

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO ATRITO E DESGASTE PARA AÇO AISI H13 REVESTIDO PELO PROCESSO HVOF PARA FERRAMENTAS DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA ATRAVÉS DO ENSAIO DE PINO SOBRE DISCO

Vanessa Moura de Souza, moura.souza@ufrgs.br¹

Angela Selau Marques, angela_selau@ufrgs.br¹

Richard de Medeiros Castro, richard.castro@satc.edu.br²

Gustavo da Silva Gehlen, silva.gehlen@ufrgs.br¹

Alexandre da Silva Rocha, alexandre.rocha@ufrgs.br¹

Gelsa Edith, gelsaedith@ufrgs.br¹

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Av. Bento Gonçalves, 9500 – Agronomia, Porto alegre - RS

²Faculdade SATC, Pascoal Meler, 73 – Universitário, Criciúma - SC

Resumo: O desgaste é um dos fatores que mais causa falhas e redução na vida útil de ferramentas para a conformação mecânica, além de resultar em produtos de baixa qualidade, principalmente nas condições superficiais e nas questões dimensionais. A crescente demanda da indústria por menores custos, maior produtividade e melhor qualidade estão entre as principais justificativas para que se busquem maneiras de incrementar o desempenho destas ferramentas. Neste contexto, o trabalho teve como objetivo avaliar e caracterizar o desgaste e as condições de atrito de uma superfície fabricada em aço AISI H13, revestida através do processo de aspersão térmica oxicom bustível de alta velocidade (HVOF). Para isso, fez-se um estudo comparativo do comportamento do atrito com deposição por aspersão térmica de dois diferentes revestimentos. Foram depositados nesta superfície (substrato), os revestimentos Cr₃C₂-25NiCr e WC-10Co4Cr. Os ensaios de atrito e desgaste foram realizados através de um tribômetro do tipo pino sobre disco, em que os principais procedimentos são definidos na norma ASTM G99-04. Através deste ensaio foi realizada a avaliação e caracterização do aço ferramenta nos corpos de prova revestidos. As camadas aspergidas com Cr₃C₂-25NiCr e WC-10Co4Cr mostraram resultados satisfatórios quanto às análises avaliadas nessa pesquisa. Os dois materiais utilizados na asperção possuem boa resistência ao desgaste, o revestimento de WC-10Co4Cr apresentou um atrito 58% maior quando comparado com o Cr₃C₂-25NiCr. Porém, a perda de volume foi mais acentuada no revestimento com Cr₃C₂-25NiCr, aproximadamente $2,6 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$. Tais resultados trazem um indicativo de materiais e processos de fabricação alternativos para ferramentas utilizadas na área da conformação mecânica, mostrando um futuro promissor para sua aplicação na indústria, principalmente no que tange a resistência ao desgaste e atrito.

Palavras-chave: Desgaste, Aspersão térmica (HVOF), Revestimentos, Pino sobre Disco.

1. INTRODUÇÃO

As empresas necessitam de flexibilidade de produção, pois trabalham com uma grande variedade de produtos devido o dinamismo e a competitividade que mercado atual exige. Esta realidade, consequentemente influencia nas estratégias de trabalho sobre o uso das ferramentas utilizadas no processo de conformação mecânica. Uma dessas estratégias é a deposição de revestimentos metálicos, utilizados com intuito de melhorar as propriedades de resistência ao desgaste, em alguns casos a redução do coeficiente de atrito, tendo como objetivo o aumento da vida útil destas ferramentas (Huff, 2009).

Entre os principais fatores que acarretam de forma negativa a vida útil das ferramentas está o desgaste, que segundo o qual é definido como a perda de material da superfície em contato com a peça, quando submetidas ao movimento relativo (ASM, 2004). Em praticamente todos os ramos de engenharia encontram-se problemas relacionados ao desgaste. As perdas econômicas consequentes de desgastes não envolvem somente os custos de reposição, mas também os custos de depreciação de equipamentos, perdas de produção, de competitividade e de oportunidades de negócios (ASM, 1993).

A possibilidade de recuperar componentes, ou prepará-los para suportar melhor as condições de trabalho, são constantemente estudadas e novas técnicas são propostas, sempre no sentido de aumentar a vida útil e reduzir custos operacionais (Huff, 2009). Devido a isso se tornou necessário o desenvolvimento e o aperfeiçoamento de processos de deposição de revestimentos, incluindo-se a deposição química e física de vapor (CVD - Chemical Vapor Deposition e PVD - Physical Vapor Deposition) e revestimentos com laser (Nucci, 2005). Os processos de aspersão térmica também vêm se apresentando como técnicas promissoras na deposição de revestimentos, apresentando um aumento considerável na vida útil dos componentes que interagem com essa superfície. Estudos mostram que a técnica de aspersão térmica

ultrassônica (HVOF – High Velocity Oxygen Fuel) pode ser empregada tanto para a fabricação de novos revestimentos quanto para recuperação de componentes já em utilização (Pawlowski, 2008).

O processo de aspersão térmica por HVOF possui importantes vantagens em comparação com os outros processos de deposição, pois funciona através de uma pistola que proporciona mobilidade permitindo sua aplicação em peças com geometrias complexas e de diferentes tamanhos. Esta técnica chamada de aspersão térmica consiste em depositar uma fina camada de materiais metálicos ou não metálicos em uma condição fundida sob uma peça preparada, formando uma fina camada de depósito aspergido. Com isso é obtido um revestimento sobre a peça, conferindo proteção de natureza mecânica (desgaste), química (corrosão) e física (calor e eletricidade) (LIMA, 2007) e (CASTRO, 2012).

