



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Otimização do Desgaste de Fontes de Evaporação para Equipamentos PVD – Arco Catódico

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

Autor

Michel dos Santos Teixeira

Orientadores

DEM – Professor Albano Cavaleiro

MAHLE – Engo. Nuno Costa

Júri

Presidente Professora Doutora Marta Oliveira
Professora da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor Bruno Trindade
Professor da Universidade de Coimbra

Orientador Engenheiro Nuno Costa
Engenheiro da Empresa MAHLE Componentes de Motores S.A.

Colaboração Institucional



Coimbra, Julho, 2015

À minha família.

Agradecimentos

A realização desta dissertação de mestrado contou com importantes apoios e incentivos, sem os quais não teria sido possível a sua realização, aos quais estarei eternamente grato.

Aos meus pais, irmão e namorada, por todo o apoio, esforço e sacrifício que fizeram ao longo destes anos para tornar a minha formação e este trabalho possível.

Ao Engenheiro Nuno Costa, por toda a disponibilidade, orientação e conhecimento que me transmitiu ao longo de 9 meses, pela confiança demonstrada, e sobretudo pela receptividade a novas ideias e sugestões, assumindo riscos, algo que por vezes é um grande entrave ao sucesso de uma parceria Universidade/Indústria, um sincero muito obrigado.

Ao Professor Albano Cavaleiro, por toda a disponibilidade e auxílio prestado, e pelos contactos estabelecidos com o CDRsp que tornaram possível a componente de controlo dimensional realizada neste trabalho.

Ao Vice-Diretor Artur Mateus, aos Engenheiros Cyril dos Santos e David Correia, por toda a disponibilidade e auxílio prestados na componente de controlo dimensional realizada no CDRsp.

A todos os colaboradores da MAHLE, em especial, ao futuro Engenheiro Tiago Fernandes, e aos operadores PVD, por toda a disponibilidade e auxílio prestados na elaboração de testes e análises na empresa.

A todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho e não foram acima mencionadas.

Resumo

O processo de deposição física em fase de vapor (PVD) é utilizado pela empresa MAHLE Componentes de Motores S.A. para revestimento de segmentos de pistão com nitreto de cromo. Neste trabalho, é abordada a otimização deste processo, com o intuito de melhorar a erosão/o consumo das fontes de evaporação. Para tal, cada fonte tem a si associada duas bobinas (intermédia e externa), cuja função é controlar o arco elétrico através da geração de campos eletromagnéticos. Assim, foram alteradas as intensidades de corrente das bobinas, para valores progressivamente mais baixos, de forma a promover a maior aleatoriedade possível do arco elétrico, com o fim de se gerarem superfícies e perfis de erosão mais homogêneos que os originais.

Através da componente de controlo dimensional realizada no Centro para o Desenvolvimento Rápido e Sustentado do Produto (CDRsp), verificou-se que a atualização dos parâmetros das bobinas originam melhorias significativas, quer na quantidade de material utilizado, quer na duração das fontes de evaporação.

Palavras-chave: Fonte de Evaporação, Arco Catódico, Campo Eletromagnético, PVD, Nitreto de Cromo.

Abstract

The process of physical vapor deposition (PVD) is used at MAHLE Componentes de Motores S.A. to coat piston rings with chromium nitride. In this present work, the process optimization is performed in order to improve erosion/consumption of evaporation sources (targets). Therefore, each target has associated two coils (outer and middle) whose function is to control the electric arc, by using electromagnetic fields. Thus, the current intensities of coils were changed to progressively lower values, in order to promote the greatest possible randomness of electric arc, to generate surfaces and profiles more homogeneous than the original ones.

Through dimensional control component, held in Centre for Rapid and Sustainable Product Development (CDRsp), it was found that updating coils parameters generates significant improvements for the amount of used material, increasing targets lifetime.

Keywords Target, Cathodic Arc, Electromagnetic Field, PVD, Chromium Nitride.

