

ESTUDO SOBRE DESGASTES DE PUNÇÕES REVESTIDO COM CR3C2-25NICR E WC-10CO4CR ATRAVÉS DO PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA OXICOMBUSTÍVEL DE ALTA VELOCIDADE (HVOF)

Angela Selau Marques, angela_selau@ufrgs.br¹

Vanessa Moura de Souza, moura.souza@ufrgs.br²

Gustavo da Silva Gehlen, silva.gehlen@ufrgs.br³

Alexandre da Silva Rocha, alexandre.rocha@ufrgs.br⁴

¹IFSUL – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense - Câmpus Novo Hamburgo. Rua Pinheiro Machado, 205, Bairro Industrial, CEP 93.320-490, Novo Hamburgo – RS; angela_selau@ufrgs.br

²UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9500, Prédio 43807 - Centro de Tecnologia - Bairro Agronomia, CEP 91509-900, Porto Alegre – RS; moura.souza@ufrgs.br

³UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9500, Prédio 43807 - Centro de Tecnologia - Bairro Agronomia, CEP 91509-900, Porto Alegre - RS; silva.gehlen@ufrgs.br

⁴UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9500, Prédio 43807 - Centro de Tecnologia - Bairro Agronomia, CEP 91509-900, Porto Alegre - RS; alexandre.rocha@ufrgs.br

Resumo: O desgaste é o fator que causa a maior parte das falhas e a redução na vida útil de ferramentas de conformação. A crescente demanda da indústria por menores custos, maior produtividade e melhor qualidade estão entre as justificativas para que se busquem maneiras de incrementar o desempenho de matrizes. Em função disso, o objetivo deste estudo é identificar os mecanismos de desgaste dos punções utilizados em forjamento a quente. Serão analisados dois punções com revestimentos aplicados pelo método de HVOF, sendo um com aspersão de Carboneto de Cromo (Cr3C2-NiCr) e outro com Carboneto de Tungstênio (WC-CoCr). O desgaste sofrido pelos punções se dá de forma progressiva e ocorre em função das tensões que o material forjado exerce sobre o punção e do deslocamento de material na superfície, além da variação de temperatura a qual o punção é submetido durante a operação. A literatura costuma dividir o desgaste em quatro principais tipos: desgaste adesivo, fadiga de superfície, desgaste abrasivo e desgaste químico. No caso dos punções em estudo percebe-se que eles sofreram uma combinação de todos os tipos de desgaste, sendo alguns de forma mais expressiva. Verificou-se que propriedades dos revestimentos, como rugosidade e dureza, influenciam nos mecanismos de desgaste.

Palavras-chave: Aspersão Térmica, HVOF, Forjamento a quente, Desgaste Abrasivo.

1. INTRODUÇÃO

O desgaste é definido como o dano a uma superfície sólida causado pela remoção ou alteração do material pela ação mecânica de um sólido, líquido ou gás em contato. Apesar do fenômeno ser mais acentuado na superfície, geralmente há deterioração gradual que deve ser levada em conta na análise de problemas e falhas por desgaste (CHANG; HUANG; WANG, Y., 2012). Também deve-se observar que o desgaste é um fenômeno mecânico, e o maior desafio é antecipar qual o tipo de desgaste que os componentes serão submetidos (SANTOS, 2015); (COSEGLIO, 2009).

Há várias classificações diferentes para os tipos de desgaste, baseadas nos mecanismos fundamentais operantes. Elas diferem entre si porque os esquemas de classificação provêm de autores com diferentes experiências e abordagens. Outro complicador para este tipo de classificação é que pode haver mais de um mecanismo atuando ao mesmo tempo (SUMMY, 2014). Segundo Budinski, o desgaste é dividido em quatro categorias: abrasão, erosão, adesão e fadiga (BUDINSKI, 2007). A literatura também traz outras abordagens, todas complementares e com alguns pontos em comum, porém tratam o assunto sob perspectivas diferentes (BOTH, 2011).

