

EFEITOS DOS REVESTIMENTOS PVD, CVD E DUPLEX EM FERRAMENTAS PARA TRABALHO A QUENTE: pesquisa de revisão bibliográfica

EFFECTS OF PVD, CVD E DUPLEX COATINGS ON HOT WORK TOOLS: literature review research

Ruy Ribeiro da Silva Júnior[I]
João Paulo Sachetto[II]

Área: Gestão da Manutenção e Processos Industriais (GEMAPI)
Subárea: Processos de Fabricação

RESUMO

A literatura tem tratado de diversos tipos de revestimentos aplicados em ferramentas para trabalho a quente, avaliando e comparando os efeitos das propriedades dos revestimentos no desempenho dessas ferramentas. Pesquisas tem demonstrado que a criação de melhores propriedades na camada superficial das ferramentas, através de revestimentos e camadas com características adequadas, é significante para a durabilidade dos moldes e matrizes. Nesse contexto, este artigo de revisão bibliográfica aborda as principais características dos revestimentos PVD, CVD e duplex, apresentando os seus principais efeitos nas propriedades dos materiais para trabalho a quente, reportando algumas indicações de como esses revestimentos podem influenciar na resistência das ferramentas à fadiga térmica.

Palavras-chave: Ferramentas. Revestimentos. Trabalho a quente

ABSTRACT

The literature has approached several types of coatings applied in hot working tools, evaluating and comparing the effects of coating properties on the performance of these tools. Research has shown that the creation of better properties in the surface layer of the tools, through coatings and layers with appropriate characteristics, is significant for the durability of molds and dies. In this context, this review reports the main characteristics of PVD, CVD and duplex coatings, presenting their main effects on the properties of hot working materials, reporting some indications of how these coatings can influence the resistance of the tools to thermal fatigue.

Keywords: Tools. Coatings. Hot working.

Data de submissão do artigo: 17/07/2022.
Data de aprovação do artigo: 14/09/2022.
DOI: **10.33635/sitefa.v5i1.212**

[I] Professor Dr. da Etec José Martimiano da Silva – Ribeirão Preto – SP – Brasil. E-mail: ruy.silva4@etec.sp.gov.br
[II]Prof. Me. Da Faculdade de Tecnologia (FATEC) – Sertãozinho – SP – Brasil. E-mail: joao.sachetto@fatec.sp.gov.br

1 INTRODUÇÃO

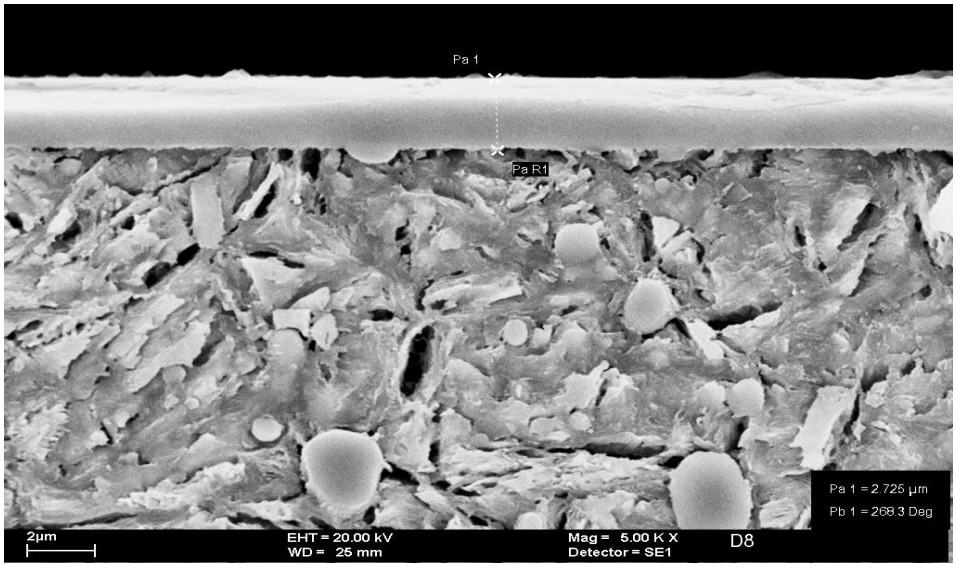
Pesquisas tem demonstrado que a criação de melhores propriedades na camada superficial das ferramentas, através de revestimentos e camadas com características adequadas, é significante para a durabilidade dos moldes e matrizes. Neste contexto, a literatura tem tratado de diversos tipos de revestimentos aplicados em ferramentas para trabalho a quente, avaliando e comparando os efeitos das propriedades dos revestimentos no desempenho das ferramentas (ALTAN; DESHPANDE, 2011). Por muitos anos, pesquisadores em todo mundo têm sugerido o uso de revestimentos e tratamentos em matrizes para injeção sob pressão. Dentre os processos de revestimentos utilizados para a obtenção de resistentes camadas superficiais em ferramentas, duas técnicas são mais comumente utilizadas: o processo PVD (Deposição física de vapor), e o processo CVD (Deposição Química de Vapor).