Neste estudo foi utilizado o método a aspersão térmica ultrassônica denominada por HVOF, em que o fluxo de gás é produzido pela mistura e ignição de oxigênio e combustível (gás ou líquido) em uma câmara de combustão, permitindo que o gás em alta pressão acelere através de um bico. É introduzido pó neste jato, onde ele é aquecido e acelerado em direção à superfície do componente que se deseja revestir, conforme mostra a Fig. (1-a). De acordo com Selvadurai (2015) e Pawlowski (2008), este tipo de revestimento com pulverização de partículas semifundidas a altas velocidades que variam de 400 a 1000 m/s, conforme mostra a Fig. (1-b) (OKSA, 2011), resulta em um revestimento bastante denso, com elevada aderência e baixos teores de óxidos. Ao final o resultado são finas plaquetas sobrepostas, oriundas do espalhamento das partículas do pó fundidas, ou semi-fundidas, através do impacto com o substrato. O revestimento é formado pela ocorrência do mesmo mecanismo nas camadas subsequentes, pois o tempo de solidificação é muito menor que o tempo de projeção das partículas, que é em torno de 10^{-2} s (FAUCHAIS, 2014).

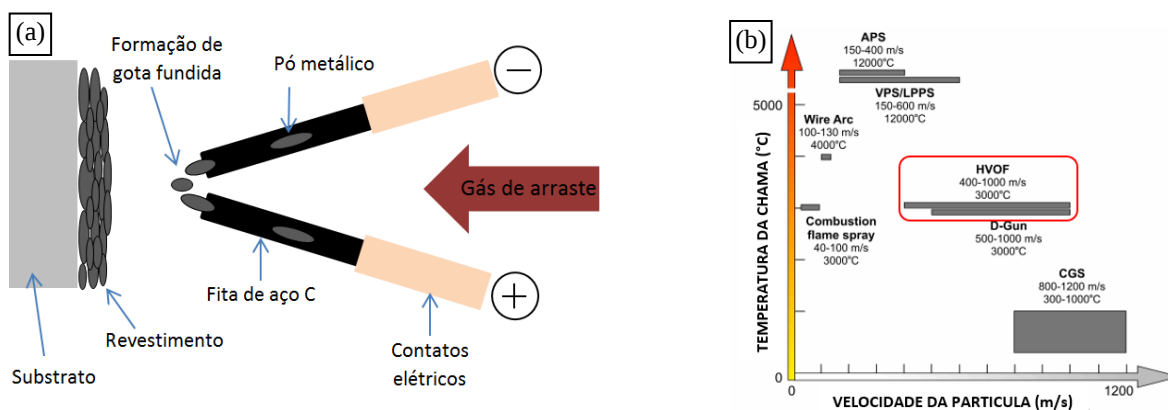


Figura 1. (a) Representação esquemática do princípio do processo de deposição por HVOF. (b) - Típicas temperaturas da chama e velocidade durante a aspersão térmica.

Com o objetivo de avaliar o desempenho dos revestimentos foi realizado o ensaio de pino sobre disco (ASTM G99-04), o qual fornece informações do atrito e da resistência ao desgaste sob condições de deslizamento, condição muito comum nas operações de forjamento, como por exemplo, um corpo deslizando sobre uma matriz.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Revestimentos dos corpos de prova

Os corpos de prova utilizadas no ensaio foram fabricados em aço AISI H13, pelo processo de usinagem convencional. As dimensões utilizadas para a realização dos ensaios tiveram um diâmetro de 60 mm com 15 mm de espessura. Após a fabricação das peças, foi realizado o tratamento térmico de têmpera e revenimento, de acordo com as especificações do material, atingindo a dureza de 51 HRC.

Com os corpos de prova devidamente preparados, foi realizado o processo de aspersão térmica HVOF. A deposição dos revestimentos foi realizada pela empresa Rijeza Metalurgia, e os revestimentos selecionados foram o $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25NiCr}$ e WC-10Co4Cr . Foi utilizado o equipamento TAFA JP 5000 HP/HVOF System Modelo 5120, da fabricante PRAXAIR e uma pistola TAFA GUN Model 5220. A Fig. (2) apresenta o processo de deposição dos corpos de prova.

O processo de aspersão térmica oxicombustível de alta velocidade, pode ter seus ajustes realizados de diversas maneiras, feito com base no que se espera como, espessura de camada, estrutura lamelar, porosidade, entre outros. Para este estudo utilizou-se os parâmetros apresentados conforme a Tab. (1):

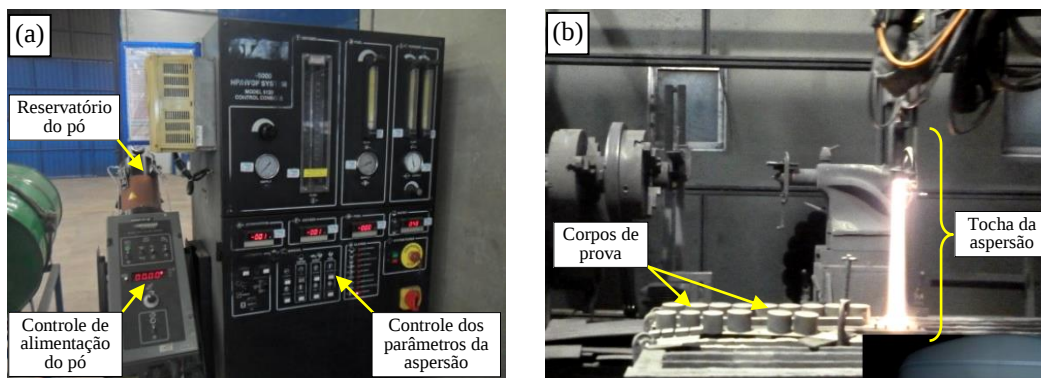


Figura 2. Aspersão térmica HVOF. (a) equipamentos e controle e (b) deposição nos corpos de prova

Tabela 1. Parâmetros utilizados no processo de aspersão térmica HVOF

Descrição	Valores	Descrição	Valores
Taxa de alimentação	$1,33 \times 10^{-3}$ kg/s	Vazão de nitrogênio	15 ± 4 scfh
Tamanho do canhão	0,15 m	Pressão de ar comprimido	116 PSI
Pressão de oxigênio	136 ± 5 PSI	Distância da pistola ao corpo de prova	0,3 m
Vazão de oxigênio	2000 scfh	Ângulo da pistola c/ corpos de prova	90°
Pressão de combustível	120 ± 10 PSI	Velocidade de deslocamento da pistola	0,85 m/s
Vazão de combustível	6 gph	Camada esperada	2×10^{-4} m
Pressão de nitrogênio	70 PSI		

Fonte: Rijeza Metalurgia, 2016

Na Tab. (2) são apresentadas informações referente dos pós utilizados para compor os revestimentos aplicados nas amostras, segundo a certificação do material fornecido pela Oerlikon Metco.