O desgaste abrasivo e a fadiga térmica são os mecanismos predominante na conformação a quente (BABU, 2004). A elevada temperatura e pressão na qual a peça e a matriz são submetidas causam danos nas matrizes, os quais na sua maioria são irreparáveis. A aparência típica de uma matriz que apresenta falha por fadiga térmica é a de uma fina rede de trincas. Estas trincas surgem devido ao ciclo dos processos de forjamento, onde tem-se aumento brusco e queda de temperatura em um curto tempo (CASTRO, 2015). O aumento da temperatura na matriz ocorre durante a compressão do material a ser forjado e causa expansão da superfície, ao mesmo tempo em que a matriz em temperatura menor restringe esta expansão, o que gera tensões compressivas. A lubrificação por spray que geralmente é feita após ejeção da peça causa um resfriamento brusco, que provoca a sequência reversa de eventos e tensões trativas. A repetição deste ciclo provoca o surgimento das trincas, o que caracteriza a fadiga térmica (BUDINSKI, 1988).

Existem diversas técnicas utilizadas para evitar o desgaste, porém, devido à complexidade dos fenômenos que envolvem os processos de conformação a quente, não é uma tarefa fácil diminuí-lo (WANG, Q. *et al.*, 2009). Both

apresenta várias abordagens para o incremento da vida de matrizes no que diz respeito ao desgaste (BOTH, 2011). Dentre elas está o emprego de revestimentos, os quais melhoram a resistência ao desgaste e tem sido cada vez mais utilizado em componentes mecânicos, objetivando a diminuição dos danos causados nas superfícies. Tratando-se da aplicação dos revestimentos, encontram-se diversas técnicas, sendo a Aspersão Térmica a que mais se desenvolveu nos últimos anos, apresentando crescente aplicação como alternativa aos outros processos (LIMA; TREVISAN, 2007). Os processos de aspersão térmica são classificados em dois grupos, de acordo com o método de geração de calor.

- Grupo I (combustão): Chama e Detonação
- Grupo II (elétrico): Plasma e Arco elétrico

O primeiro grupo emprega gases combustíveis como fonte de calor. Os consumíveis usados são na forma de pó, fio, cordão ou arame. Os processos utilizando energia elétrica como fonte de calor constituem o segundo grupo, neste caso os consumíveis são na forma de pó ou arame. (FAUCHAIS; HEBERLEIN; BOULOS, 2014).

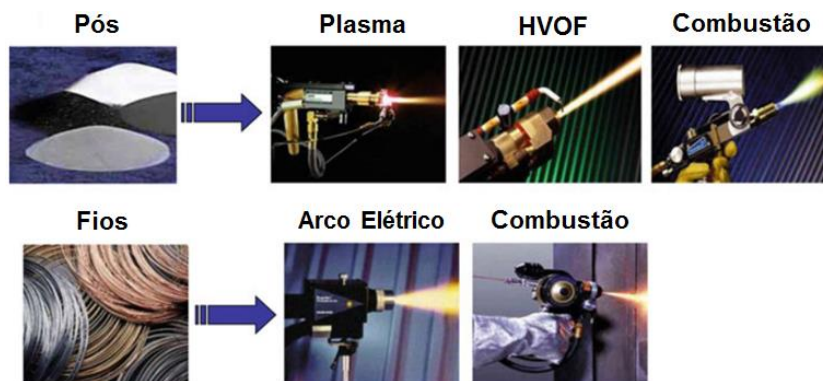


Figura 1 - Ilustração de processos de aspersão térmica. (“Oerlikon”, 2016)

Neste estudo utiliza-se o método chamado de HVOF (High Velocity Oxy-Fuel flame spraying), onde 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 de um componente, conforme mostra a Figura 2. O revestimento resultante consiste de finas plaquetas sobrepostas (YILBAS; AL-ZAHARNAH; SAHIN, 2014).