Nesse artigo, objetiva-se abordar as principais características dos revestimentos PVD, CVD e duplex, apresentando os seus principais efeitos nas propriedades dos materiais para trabalho a quente. Neste contexto, o artigo também reporta algumas indicações de como esses revestimentos podem influenciar na resistência das ferramentas à fadiga térmica, um importante e dominante mecanismo que causa falhas prematuras em materiais sob alta temperatura, que levam a diminuição da vida útil das ferramentas para trabalho a quente.

2 PROCESSOS PVD E CVD

O processo PVD é uma técnica de deposição de finos filmes metálicos ou cerâmicos na superfície do substrato por meio da vaporização destes materiais sólidos em câmaras especiais. De um modo geral, este processo envolve controle de aquecimento, potencial e pressão. O processamento PVD é feito sob alto vácuo e temperaturas que variam entre 150° e 500 °C. A figura 1 mostra uma imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV) de uma camada de TiN depositada sobre um substrato de aço AISI D2.

Figura 1 - Camada de TiN depositada sobre um substrato de aço AISI D2 temperado e revenido



Fonte: Franco et al (2000) - Imagem obtida por MEV.



Já o processo CVD usa gases ou precursores em estado vapor, sendo o filme depositado a partir de reações químicas sobre superfície do substrato.

O processamento CVD é feito sob temperaturas superiores ao processo PDV, requerendo temperaturas acima das temperaturas de revenimento das ferramentas, o que pode causar o amolecimento do revenido do substrato. Além disto, não há como evitar que haja mudanças na microestrutura e dimensões das matrizes, não se podendo assegurar que as formas e dimensões das ferramentas serão mantidas após a aplicação do CVD. Outro aspecto negativo a aplicação do processo é a sua limitação quanto ao revestimento de matrizes para injeção sob pressão, especialmente relativo a moldes de aço grandes e geometricamente complexos (HEIM; HOLLER; MITTERER, 1999).

É importante salientar que o recobrimento pelo processo PVD de moldes pesados e complexos pode ser complicado e caro, pois durante o processo de deposição ou ajuste da montagem dos moldes é necessário que eles sejam movimentados. Uma alternativa para o recobrimento homogêneo de moldes geometricamente complexos e pesados sem a necessidade de movimentação ou rotação do molde seria a utilização do processo PACVD (*plasma-assisted chemical vapour deposition*) (HEIM; HOLLER; MITTERER, 1999).