Tabela 2. Características e propriedades dos revestimentos de carboneto de cromo e de tungstênio

Principais informações comerciais		
Classificação	Carbonetos a base de Cromo	Carbonetos a base de Tungstênio
Composição química	Cr3C2 25(Ni 20Cr)	WC10Co4Cr
Manufatura	Aglomerado e sinterizado	Sinterizado e comprimido
Morfologia	Esferoidal	Angular/blocos
Densidade aparente	2.3 a 3.1 g/cm ³	4,8 a 5,0 g/cm ³
Temp. de serviço	<870 °C	≤ 500 °C

Fonte: OERLIKON, 2016

O modo de fabricação determina a morfologia dos pós e ela pode variar de acordo com o fornecedor. Essa característica tem grande influência na troca de calor entre as partículas e os gases de combustão, pois os pós são diferenciados pela área de troca de calor e capacidade de absorver a energia térmica. A morfologia dos pós é também determina a estrutura lamelar pela forma com que as partículas se adaptam ao se chocarem com o substrato, distribuindo-se homogeneamente as fases duras, formando por fim a estrutura da camada (YILBAS, AL-ZAHARNAH e SAHIN, 2014).

2.1. Ensaio de pino sobre disco e medição da trilha de desgaste

A norma que regulamenta este ensaio é designada pela ASTM como G99-04. Esta norma fornece um método padronizado, em nível de laboratório, para a realização dos ensaios de desgaste de materiais, durante o deslizamento, usando a configuração pino sobre disco. Na Fig. (4) pode-se visualizar de forma esquemática o equipamento de ensaios, bem como seus respectivos componentes utilizados no ensaio.

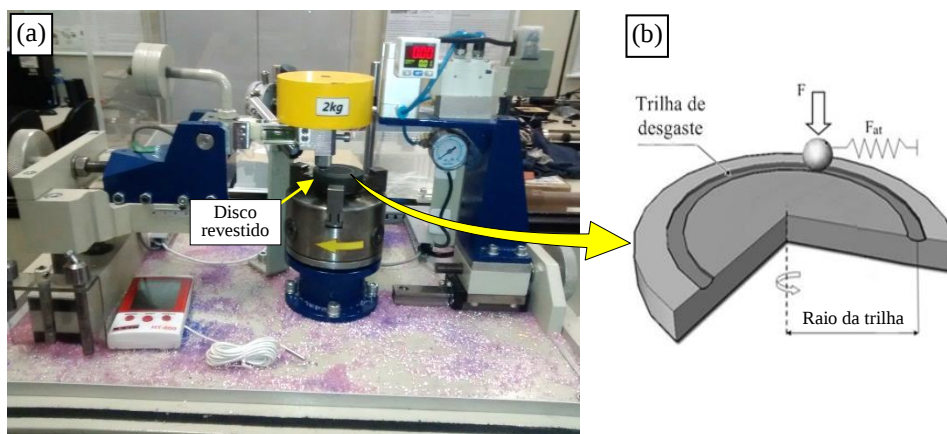


Figura 3. Caracterização do atrito: (a) tribômetro do tipo pino sobre disco e (b) Imagem da trilha

Para execução desse ensaio foi utilizado uma esfera de cerâmica (Al_2O_3) de 6 mm, com dureza média de 1528 HV, aplicando uma força normal (F) de 30N, conforme indica a norma ASTM G99-04. Durante o ensaio a velocidade linear produzida foi de 0,47 m/s num raio de 18 mm, com um percurso total de 1000 m. Para cada revestimento foram realizados três ensaios. As medidas de largura, profundidade das trilhas de desgaste, e consequentemente a perda de volume dos revestimentos produzido por este ensaio de atrito foram obtidas mediante a mediação por perfilometria.

O ensaio de perfilometria foi realizado no laboratório de Laser e Ótica do IF – Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). O equipamento utilizado foi um perfilômetro modelo XP-2 do fabricante Ambios Technology. Os parâmetros empregados neste ensaio foram os seguintes: comprimento de varredura de 2 mm, velocidade de 0,5 m/s e carga de 0,1 mg.

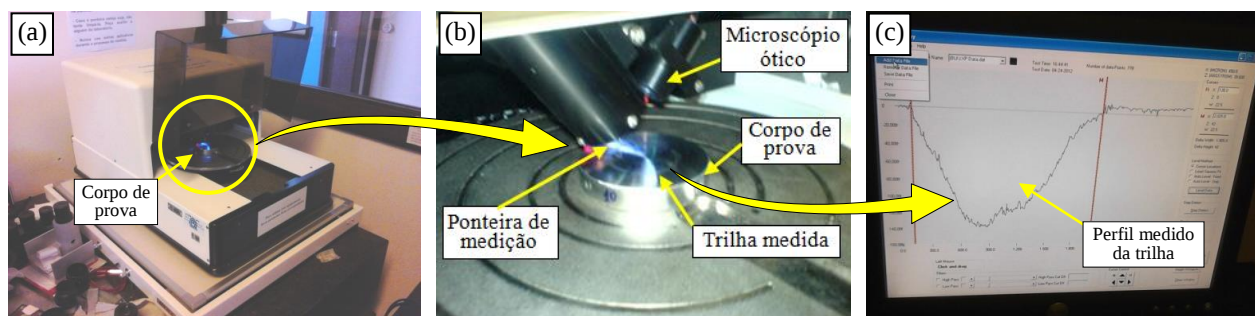


Figura 4. Medição da trilha de desgaste. (a) perfilômetro, (b) corpo de prova e (c) software do perfilômetro

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Microestrutura dos revestimentos

Através de análises obtidas pela técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), foi possível verificar a morfologia dos grãos e a diferença no formato das partículas que compõem os dois materiais utilizados na aspersão. Verificou-se que ambas possuem formas de partículas esféricas e grãos com dimensões variadas. A morfologia do pó de Cr_3C_2 -25NiCr apresenta uma estrutura no formato de esfera semi oca com porosidades tipo concha, com partículas mais espaçadas. Contudo, o pó WC-10Co4Cr trata-se de um grão poroso e mais denso e bem distribuído o que consequentemente formará uma melhor camada aspergida devido as partículas mais densas e homogêneas que se espalharão melhor na superfície. A Fig. (5) apresenta as características morfológicas do Cr_3C_2 -25NiCr e do WC-10Co4Cr.