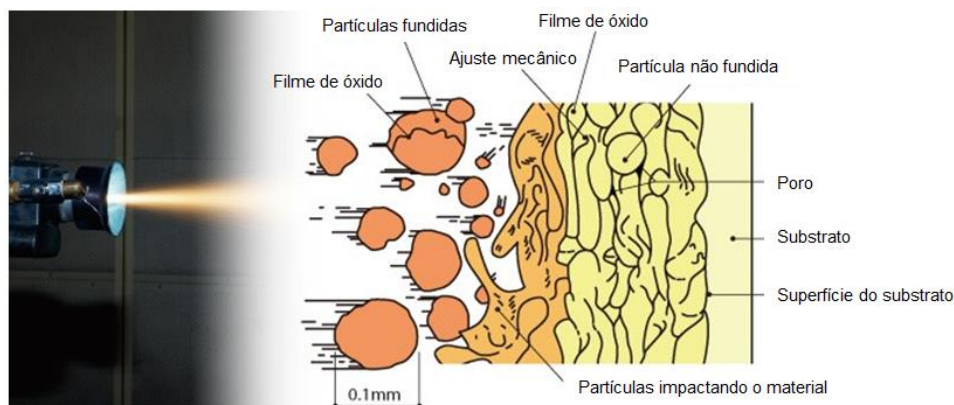


Figura 2 – Representação do revestimento resultante do processo HVOF.(“OSAKA FUJI Corporation”, 2016)

A estrutura dos revestimentos aplicados por aspersão térmica é formada por lamelas sobrepostas, que são 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 de $10^{-2}s$ (FAUCHAIS; HEBERLEIN; BOULOS, 2014).

A alta energia cinética das partículas atingindo a superfície do substrato permite um revestimento de qualidade, sem a necessidade das partículas estarem completamente fundidas. Esta é uma das vantagens para os revestimentos de carbonetos e cermetes e é onde este processo realmente se destaca (VERDON; KARIMI; MARTIN, 1998). O aquecimento da peça é controlado entre 100 °C e 180 °C, sendo assim, este processo não altera as propriedades do substrato. Além disso, outra vantagem do HVOF, é que dentre os processos de aspersão térmica, ele é o que apresenta menor porosidade e boa adesão ao substrato (“Metalurgica Rijeza”, 2017) (WOOD, 2010).

Com base nas características do HVOF e nas dificuldades apresentadas pelos processos de conformação mecânica, algumas empresas têm adotado este método para elevar a dureza superficial das ferramentas, as quais sofrem com o desgaste prematuro e consequentemente diminuição da vida útil das ferramentas. Neste trabalho os mecanismos de desgaste de dois punções utilizados no forjamento interno de uma peça foram avaliados e comparados com a condição atual de trabalho, na qual o punção é apenas nitretado.

2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os punções foram fabricados a partir do aço ferramenta AISI H13 e os revestimentos foram realizados pela empresa Rijeza Metalurgia através do processo de Aspersão Térmica por Chama Oxidocombustível em Alta Velocidade, HVOF (High Velocity Oxy-Fuel). A superfície do substrato necessita ser preparada antes da aspersão térmica, o primeiro passo é a retirada de todos os contaminantes superficiais, tais como poeira, óleo, graxa e pintura. Esta etapa é caracterizada pela realização de um jateamento, que tem como objetivo garantir a adesão do revestimento ao substrato. A Figura 3 mostra o punção durante o processo de aplicação do revestimento.

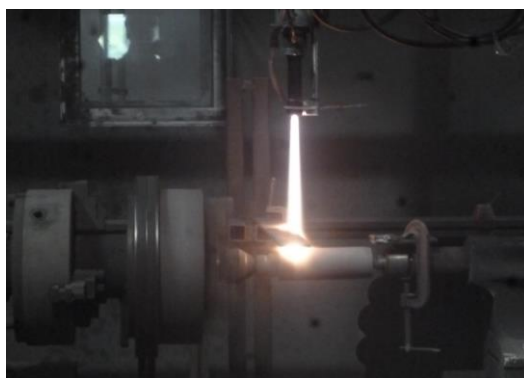


Figura 3 - Aspersão térmica HVOF no punção.

Foram aspergidos dois materiais diferentes, denominados comercialmente por Carboneto de Cromo e Carboneto de Tungstênio, mais detalhes dos pós utilizados para aspersão são dados na Tabela 1, as quais foram obtidas diretamente com o fabricante do material.