O revestimento PVD é o processo mais comumente aplicado em matrizes para trabalho a quente, sendo considerado como uma potencial alternativa para a tecnologia tradicional de revestimento, especialmente a galvanoplastia e outros processos de deposição líquida. Na prática, no entanto, principalmente por razões técnicas e econômicas, este potencial não tem sido devidamente explorado. A economia é prejudicada devido ao alto custo do equipamento de vácuo, dos elevados custos de operação (bombeamento e ciclos de aquecimento e arrefecimento) e, também, devido à lenta taxa de deposição do revestimento. Todos estes fatores contribuem para que o revestimento PVD tenha dificuldade de competir economicamente com as indústrias que realizam revestimentos tradicionais de baixo custo. Em relação aos obstáculos técnicos para a aplicação do revestimento PVD pode-se destacar a sua baixa proteção contra a corrosão, que é causada pela sua fina camada, sua estrutura colunar, gotículas ocluídas e partículas de poeira, juntamente com o fato de que os revestimentos são frequentemente mais nobres quimicamente do que o substrato. Além disso, a fina camada do revestimento PVD (30 μm contra 0,3 mm do revestimento tradicional) replica a superfície do substrato sem qualquer suavização ou nivelamento (GAWNE *et al*., 2013).

Diversos estudos apontam que os efeitos do revestimento PVD na melhoria das propriedades dos materiais podem ser melhorados quando combinados com o tratamento de nitretação (ALTAN; DESHPANDE, 2011; BARRAU *et al.,* 2003; SAIKI *et al.,* 2001; SMOLIK; MAZURKIEWICZ, 2011; STARLING; BRANCO, 1997). No entanto, a maior parte do sucesso tem sido na redução da soldagem da liga fundida no molde e na diminuição da erosão. O processo CVD e PVD tem mostrado vantagens quando utilizado em pinos de matrizes, porém, aplicações em superfícies expostas à fadiga térmica não têm obtido êxito na prevenção de danos (SRIVASTAVA *et al*., 2003).

O tratamento de superfície por deposição de multicamadas também tem mostrado alguns benefícios. Estudo realizado no aço AISI H13 revestido por tripla camada (óxido/ TiAlN/ Ti), mostrou que a camada externa foi eficaz em reduzir as trincas durante os ciclos térmicos. Os resultados mostraram a importância da adequação do comportamento do substrato com o revestimento (SRIVASTAVA *et al.,* 2003).



Outro processo de revestimento que vem sendo estudado é o processo de aluminização combinado com pós-oxidação. Segundo estudo, amostras com superfícies tratadas por aluminização e pós-oxidação tiveram suas propriedades de fadiga térmica melhoradas. Os ensaios mostraram que, quando comparadas com as superfícies não tratadas, as trincas de fadiga térmica das amostras com tratamento de aluminização e pós-oxidação, além de possuírem uma menor taxa de propagação, levaram um maior tempo para nuclearem (JIAN *et al.*, 2013).

2.1 Efeitos do revestimento duplex

Os revestimentos pelo processo CVD e PDV têm falhado em melhorar a resistência à fadiga térmica em aços para trabalho a quente utilizado em matrizes. Estes revestimentos falham prematuramente em consequência dos ciclos térmicos (SRIVASTAVA *et al*., 2003).

Dentre as possibilidades de revestimentos, abordagens de tratamento duplex têm mostrado alguns benefícios. O revestimento duplex é uma combinação óptima entre tratamentos superficiais de nitretação sob plasma seguida de revestimento PVD ou PACVD. Várias pesquisas têm demonstrado o potencial do processo duplex (CELIS *et al*., 1999; HEIM; HOLLER; MITTERER, 1999; MATTHEWS; LEYLAND, 1995). Estudos relatam que o revestimento PVD combinado com camadas nitretadas resulta em uma mútua e sinergética combinação (MATTHEWS; LEYLAND, 1995; SMOLIK; MAZURKIEWICZ, 2011). Isto porque, a camada nitretada entre o revestimento PVD e o aço ferramenta aumenta a dureza da superfície e a sua resistência a deformação plástica, protegendo o revestimento contra a perda de coesão e adesão ao material base (SMOLIK; MAZURKIEWICZ, 2011). Além disso, a camada nitretada pode aumentar ainda mais a resistência da fadiga de baixo ciclo. O revestimento PVD por sua vez, além de reduzir o desgaste das matrizes, também desempenha um importante papel como camada de isolamento para a base nitretada, reduzindo a influência de fatores externos no seu processo de desgaste (STARLING; BRANCO, 1997).