Os revestimentos aplicados por aspersão térmica são caracterizados por superposição de partículas achatadas e podem apresentar um alto grau de porosidade. A porosidade consiste em cavidades, as quais podem estar isoladas ou interconectadas (Schiefler, 2004). Com isso, obteve-se nas amostras revestimentos com porosidades variáveis, que estão relacionadas aos parâmetros de cada processo de aspersão térmica como: temperatura da chama, gás de transporte, velocidade das partículas, distância pistola/substrato e qualidade do substrato a ser revestido. A porosidade afeta diretamente propriedades físicas como condutividades elétrica e térmica, diminui a coesão das camadas e sua aderência ao substrato (Brasil, 2003). Para analisar a topografia da superfície utilizou-se a microscopia eletrônica de varredura (MEV). A Fig. (6) (a) e (c) apresenta a topografia dos corpos de prova, após a realização da aspersão térmica por HVOF e do processo de lixamento para os revestimentos de $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25NiCr}$ e WC-10Co4Cr , respectivamente.

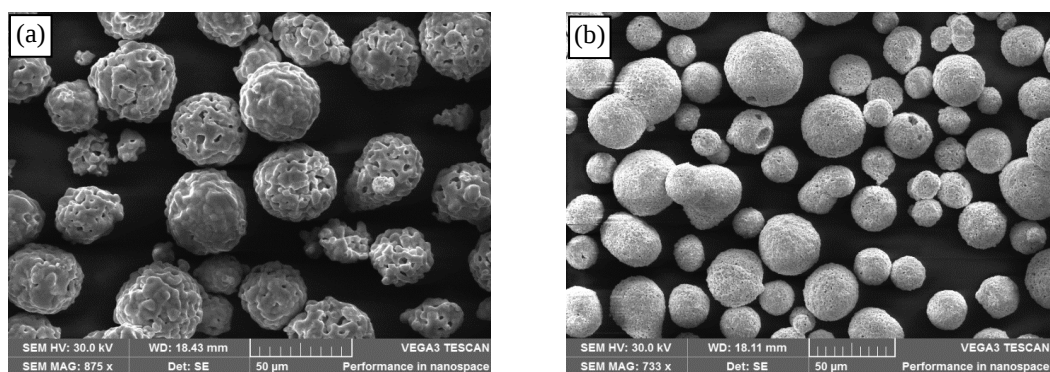


Figura 5. Morfologia do pó utilizado no revestimento. (a) $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25NiCr}$ (b) WC-10Co4Cr .

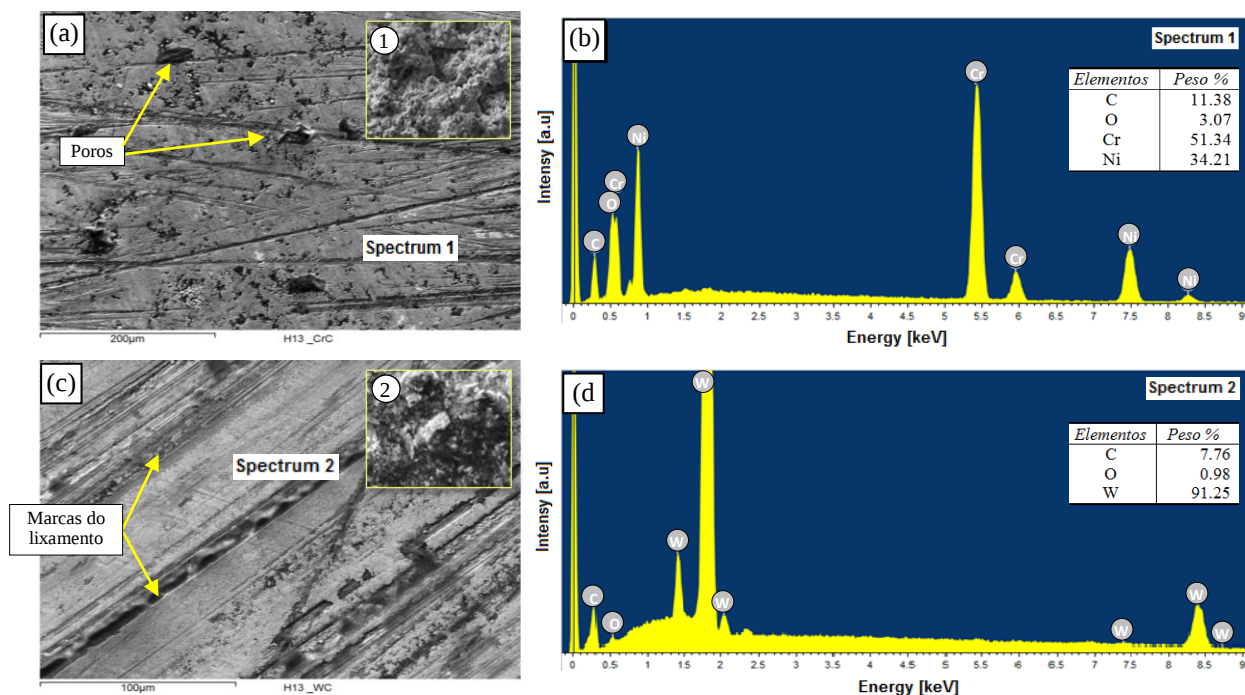


Figura 5. Micrografia obtida por MEV e análise por EDS: (a) e (b) $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25NiCr}$ e (c) e (d) WC-10Co4Cr

A análise por EDS sobre a superfície polida identifica, os elementos químicos que compõem o revestimento na região analisada. Verifica-se no Spectrum 1 que o Cr e o Ni são elementos predominantes, no Spectrum 2 tem-se o elemento W de forma predominante, ambos confirmam que a camada possui os elementos esperados.