Tabela 1 - Informações referente ao Carboneto de Cromo e de Tungstênio

Classificação	Carbonetos a base de Cromo	Carbonetos a base de Tungstênio
Composição química	Cr3C2 25(Ni 20Cr)	WC 10Co 4Cr
Manufatura	Aglomerado e sinterizado	Sinterizado e comprimido
Morfologia	Esferoidal	Angular/blocos
Densidade aparente	2.3 – 3.1 g/cm3	Não informado
Temp. de serviço	<870 °C	≤ 500 °C

Após a aplicação do revestimento nos punções foram realizados ensaios para identificar a espessura da camada e a rugosidade do revestimento. No punção revestido com Cr3C2-25NiCr a camada possui uma espessura média de 118,3µm e rugosidade média de 3,067µm e para o punção revestido com WC-10Co4Cr a espessura média da camada é de 122µm e a rugosidade média é de 2,125µm. Estes dados são importantes pois influenciam diretamente no resultado do desgaste dos punções. A Figura 4 mostra os punções antes do forjamento, com os respectivos tratamentos e revestimentos.

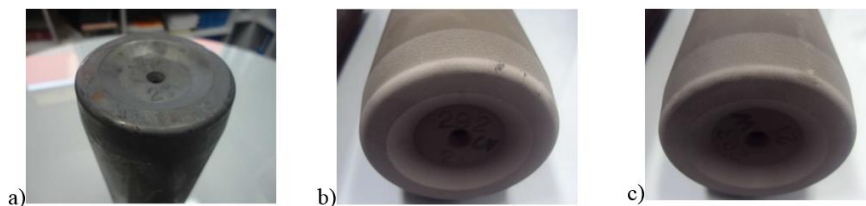


Figura 4 - Punções antes do forjamento: (a) punção somente nitretado; (b) punção revestido com Carboneto de Cromo; (c) punção revestido com Carboneto Tungstênio.

O material conformado neste estudo é o aço SAE 1020. A temperatura inicial do forjamento é em torno de 1200 °C, o punção é pré-aquecido antes do contato com o material, a uma temperatura em torno de 100 °C. Porém, durante o

contato com o material forjado a temperatura do punção eleva-se, chegando a 200 °C. Utilizou-se uma prensa hidráulica, com velocidade de conformação constante de 100 mm/s (velocidade de deslocamento do punção) e o tempo deste ciclo dura em torno de 28 segundos. O resfriamento é feito com água, que escoa em canais internos do punção.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão apresentados os resultados obtidos através de uma análise feita com um microscópio digital, o qual possui um software para capturar e tratar imagens chamado de Microcapture. Este sistema nos permitiu identificar e analisar os diversos tipos de desgaste que ocorreram nos punções.

3.1. Punção Revestido com Carboneto Cromo

Observa-se que neste punção não houve deformação aparente significativa que pudesse comprometer a fabricação da peça forjada, conforme mostra a Figura 5. Também nota-se que o ângulo da ponta permaneceu sem alterações significativas de forma. Ainda, através das Figuras 5 (b) e 5 (c), verifica-se que há material aderido no substrato, em quantidades e em locais diferentes, ou seja, há mais material em determinadas regiões do que em outras.



Figura 5 - Punção com revestimento de Carboneto de Cromo: (a) Vista em perspectiva; (b) Vista lateral 1; (c) Vista lateral 2.

Na extremidade superior do punção, região que entra em contato direto com o material e que sofre as maiores tensões, tem-se o aspecto de “terra rachada” conforme visto na Figura 6. Este é um dos primeiros indícios de falha do revestimento, indicando também que houve fadiga térmica como um dos mecanismos de falha atuante. A partir desta falha iniciam-se as demais.

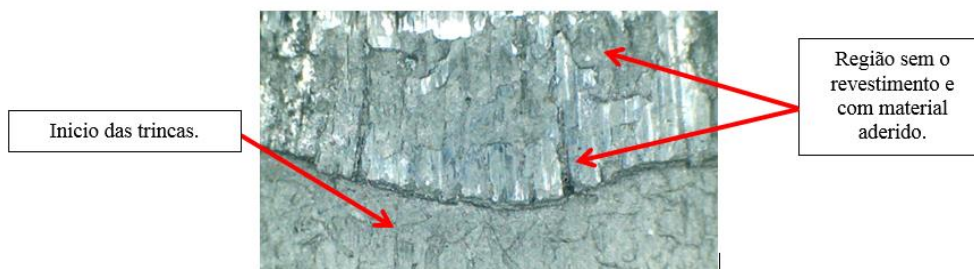


Figura 6 - Falhas no punção com revestimento de Carboneto de Cromo.