A aplicação da composição camada nitretada/revestimento PVD para neutralizar o processo de deformação plástica, oxidação, erosão ou desgaste abrasivo tem sido confirmada por muitos resultados de pesquisas (BARRAU *et al*., 2003; PELLIZZARI; UGUES; CIPOLLONI, 2013; SAIKI *et al*., 2001). De fato, a elevada dureza a quente dos revestimentos PVD e a alta tensão residual compressiva que eles apresentam contribuem para o aumento da resistência à fadiga térmica dos aços ferramentas para trabalho a quente. Estudo mostrou que o revestimento combinando Nitretação/TiN, aplicado no aço AISI H13, foi capaz de inibir a fadiga a térmica. Segundo os pesquisadores, o mecanismo mais provável para aumento da resistência à fadiga térmica parece envolver tanto o retardamento da nucleação das trincas quanto o seu crescimento (STARLING; BRANCO, 1997). Em outro estudo realizado em aços AISI H13 revestidos com várias combinações de camada nitretada com revestimentos PVD, mostrou que a baixa condutividade térmica do revestimento PVD desempenha um importante papel na redução da intensidade de choques térmicos durante a fadiga térmica, além de efetivamente diminuir a intensidade do revenimento do substrato (SMOLIK; MAZURKIEWICZ, 2011).

Em um outro estudo envolvendo a combinação da nitretação a plasma, porém com o processo PACVD, verificou-se que a camada de nitretos da matriz desempenhou uma melhoria na estabilidade da tensão térmica. O estudo mostrou que o revestimento formado



por este processo foi capaz de proteger a superfície da matriz de um ataque químico da liga fundida de alumínio. Além disto, o PACVD recobriu o molde de maneira homogênea, aumentando a vida útil dos pinos e do molde, inclusive evitando ou retardando fortemente a soldagem do alumínio na superfície da matriz (HEIM; HOLLER; MITTERER, 1999).

De um modo geral, a melhoria da resistência à fadiga térmica está bastante relacionada com a maior dureza a quente do substrato e com a alta tensão de compressão residual do revestimento, produzindo, desta forma, um atraso na nucleação e crescimento de trincas. No entanto, a diferença do coeficiente de expansão térmica entre o revestimento e o substrato é uma das causas de falha do revestimento. Este desequilíbrio permite que o frágil revestimento seja colocado em um estado de tensão durante a ciclagem térmica, resultando em uma nucleação de trincas (PELLIZZARI; MOLINARI; STRAFFELINI, 2001). Outro fator relevante a ser observado é a temperatura envolvida no processo, pois a baixa estabilidade térmica da camada de compostos pode provocar a oxidação dos nitretos de ferro com a subsequente fragmentação do revestimento PVD. Isto sugere a necessidade da remoção da camada de compostos em aplicações onde a temperatura e a atmosfera causam oxidação (PELLIZZARI; MOLINARI; STRAFFELINI, 2001). Em estudo de fadiga térmica realizado em aço AISI H11 com revestimento PVD verificou-se após 120 ciclos térmicos, em uma mesma faixa de temperatura, que uma completa oxidação induziu a decapagem das amostras. Isto mostra que alta resistência à oxidação dos revestimentos se torna um requisito fundamental para aplicações envolvendo fadiga térmica em ambientes agressivos (PELLIZZARI; UGUES; CIPOLLONI, 2013).