Os dois tipos de revestimentos mostram estruturas muito semelhantes, porém com uma irregularidade maior no revestimento a base de cromo ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25NiCr}$), Fig. (6) (a) - ponto 1). Também se observa que o revestimento WC-10Co4Cr apresenta uma estrutura com maior densidade (Fig. (6) (c) - ponto 2). ZANG, *et al.*(2015), descreve que isso ocorre devido ao processo de pulverização, ou seja, as pequenas partículas foram completamente fundidas, depois arrefecidas rapidamente quando depositadas no substrato. Alguns poros são observados no topo dos revestimentos a base de cromo e níquel (Fig. (6) (a)). Nenhuma fissura evidente é observada nos revestimentos, mostrando que o processo de preparação da superfície e de deposição foram realizados com sucesso, apenas marcas do processo de lixamento utilizado na preparação para a realização do ensaio de atrito Fig. (6) (c).

Após a deposição dos revestimentos foram realizadas as medições de rugosidade e posteriormente seccionado os corpos de prova na direção transversal, com intuito de avaliar a espessura da camada de cada revestimento. Na Fig. (7) são apresentadas as micrografias ópticas da secção transversal para ambos os revestimentos.

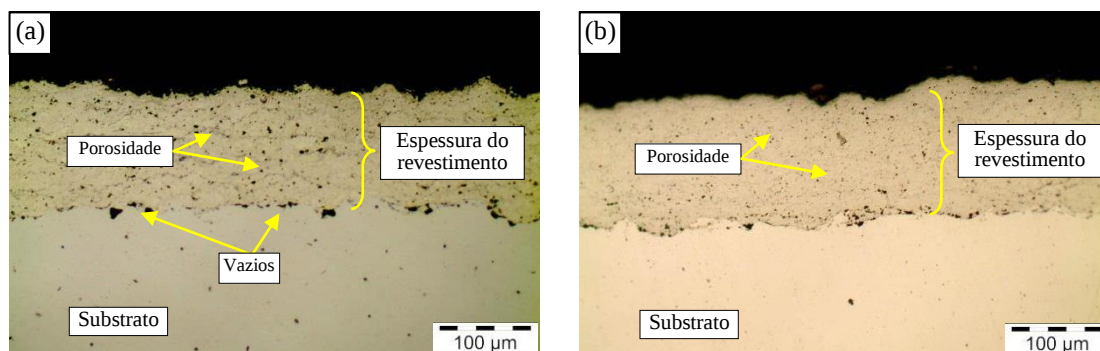


Figura 7. Microestrutura dos revestimentos. (a) $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}25\text{NiCr}$ e (b) $\text{WC-}10\text{Co}_4\text{Cr}$

No corpo de prova revestido com $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}25\text{NiCr}$ a camada ficou com uma espessura média de $118,3 \mu\text{m}$ e rugosidade R_a média de $2,13 \mu\text{m}$ e para a corpo de prova revestido com $\text{WC-}10\text{Co}_4\text{Cr}$ a espessura média da camada foi de $122 \mu\text{m}$ e a rugosidade média esteve na ordem de $3,07 \mu\text{m}$. Estes dados são importantes a serem obtidos pois influenciam diretamente no resultado do desgaste das ferramentas quando em operação. A Fig. (7) (a) e (7) (b) é possível visualizar que ambos os revestimentos apresentam pontos de porosidade característicos do processo de aspersão térmica, porém o revestimento $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}25\text{NiCr}$, apresentou uma maior concentração de porosidade e de defeitos superficiais. Além disso, medições de dureza foram realizadas, com intuito de verificar o revestimento de maior dureza. Na Fig. (8) são apresentados os resultados da dureza superficial dos revestimentos avaliados.

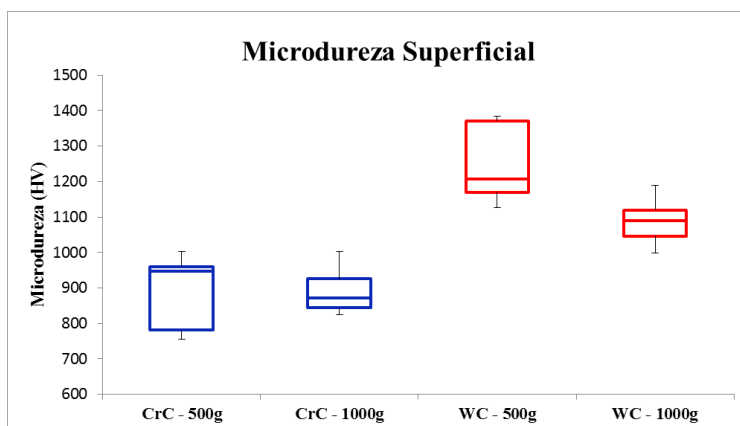


Figura 8. Microdureza Superficial das amostras revestidas com $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}25\text{NiCr}$ e $\text{WC-}10\text{Co}_4\text{Cr}$

A amostra revestida com $\text{WC-}10\text{Co}_4\text{Cr}$ apresenta dureza superficial maior em ambas as cargas testadas. Além disso, observa-se que para a carga mais elevada o valor médio de dureza é menor. Segundo Wu et al (2015), isso acontece porque a endentação engloba um volume maior de material dificultando a penetração do material. A elevada porosidade, característica deste revestimento, também contribui para este resultado.

3.2. Resultados de atrito e desgaste

Em função da elevada rugosidade apresentada pelo processo da aspersão térmica foi realizado o lixamento na superfície dos revestimentos para atender os requisitos dos ensaios da ASTM G99 ($R_a = 0,8 \mu\text{m}$), ou no caso de uma aplicação real, como por exemplo, ferramentas para forjamento, o atrito seria muito elevado e consequentemente contribuiria no deslocamento do revestimento, durante o contato com a peça. Através dos resultados obtidos dos ensaios realizados pelo tribômetro do tipo de pino sobre disco, gerou-se os gráficos de coeficiente de atrito para o revestimentos de $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}25\text{NiCr}$ e $\text{WC-}10\text{Co}_4\text{Cr}$ no aço AISI H13. Pode-se visualizar na Fig. (9) que os valores de coeficiente de atrito foram levemente diferentes.