Em outra imagem percebe-se que o revestimento foi arrancado do substrato e o material forjado adere à superfície, sendo que este desprende-se da superfície com facilidade após o forjamento. As Figuras 7 (a) e 7 (b), exemplificam este comportamento.

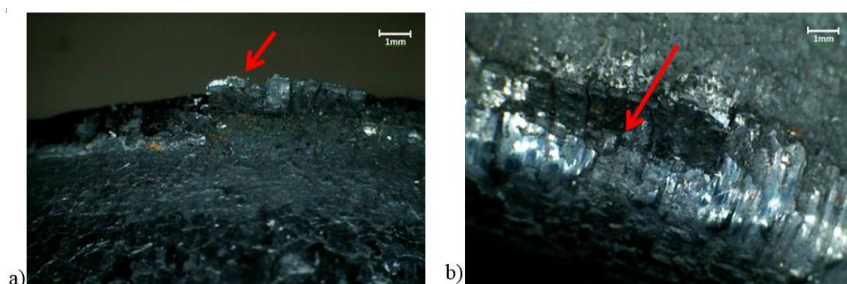


Figura 7 - Diferentes falhas ocorridas no punção de Carboneto de Cromo: (a) Deslocamento do material aderido; (b) Região com material aderido.

Em regiões do corpo do punção ocorreram deslocamentos, conforme a Figura 8, podendo esta falha estar associada aos seguintes fatores:

- Rugosidade extremamente elevada deixada na superfície após revestimento (não foi aplicado nenhum processo para reduzir a rugosidade neste primeiro teste);
- Deficiência de lubrificação;
- Preparação por jateamento da superfície antes do revestimento insuficiente ou fora de condições ideais para dar maior adesão da camada ao substrato.

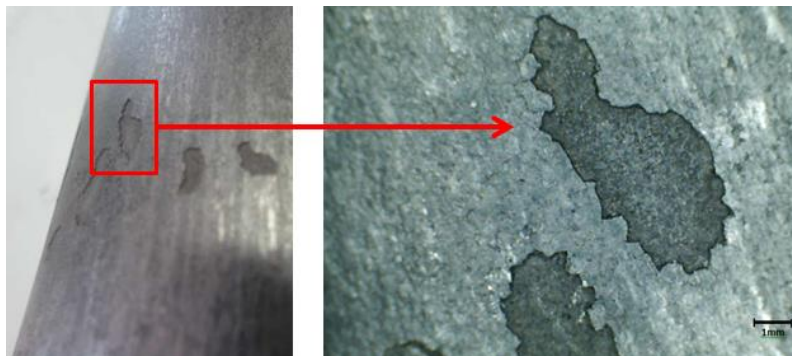


Figura 8 - Desplacamento do revestimento no corpo do punção

3.2. Punção Revestido com Carboneto tungstênio

O punção revestido com Carboneto de Tungstênio apresenta uma rugosidade média de $2,125 \mu\text{m}$, em torno de 30% menor do que a rugosidade do punção revestido com Carboneto de Cromo. Porém, ainda assim é uma rugosidade elevada, que exige uma atenção especial quanto a lubrificação. Em função disso, neste punção também tem-se fenômenos de desgastes, tais como: deformação plástica, fadiga térmica, desgaste abrasivo, adesão de material forjado, de modo similar ao observado para o revestimento de Carboneto de Cromo. A Figura 9 mostra, através de diferentes posições, os mecanismos de desgaste sofridos pelo punção. Percebe-se que a adesão de material é acentuada, tanto na ponta do punção, como na região onde há a transição do ângulo para a seção reta do corpo do punção. Através da Figura 9 (c) é possível visualizar que há deformação aparente e que houve alteração do ângulo na ponta do punção, devido a deformação.

