimizado do processo;

Em particular, no ensaio feito conforme ASTM G65 (utilizando roda de borracha), os corpos de prova revestidos por HVOF, superaram os revestimentos por eletrodeposicao. Os ensaios executados nas mesmas condicoes, tiveram volumes perdidos de 0,22 mm³ e 1,47 mm³, para o WC-CoCr e o cromo duro respectivamente; Nas medicoes de rugosidade, a media dos CP de cromo duro nao obteve bons resultados, quanto aos valores do parametro Rmr, entretanto, para o parametro Ra, o revestimento em cromo duro apresentou dentro dos limites, adequados para superficies de vedacao;

5. AGRADECIMENTOS

Ao proprietario da industria metalurgica Rijeza LTDA Darlan Geremia, pela colaboracao dos materiais e equipamentos cedidos para a aspersao e a todas as pessoas que de certa forma

contribuíram para que esse trabalho fosse completamente efetuado, dando continuidade a pesquisa nas áreas da engenharia mecânica, materiais e fabricação.

6. REFERÊNCIAS

1. RABINOWICZ, E. Friction and wear of materials (2ed.). New York, USA: John Wiley, 1995.
2. LEITE, R. V. Estudo comparativo entre ligas resistentes ao desgaste abrasivo, aplicadas por soldagem em chapas metálicas para fabricação de placas antidesgastes. 2008, 95pg. Dissertação de Mestrado, UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais |V Belo Horizonte .
3. SARTWELL, B. D. Validation of HVOF thermal spray coatings as a replacement for hard chrome plating on hydraulic/pneumatic actuators. U.S. Department of Defense, Environmental Security Technology Certification Program (ESTCP) , Washington, US, 2006, 175p.
4. NUCCI, R. Avaliação da resistência ao desgaste de cermets depositados pelo processo de HVOF e do cromo duro eletrolítico. 2005, 97p. Dissertação de Mestrado, USP - Universidade de São Paulo, São Paulo .
5. DEGENNARO, T., & TWEED, G. ASTN - Aerospace Sealing Technologic News Air force evaluation of chrome rod alternative coatings. v.11, p. 3-4, 1999.
6. FLITNEY, B. Sealing Technology, Alternatives to chrome for hydraulic actuators. V.10, p. 8-12, 2007.
7. TRELLEBORG SEALING SOLUTION. Hidraulic Seals / Rod Seals. Catalogo de Produtos, Suecia. 2011.
8. STEEP, F., & WUSTENHAGEN, G. Sealing Technology. Counter surface hydraulic seals for heavy duty applications. V.12, p. 8-10, 2006.
9. LINSINGEN, I. V. Fundamentos de sistemas hidráulicos. 3ed. Editora UFSC. 399p. Florianópolis, 2008. EVALUATION OF SURFACE CHARACTERISTICS AND THE ABRASIVE WEAR RESISTANCE OF THE COATINGS APPLIED ON THE RODS OF THE HYDRAULIC CYLINDERS THROUGH TECHNIQUES OF THERMAL SPRAYING (HVOF) AND ELECTRODEPOSITION

ABSTRACT

To obtain a surface that is resistant to wear and oxidation, hydraulic cylinders are typically coated with hard chromium through the process of electroplating process. However, this type of coating displays a gradual reduction of the friction coefficient as the lubrication directly interferes with the shaft mechanism, which in turn causes damage to the sealing elements and promotes subsequent leakage. Another disadvantage in using the electroplated hard chromium process is the presence of high level hexavalent chromium Cr+6 which is not only carcinogenic, but also extremely contaminating to the environment. Currently, the alternative process of high-speed thermal spraying (HVOF - High Velocity Oxy-Fuel), as opposed to hard

chrome coating, uses composite materials (metal-ceramic) possessing low wear rates. This study aims to evaluate and compare the performance of hydraulic cylinder rods coated with WC-CoCr in the HVOF process, and those coated with electroplated hard chromium. Microstructural characterization techniques, wear tests, and measurements of roughness and profilometry will be used in this study. In conclusion, the sprayed coating will exhibit competitive and advantageous characteristics in contrast to those found in the electrodeposition of chromium, when these respective methods are applied to hydraulic cylinder rods.

Keywords: Hard Chrome, Thermal spray, HVOF, wear, hydraulic cylinders.