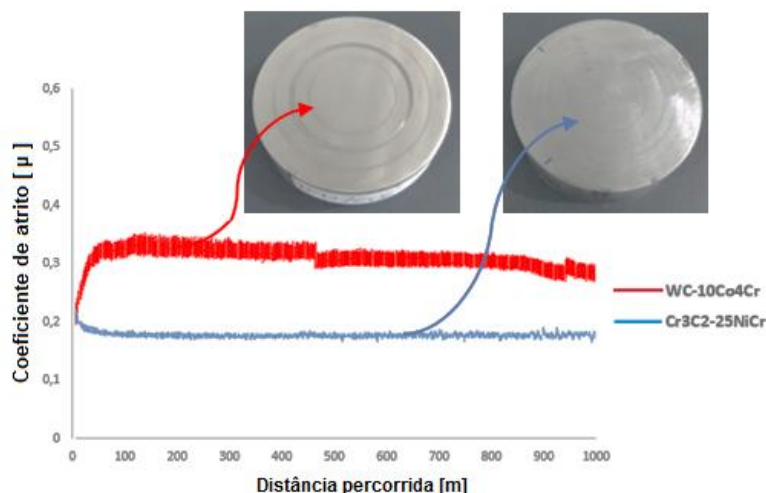


Figura 9. Coeficiente de atrito dos revestimentos de $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}25\text{NiCr}$ e $\text{WC-}10\text{Co}_4\text{Cr}$

O revestimento $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}25\text{NiCr}$ apresentou um valor médio para o coeficiente de atrito de $0,18 \mu\text{m}$, no entanto o revestimento de $\text{WC-}10\text{Co}_4\text{Cr}$ foi de $0,31 \mu\text{m}$, estes resultados foram obtidos através da trilha central. Nestas superfícies não foi possível ver uma relação direta com a velocidade de deslizamento recíproco com o coeficiente de atrito. Todavia, nos corpos de prova de $\text{WC-}10\text{Co}_4\text{Cr}$ é possível observar oscilações nas curvas, o que pode caracterizar a adesão de alumina na superfície durante o ensaio e formação de partículas de terceiro corpo. De acordo com Menezes, *et al* (2013) e Heirichs (2011), a alta plasticidade deste material também favorece esse fenômeno de adesão durante o deslizamento. Babu, *et al.* (2009) diz que a adesão neste revestimento pode ser atribuída à sua estrutura, que encrua rapidamente e reage com as ferramentas. Para Vashishtha, *et al.* (2017), a justificativa para um menor coeficiente de atrito para o revestimento $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}25\text{NiCr}$ é devido a formação de óxidos, que formam uma película fina de baixa resistência ao cisalhamento, resultando em uma diminuição no coeficiente de atrito.

O perfil de desgaste das trilhas formadas no ensaio de pino sobre disco foi analisado através do *software* True Surf®. Por tratar-se de um revestimento de elevada dureza, as trilhas formadas são muito superficiais, não apresentando profundidade suficiente para gerar uma cavidade aparente nos corpos de prova, diante disso a escala utilizada foi alterada para a escala em nanômetro (nm). Os picos e vales característicos deste revestimento também dificultam a identificação da trilha. A Fig. (10) apresenta um conjunto de imagens produzidas pelo perfilômetro.

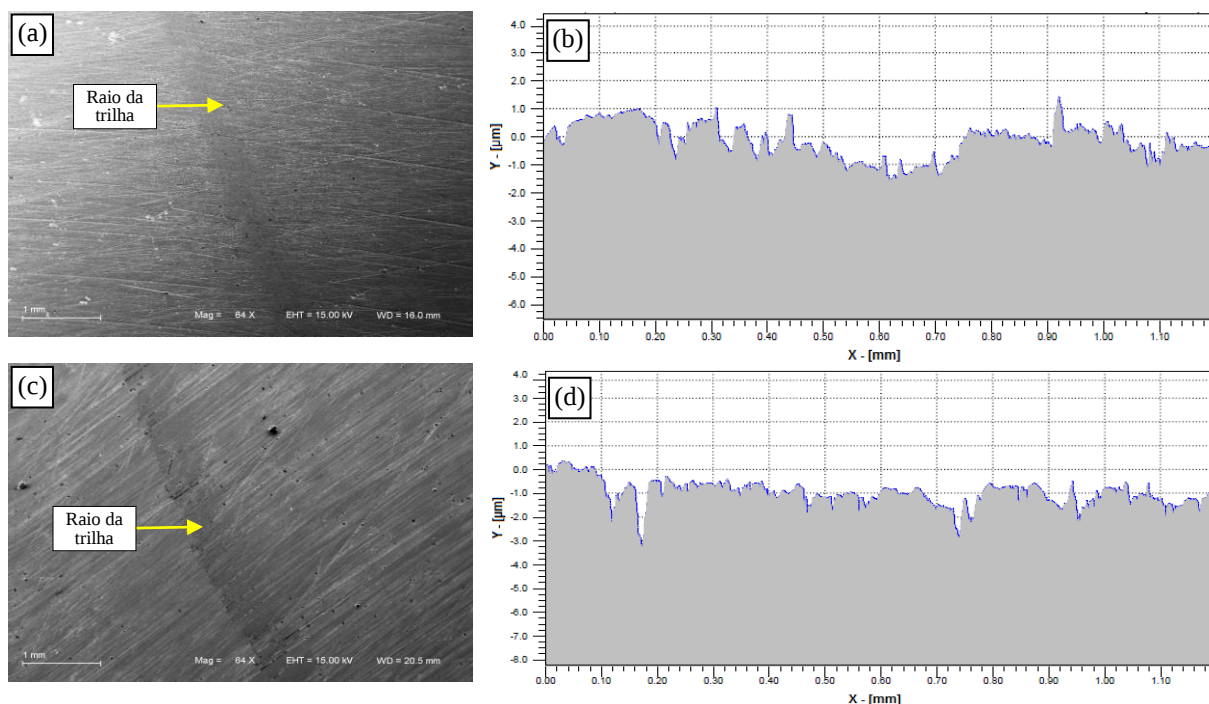


Figura 10. Trilhas de desgaste: (a) $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}25\text{NiCr}$, (b) perfil da trilha de $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}25\text{NiCr}$, (c) $\text{WC-}10\text{Co}_4\text{Cr}$, (d) perfil da trilha de $\text{WC-}10\text{Co}_4\text{Cr}$

O gráfico apresentado na Figura 11 mostra os perfis de deslocamento na superfície das amostras. Percebe-se que a amostra revestida com WC-10Co₄Cr não forma uma trilha com profundidade aparente, impossibilitando mensurar o volume perdido. Todavia, na amostra revestida com o Cr₃C₂-25NiCr forma-se uma cavidade que, apesar de muito superficial, possibilita o cálculo.