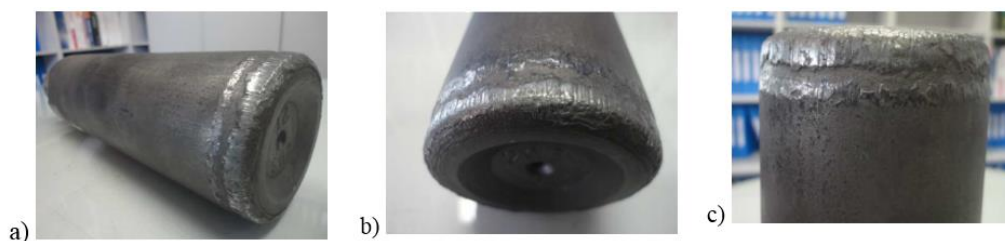


Figura 9 - Punção com revestimento de Carboneto de Tungstênio: (a) Vista em perspectiva; (b) Vista frontal; (c) Vista lateral.

Em uma análise mais minuciosa nota-se que em algumas regiões do punção o revestimento deslocou, conforme pode ser observado na Figura 10 (a) e 10 (b).

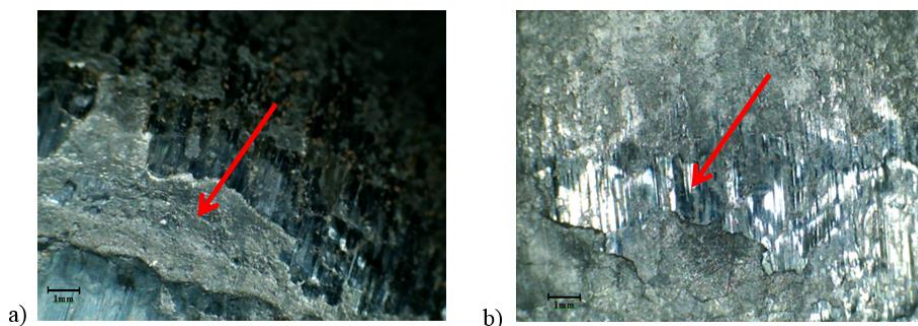


Figura 10 - Regiões da ponta do punção onde o revestimento deslocou.

Nota-se que o revestimento deformou-se progressivamente, em função das altas temperaturas nas quais ele fica exposto, gerando o efeito de camadas sobrepostas, o que facilita a quebra e o deslocamento do revestimento, conforme Figura 11.

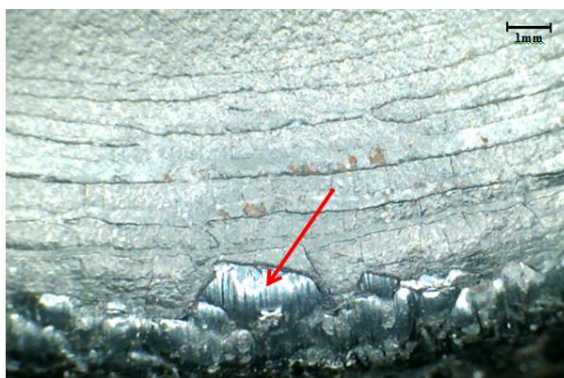


Figura 11 - Deformação do revestimento

3.3. Punção nitretado – condição original

O punção com a condição original de trabalho apresentou a maior deformação plástica, comprometendo, inclusive, o ângulo da ponta do punção. Porém, verificou-se que não houve a adesão de material como nos punções revestidos pelo processo de HVOF. A Figura 12 mostra através de diferentes posições os desgastes sofridos pelo punção.



Figura 12 - Punção nitretado

O brilho acentuado de algumas regiões na ponta do punção demonstram o desgaste severo sofrido na camada nitretada. Os fragmentos que se desprendem do punção atuam como partículas de terceiro corpo, e através do deslocamento do material atiram entre peça e punção, provocam maior abrasão e um efeito “brilhoso” em algumas regiões, como pode ser observado no conjunto de imagens, representado pela Figura 13. Além disso, também observa-se os variados tipos de desgastes sofrido pelo punção em estado original (nitretado a gás).