É importante considerar a possibilidade de as falhas dos revestimentos estarem associadas a outras fontes específicas. A causa das falhas pode estar atribuída, por exemplo, à inclusão de enxofre na superfície da matriz; uma vez que este elemento pode estar presente nas pedras de esmeril utilizadas nas operações de polimento final das matrizes. Neste caso, a superfície rugosa produzida no final da operação de manufatura da matriz, imediatamente antes do esmerilhamento, pode ter uma influência significante na falha do mecanismo, pois pode fornecer locais para aprisionamento de partículas abrasivas com alto teor de enxofre. Deste modo, pode ocorrer uma baixa adesão do revestimento na inclusão de enxofre, acarretando o seu desprendimento; fato que leva a superfície do substrato a ficar exposta, favorecendo assim a nucleação das trincas (GALLO; FIGUEROA; BAUMVOL, 2010).

Finalmente, é importante ainda ressaltar que todos os tipos de tratamento de superfície e tecnologias de revestimento podem formar uma camada de compostos na superfície; e em termos de propriedades térmicas, a diferença entre essas camadas compostas e o substrato pode levar a uma concentração de tensão, que por sua vez causa uma redução da resistência à fadiga térmica da ferramenta (JIAN *et al*., 2013).

2.2 Efeitos da rugosidade superficial nos revestimentos

A superfície rugosa exerce um grande efeito na força de fadiga, uma vez que as trincas se iniciam predominantemente na superfície livre do material. Estudos têm mostrado que uma superfície com menor rugosidade tem uma maior resistência à fadiga, enquanto as superfícies com maior rugosidade mostram relativamente uma menor vida em fadiga. Desta forma, o polimento das superfícies pode aumentar a vida em fadiga de componentes (OBIUKWU *et. al.*, 2015).



O desempenho dos revestimentos de ferramentas é afetado pela superfície rugosa do substrato, de modo que a diminuição da rugosidade resulta em uma melhoria das propriedades mecânicas e de adesão dos revestimentos. Estudos envolvendo revestimentos multicamadas de Ti/ TiN/ Zr/ ZrN aplicados em substratos com diferentes rugosidades superficiais apontaram que a resistência a corrosão do revestimento pode ser diminuída com o aumento da rugosidade do substrato. Segundo ainda os mesmos estudos, além da alteração da resistência a corrosão, a resistência à erosão e a força de adesão do revestimento também aumentaram com a diminuição da rugosidade do substrato. Neste caso, os autores salientam que a grande força de aderência e as fortes interfaces entre camadas adjacentes foram capazes de reduzir a nucleação de trincas e sua propagação, inibindo as falhas do revestimento (LIN *et al*., 2015).

Em estudos prévios, outros autores verificaram que a aderência do revestimento PVD também depende do pré-tratamento do substrato; uma superfície esmerilhada, por exemplo, pode apresentar uma melhor aderência do revestimento do que superfícies jateadas com microabrasivos, uma vez que a adesão do revestimento é menor para uma rugosidade mais alta do substrato, principalmente em superfícies jateadas (ADOBERG *et al.,* 2012).

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Geralmente, todos os processos de desgastes que ocorrem nos moldes e matrizes, como por exemplo: fadiga térmica, deformação plástica, desgaste abrasivo e erosão, são originados na camada superficial do material. Deste modo, para a uma maior durabilidade dos moldes e matrizes é desejável que melhores propriedades sejam criadas nesta camada, o que pode ser alcançado por meio da aplicação de revestimentos e camadas com características adequadas, utilizando-se, por exemplo, os processos PVD, CVD e duplex citados neste artigo. Embora o objetivo desses tratamentos seja normalmente o de aumentar a dureza e a resistência ao desgaste da superfície, ao mesmo tempo em que o núcleo do material se mantém dúctil, outras propriedades como: resistência à fadiga, resistência à corrosão e resistência à oxidação em altas temperaturas também podem ser alcançadas, levando a um aumento de vida útil das ferramentas para trabalho a quente.