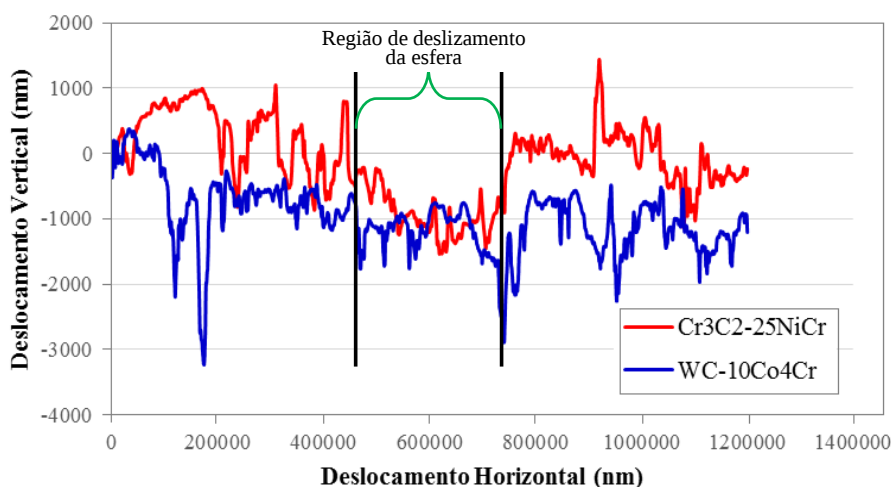


Figura 11 - Perfilometria das trilhas desgastadas após ensaios de pino sobre disco

Para calcular o volume de material perdido na trilha do revestimento de Cr₃C₂-25NiCr utilizou-se o modelo matemático especificado pela norma ASTM G99 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM), 2000), no qual a perda de volume (em mm³) é dada pela Equação 1. A largura da trilha (0,6mm) foi determinada pelo software ImageJ.

$$\begin{aligned} \text{Perda de volume} &= \frac{\pi (r_1 \times l)^3}{6(r_2)} \\ \text{Perda de volume} &= \frac{\pi 0,07\text{mm} \times (0,6\text{mm})^3}{6(3\text{mm})} \\ \text{Perda de volume} &= 2,6 \cdot 10^{-3} \text{mm}^3 \end{aligned} \quad (1)$$

Onde:

- r1 = raio da trilha
- l = largura da esfera
- r2 = raio da esfera

É possível observar que ambas as trilhas, possuem um aspecto espalhado. A trilha gerada no revestimento de WC-10Co₄Cr apresentou uma menor penetração, isso se deve em função das características do revestimento, como dureza, porosidade, composição química do mesmo e densidade dos revestimentos, tendo em vista que o material das esferas utilizadas no ensaio foram as mesmas. Holm (1981) atribui o desgaste à remoção de partículas ou camadas em nível atômico, o desgaste ocorre na junção fraturada pelo cisalhamento durante o movimento friccional entre os corpos, relacionando assim o desgaste com a área de contato real entre as superfícies. Este conceito explica porque a trilha de WC-10Co₄Cr, que apresentou um maior coeficiente de atrito, possui menor desgaste que a trilha do revestimento de Cr₃C₂-25NiCr. A elevada rugosidade provocou remoção dos picos presentes na superfície da amostra revestida com WC-10Co₄Cr, aumentando o atrito inicial, porém, após a remoção dos elementos mais frágeis do revestimento não houve mais remoção de material, principalmente em função da dureza deste revestimento ser maior que dos corpos de prova revestidas com Cr₃C₂-25NiCr.

4. CONCLUSÃO

Através dos resultados obtidos, após os ensaios realizados e devido aos parâmetros de aspersão empregados no processo, pode-se concluir que os revestimentos de Cr₃C₂-25NiCr e WC-10Co₄Cr sobre o substrato de aço AISI H13 apresentaram-se morfologicamente bem constituídos e contribuem significativamente para a diminuição do desgaste superficial. Através do MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura), os revestimentos mostraram-se satisfatoriamente homogêneos, sem a presença de defeitos, como trincas e/ou micro trincas, e com porosidade baixa. Em relação ao coeficiente de atrito, o revestimento de WC-10Co₄Cr apresentou um valor aproximadamente 58% maior quando comparado com o revestimento de Cr₃C₂-25NiCr. Contudo, a perda de volume foi mais acentuada para o revestimento

de Cr_3C_2 -25NiCr, isso se deve em função da menor dureza deste revestimento. Para o revestimento de WC-10Co4Cr, que apresentou uma elevada dureza, não houve perda de volume significativa para efetuar o cálculo. As camadas aspergidas com Cr_3C_2 -25NiCr e WC-10Co4Cr apresentaram resultados satisfatórios quanto às análises estudadas nesse trabalho, mostrando possuir um futuro promissor para sua aplicação em componentes da indústria, principalmente no que tange a resistência ao desgaste e atrito conferidos ao substrato.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a empresa Rizeja de São Leopoldo pela disponibilidade para realização dos testes e análises. Assim como ao CNPq, pelas bolsas disponibilizadas nos processos 311348/2015-7, 132972/2015-8 e 143287/2016-8.