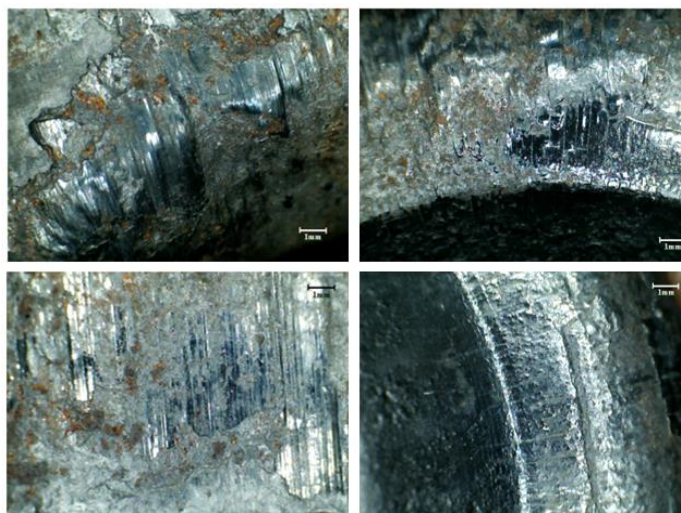


Figura 13 - Diversos tipos de desgaste

4. CONCLUSÕES

As condições operacionais e a geometria dos corpos em contato favorecem o desgaste. Em função disso, é possível identificar todos os tipos de desgastes nos punções. O mecanismo principal de desgaste é determinado pelas propriedades mecânicas do revestimento, pela temperatura durante o forjamento e pelo gradiente de temperatura no qual o punção é submetido. A alta temperatura em que o *blank* entra em contato com o punção e o rápido resfriamento provocam diferentes contrações e dilatações no corpo do punção em função da distância entre o corpo e a superfície, causando ciclos de tensões de origem térmica. Este mecanismo é conhecido como fadiga térmica superficial e leva ao desgaste do punção, afetando também o revestimento. O coeficiente de dilatação térmica do material do punção e do revestimentos também são diferentes, e este é outro fator que gera tensões e leva ao surgimento de trincas no revestimento. No entanto cabe ressaltar que a fadiga térmica também atua em superfícies não revestidas, devido ao gradiente de temperaturas variáveis gerados na operação.

Nos testes laboratoriais, realizados previamente, nota-se que o revestimento com Carboneto de Cromo apresenta rugosidade mais elevada, em torno de 3,067 μm . Acredita-se que em função disso, o atrito entre o revestimento e o material forjado foi o mais elevado, fato que contribuiu para o deslocamento do revestimento ser mais acentuado neste punção do que nos demais. A elevada dureza do revestimento de Carboneto de Tungstênio oferece maior resistência ao desgaste em relação ao revestimento de Carboneto de Cromo. Com base nestes resultados, acredita-se que a rugosidade muito elevada prejudicou o processo e facilitou o surgimento das falhas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a empresa Rijeza 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