REFERÊNCIAS

ADOBERG, Eron *et al.* The effect of surface pre-treatment and coating post-treatment to the properties of TiN coatings. **Estonian Journal of Engineering**, v. 18, n. 3, p. 185, 2012.

ALTAN, T.; DESHPANDE, M. Selection of die materials and surface treatments for increasing die life in hot and warm forging. **ERC for Net Shape Forming, Paper**, n. 644-FIA, p. 1-32, 2011.

BARRAU, O. *et al*. Analysis of the friction and wear behaviour of hot work tool steel for forging. **Wear**, v. 255, n. 7, p. 1444-1454, 2003.

CELIS, J. P. *et al.* Hybrid processes—a versatile technique to match process requirements and coating needs. **Surface and Coatings Technology**, v. 113, n. 1, p. 165-181, 1999.



FRANCO, A. F. *et al*. Efeito do acabamento superficial de substratos de aço-ferramenta AISI D2 na aderência de revestimentos de TiN depositados por PVD. **Anais.** São Carlos: UFSCar/DEMA, 2000.

GALLO, S. C.; FIGUEROA, C. A.; BAUMVOL, I. J. Premature thermal fatigue failure of aluminium injection dies with duplex surface treatment. **Materials Science and Engineering: A**, v. 527, n. 29-30, p. 7764-7769, 2010.

GAWNE, D. T. *et al.* Thin film performance from hybrid PVD-powder coating process. **Surface and Coatings Technology**, v. 236, p. 388-393, 2013.

HEIM, D.; HOLLER, F.; MITTERER, C. Hard coatings produced by PACVD applied to aluminium die casting. **Surface and coatings Technology**, v. 116, p. 530-536, 1999.

JIAN, S. U. N. *et al.* Anti-Thermal-Fatigue Property of 8407 Steel With Surface Aluminization and Oxidation Treatment. **Journal of Iron and Steel Research, International**, v. 20, n. 1, p. 53-57, 2013.

LIN, Song-sheng *et al.* Effects of surface roughness of substrate on properties of Ti/TiN/Zr/ZrN multilayer coatings. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, v. 25, n. 2, p. 451-456, 2015.

MATTHEWS, A.; LEYLAND, A. Hybrid techniques in surface engineering. **Surface and Coatings Technology**, v. 71, n. 2, p. 88-92, 1995.

OBIUKWU, O. *et al*. The effect of surface finish on the low cycle fatigue of low and medium carbon steel. **International Conference on Mechanical and Industrial Engineering (ICMIE'15)**, July 14-15, Harare (Zimbabwe).2015.

PELLIZZARI, M.; MOLINARI, A.; STRAFFELINI, G. Thermal fatigue resistance of plasma duplex-treated tool steel. **Surface and Coatings Technology**, v. 142, p. 1109-1115, 2001.

PELLIZZARI, M.; UGUES, D.; CIPOLLONI, G. Influence of heat treatment and surface engineering on thermal fatigue behaviour of tool steel. **International Heat Treatment and Surface Engineering**, v. 7, n. 4, p. 180-184, 2013.

SAIKI, H. *et al*. Effect of the surface structure on the resistance to plastic deformation of a hot forging tool. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 113, n. 1, p. 22-27, 2001.

SMOLIK, J.; MAZURKIEWICZ, A. Thermal fatigue of hot working steel after hybrid surface treatment. **International Heat Treatment and Surface Engineering**, v. 5, n. 4, p. 175-179, 2011.

SRIVASTAVA, A. *et al*. A multilayer coating architecture to reduce heat checking of die surfaces. **Surface and coatings technology**, v. 163, p. 631-636, 2003.
STARLING, C. M. D.; BRANCO, J. R. T. Thermal fatigue of hot work tool steel with hard coatings. **Thin solid films**, v. 308, p. 436-442, 1997.