6. REFERÊNCIAS

- ASM Internacional, “Handbook of Thermal Spray Technology”. Ed. J. Davis. Detroit, USA, 2004. 329p.
- ASM International. ASM Handbook. Volume 18 - “Friction, Lubrication and Wear Technology”. Ed. Cotell, 4 ed., Vol. 18. Detroit, USA, 1993, 1879p. p. 85 – 87.
- Babu, S.; Ribeiro, D.; Shivpuri, R., 2009. “Material and Surface Engineering for Precision Forging Dies”. National Center for Manufacturing Sciences – Ohio. 146 p.
- Brasil, F., 2003, “Estudo de Corrosão sob Tensão em Tubos de Aço Inoxidável AISI 304 L, Aspergidos Termicamente com Alumínio por Arco Elétrico”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná-UFPR, Curitiba/ PR.
- Castro, R., 2012, “Avaliação das Propriedades de Superfície e do Comportamento ao Desgaste Abrasivo de Hastes de Cilindros Hidráulicos Revestidas pelos Processos HVOF e Cromo Duro Eletrodepositado”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS/PPGE3M, Porto Alegre/RS, Brasil.
- Fauchais, P. L.; Heberlein, J. V. R.; Boulos, M. I. **Thermal spray fundamentals**. New York: Springer, 2014.
- Heirichs, J.; Jacobson, S., 2011, “The Influence from Shape and Size of Tool Surface Defects on the Occurrence of Gallings in Cold Forming of Aluminium”. Wear, Volume 271, pp. 2517–2524.
- Huff, J. A., 2009, “Avaliação do Desempenho de Matrizes para Forjamento a Quente Revestidas por Carboneto de Cromo Através do Processo HVOF”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS/PPGE3M, Porto Alegre/RS, Brasil.
- Lima, C. C., & Trevisan, R., 2007, “Aspersão Térmica - Fundamentos e Aplicações”. Ed. Artliber, São Paulo, 152 p.
- Menezes, P. L.; Ingole, S. P., Nosonovski, M., Kailas, S. V., Lovel, M. R., 2013, “Tribology for Scientists and Engineers”. Ed. Springer, New York, 948 p.
- Nucci, R., 2005, “Avaliação da Resistência ao Desgaste de Cermets Depositados pelo Processo de HVOF e do Cromo Duro Eletrolítico”, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo-USP, São Paulo, Brasil.
- Oksa M., Turunen E., Suhonen T., Varis T., Hannula S., 2011, “Optimization and Characterization of High Velocity Oxy-fuel Sprayed Coatings: Techniques, Materials, and Applications”. Ed. Coatings, Finland, p. 17-52
- Pawlowski, L., 2008, “The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings”, Ed. John Wiley & Sons, 2ª ed., England, 647 p.
- R. Holm., 1981, “Electric Contacts: Theory and Applications”. Ed. Springer, 4th edition, Berlin, Germany, 482 p.
- Schiefler, M., 2004, “Estudo Microestrutural e Eletroquímico de Revestimentos Metálicos Depositados por Aspersão Térmica”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis/SC, Brasil.
- Selvadurai, U., 2015, “Influence of the Handling Parameters on Residual Stresses of HVOF-sprayed WC-12Co Coatings”, Surface & Coatings Technology, Vol. 268, pp. 30-35.
- Vashishtha, N.; Khatirkar, R.K.; Sapate, S.G., 2017, “Tribological Behaviour of HVOF sprayed WC-12Co, WC-10Co-4Cr and Cr_3C_2 -25NiCr Coatings”, Tribology International, Vol. 105, pp. 55-68.
- WU, Y. S. et al. Microstructure and sliding wear behavior of nanostructured Ni60–TiB2 composite coating sprayed by HVOF technique. Surface & Coatings Technology, n. 206, p. 1102-1108, 2011.
- Zhang, W.; Liu, L.; Zhang, M.; Huang, G.; Liang, J.; Li, X.; Zhang, L., 2015, “Comparison Between WC-10Co4Cr and Cr_3C_2 -25NiCr Coatings Sprayed on H13 Steel by HVOF”, Transactions Nonferrous Metals. Society of China, Vol. 25, pp. 3700-3707.
- Yilbas, B. S.; Al-zaharnah, I.; Sahin, A. Flexural testing of weld site and hvof coating characteristics. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2014.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

ANALYSIS OF THE FRICTION AND WEAR BEHAVIOR FOR AISI H13 STEEL COATED BY THE HVOF PROCESS FOR METAL FORMING TOOLS THROUGH THE PIN-ON-DISC TESTING

Vanessa Moura de Souza, moura.souza@ufrgs.br¹

Angela Selau Marques, angela_selau@ufrgs.br¹

Richard de Medeiros Castro, richard.castro@satc.edu.br²

Gustavo da Silva Gehlen, silva.gehlen@ufrgs.br¹

Alexandre da Silva Rocha, alexandre.rocha@ufrgs.br¹

Gelsa Edith, gelsaedith@ufrgs.br¹

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Av. Bento Gonçalves, 9500 – Agronomia, Porto alegre - RS

²Faculdade SATC, Pascoal Meler, 73 – Universitário, Criciúma - SC

Abstract: Wear is one of the factors that cause the most failures and reduction of tool life for metal forming, as well as resulting in poor quality products, mainly in surface conditions and dimensional issues. The increasing demand of the industry for lower costs, higher productivity and better quality are among the main justifications for finding ways to increase the performance of these tools. In this context, the objective of this work was to evaluate and characterize the wear and friction conditions of a surface made of AISI H13 steel, coated by high speed oxy-fuel thermal spraying (HVOF). For this, a comparative study of the friction and wear behavior with thermal spray deposition of two different coatings was carried out. Cr3C2-25NiCr and WC-10Co4Cr coatings were deposited on this surface (substrate). The friction and wear tests were performed through a pin-to-disk type tribometer, where the main procedures are defined in ASTM G99-04. Through this test the evaluation and characterization of the uncoated tool steel and the coated specimens were carried out. The deposited layers with Cr3C2-25NiCr and WC-10Co4Cr presented satisfactory results regarding the analyzes evaluated in this research, bringing an indication of materials and alternative manufacturing processes for tools used in the metal forming area, showing a promising future for its application in the industry, Especially as regards the resistance to wear and friction.

Palavras-chave: Wear, Thermal Spray (HVOF), Coatings, Pin-on-Disc.