- BABU, S. **A material based approach to creating wear resistant surfaces for hot forging**. Ohio: Ohio State University, 2004. Disponível em: <<https://etd.ohiolink.edu>>.
- BOTH, G. B. **Caracterização e avaliação tribológica de superfícies resistentes ao desgaste para aplicação em ferramentas de conformação a frio**. Porto Alegre: UFRGS, 2011.
- BUDINSKI, K. G. **Surface engineering and wear**. New Jersey: Prentice Hall, 1988.
- BUDINSKI, K. G. **Guide to friction, wear, and erosion testing**. Danvers: CRC Press, 2007.
- CASTRO, R. **Avaliação das propriedades de superfície e do comportamento ao desgaste abrasivo de hastes de cilindros hidráulicos revestidas pelos processos hvof e cromo duro eletrodepositado**. Porto Alegre: UFRGS, 2015.
- CHANG, S.; HUANG, K.; WANG, Y. Effects of thermal erosion and wear resistance on aisi h13 tool steel by various surface treatments. **Materials transactions**, 2012. v. 53, n. 4, p. 745–751.
- COSEGLIO, M. S. D. R. **Caracterização de partículas abrasivas segundo diferentes modelos de medição de fator de forma**. Ufp, 2009.
- FAUCHAIS, P. L.; HEBERLEIN, J. V. R.; BOULOS, M. I. **Thermal spray fundamentals**. New York: Springer, 2014.
- LIMA, C. C.; TREVISAN, R. **Aspersão térmica**. 2º Edição ed. São Paulo: Artliber, 2007.
- Metalurgica rijeza. São Leopoldo, 2017. Disponível em: <<http://www.rijeza.com.br/espaco-academico/artigos-tecnicos>>. Acesso em: 3 jan. 2017.
- Oerlikon. Liechtenstein, 2016. Disponível em: <<https://www.oerlikon.com>>. Acesso em: 7 dez. 2016.
- Osaka fuji corporation. Osaka, 2016. Disponível em: <https://www.ofic.co.jp/en/r_and_d/thermalspraying/>. Acesso em: 7 dez. 2016.
- SANTOS, G. R. Dos. **Caracterização e avaliação do comportamento tribológico do aço din x100crmov8-1-1 com tratamento dúplex**. Porto Alegre: UFRGS, 2015.
- SUMMY, M. **Quantificação e influencia da incrustação do erodente a base de alumina em ensaios de desgaste erosivo de um revestimento fecr aspergido por arco elétrico**. Porto Alegre: UFRGS, 2014.
- VERDON, C.; KARIMI, A.; MARTIN, J.-L. A study of high velocity oxy-fuel thermally sprayed tungsten carbide based coatings. part 1: microstructures. **Materials science and engineering a**, 1998. v. 246, p. 11–24.
- WANG, Q. *et al.* Performance study of abrasive wear and erosive wear of wc-12co coatings sprayed by hvof. **Tribology international**, 2009. v. 42, p. 340–344.
- WOOD, R. J. K. Tribology of thermal sprayed wc-co coatings. **International journal of refractory metals and hard materials**, 2010. v. 28, n. 1, p. 82–94.
- 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.

STUDY ON WEAR OF PUNCHES COATED WITH CR3C2-25NICR AND WC-10CO4CR THROUGH HIGH SPEED OXYFUEL THERMAL SPRAYING PROCESS (HVOF)

Angela Selau Marques, angela_selau@ufrgs.br¹

Vanessa Moura de Souza, moura.souza@ufrgs.br²

Gustavo da Silva Gehlen, silva.gehlen@ufrgs.br³

Alexandre da Silva Rocha, alexandre.rocha@ufrgs.br⁴

¹IFSUL – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense - Câmpus Novo Hamburgo. Rua Pinheiro Machado, 205, Bairro Industrial, CEP 93.320-490, Novo Hamburgo – RS; angela_selau@ufrgs.br

²UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9500, Prédio 43807 - Centro de Tecnologia - Bairro Agronomia, CEP 91509-900, Porto Alegre – RS; moura.souza@ufrgs.br

³UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9500, Prédio 43807 - Centro de Tecnologia - Bairro Agronomia, CEP 91509-900, Porto Alegre - RS; silva.gehlen@ufrgs.br

⁴UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9500, Prédio 43807 - Centro de Tecnologia - Bairro Agronomia, CEP 91509-900, Porto Alegre - RS; alexandre.rocha@ufrgs.br

Wear is the factor that causes most failures and reduces the life of forming tools. The increasing demand of the industry for lower costs, higher productivity and better quality are among the justifications for seeking ways to increase die performance. Due to this, the purpose of this study is to identify the wear mechanisms of the punches used in hot forging. Two punches with coatings applied by the HVOF method will be analyzed, one with chromium carbide ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$) and the other with tungsten carbide (WC-CoCr). The wear and tear suffered by the punches occurs gradually and occurs due to/because of the tensions that the forged material exerts on the punches and the displacement of material on the surface, besides the temperature variation at which the punch is subjected during the operation. The literature usually separates the wear in four major types, according to the present mechanism: adhesive wear, surface fatigue, abrasive wear and chemical wear. In the case of the punches under study it is noticed that they suffered a combination of all types of wear, some of them being more expressive. It has been found that properties of the coatings, such as roughness and hardness, influence the wear mechanisms.

Keywords: Thermal Spray, HVOF, Hot Forging, Abrasive Wear.