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Gráficos.....	xiii
Índice de Tabelas	xv
Siglas	xvii
1. Introdução.....	1
1.1. A Empresa.....	1
1.2. Revestimentos PVD.....	2
1.3. Otimização do Processo PVD.....	3
1.4. Centro para o Desenvolvimento Rápido e Sustentado do Produto – CDRsp.....	5
2. Deposição Física em Fase De Vapor – PVD.....	7
2.1. Deposição Reativa por Evaporação a Arco Catódico Guiado	9
2.1.1. Deposição Reativa	10
2.1.2. Arco Catódico Guiado	12
2.2. Etapas do Processo de Revestimento.....	13
2.2.1. Limpeza	14
2.2.2. Deposição da Camada Intermédia.....	15
2.2.3. Deposição da Camada Funcional	16
2.3. Equipamento PVD – Flexicoat750	17
2.3.1. Fontes de Evaporação	19
3. Procedimento Experimental	21
3.1. Testes Visuais ao Comportamento do Arco Elétrico	21
3.2. Implementação dos Novos Programas.....	22
3.3. Comparação Visual dos Resultados e Discussão.....	23
3.4. Controlo Dimensional – CDRsp.....	24
4. Resultados e Discussão.....	27
4.1. Análise das Propriedades do Revestimento Depositado.....	27
4.2. Resultados na Empresa	28
4.3. Resultados no Centro de Investigação – CDRsp	32
4.3.1. Programa Original da Empresa – Alvos 1, 2 e 3	32
4.3.1. Programas Implementados – Grupo 3	35
4.3.2. Programa P6 – Grupo 3	37
4.4. Considerações Finais	39
5. Conclusão	41
6. Referências Bibliográficas.....	43
APÊNDICE A – Programa Original P0	45
APÊNDICE B – Programas Implementados.....	49
APÊNDICE C – Programa P6.....	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Exemplo de produtos da empresa. <i>Adaptada</i> [1]	1
Figura 1.2. Algumas das mais conceituadas marcas de automóveis clientes da empresa.	2
Figura 1.3. Segmento nitrurado com deposição de CrN na face de contato. <i>Adaptada</i> [3] ..	2
Figura 1.4. Fontes de evaporação: (a) início de vida; (b) fim de vida.	5
Figura 1.5. Instalações do CDRsp. <i>Adaptada</i> [6]	5
Figura 2.1. Etapas de deposição do processo PVD. <i>Adaptada</i> [10]	7
Figura 2.2. Técnicas que constituem o processo PVD. [9].....	8
Figura 2.3. Funcionamento do processo de revestimento. <i>Adaptada</i> [12]	9
Figura 2.4. Representação da deposição reativa. <i>Adaptada</i> [3].....	10
Figura 2.5. Exemplo de macro partícula. [7].....	11
Figura 2.6. Efeito do campo eletromagnético no arco elétrico: (a) sem corrente; (b) com corrente.	12
Figura 2.7. Etapas do processo de revestimento na empresa.....	13
Figura 2.8. Representação da limpeza. <i>Adaptada</i> [12].....	14
Figura 2.9. Representação da deposição da camada intermédia. <i>Adaptada</i> [12]	15
Figura 2.10. Camada intermédia.	15
Figura 2.11. Representação da deposição da camada funcional. <i>Adaptada</i> [12]	16
Figura 2.12. Máquinas Flexicoat750.	17
Figura 2.13. Mesa com segmentos após PVD.	17
Figura 2.14. Numeração das fontes de evaporação no interior da máquina FLC750.....	18
Figura 2.15. Bobines geradoras de campos: (a) externa; (b) intermédia.	18
Figura 2.16. Fonte de evaporação em desenho CAD.	19
Figura 3.1. Parâmetros das bobines utilizados nos testes visuais.....	21
Figura 3.2. Exemplo da comparação visual dos resultados obtidos.	23
Figura 3.3. Equipamento T-SCAN CS da Steinbichler. [15]	24
Figura 3.4. Exemplo de funcionamento do T-SCAN CS no CDRsp.	24
Figura 3.5. Exemplo de controlo dimensional em COMETInspect.	25
Figura 4.1. Dados do analista 1.	27
Figura 4.2. Dados do analista 2.	27
Figura 4.3. Esquema para análise das superfícies e perfis de erosão.	32

Figura 4.4. Superfícies de erosão dos alvos 1, 2 e 3 geradas pelo programa P0 original. ...	33
Figura 4.5. Perfis de erosão dos alvos 1, 2 e 3 gerados pelo programa P0 original.	33
Figura 4.6. Superfície e perfil de erosão do alvo 3 gerados pelo programa P0 - referência.	34
Figura 4.7. Superfícies de erosão do grupo 3 geradas pelos novos programas.	35
Figura 4.8. Perfis de erosão do grupo 3 gerados pelos novos programas.	35
Figura 4.9. Superfícies de erosão do alvo 3 gerados pelos programas P0 e P6.	37
Figura 4.10. Perfis de erosão do alvo 3 gerados pelos programas P0 e P6.	37
Figura 4.11. Perspetiva da erosão do alvo 3 – programa P0.	38
Figura 4.12. Perspetiva da erosão do alvo 3 – programa P6.	38

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1.1. Percentagem de custos na produção de segmentos com revestimentos PVD. ...	3
Gráfico 1.2. Percentagem de custos no processo PVD.....	4
Gráfico 4.1. Melhoria no tempo de vida das fontes.....	28
Gráfico 4.2. Melhoria em número de cargas.	29
Gráfico 4.3. Melhoria em material utilizado das fontes.	30
Gráfico 4.4. Melhoria no rendimento das fontes em função do material utilizado.	31
Gráfico 4.5. Melhoria em número de trocas de fontes de evaporação.	31
Gráfico 4.6. Dados obtidos com a aplicação do programa P6 nos últimos 3 meses.	39

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Novos programas implementados.....	22
Tabela 4.1. Dados do grupo 3 para os novos programas implementados	36

SIGLAS

CDRsp – Centro para o Desenvolvimento Rápido e Sustentado do Produto

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

FLC750 – Flexicoat750

IPL – Instituto Politécnico de Leiria

PVD – Deposição física em fase de vapor

RRC850 – Rapid Ring Coater850

1. INTRODUÇÃO

No decorrer deste trabalho é abordada a otimização de um processo de revestimento, realizado por deposição física em fase de vapor - PVD, método utilizado pela empresa MAHLE – Componentes de Motores, S.A. para revestimento dos seus produtos.

1.1. A Empresa

A empresa MAHLE – Componentes de Motores, S.A. surgiu em Portugal em 1990, inicialmente com a designação Cofapeuropa S.A. do grupo brasileiro Cofap. A integração no grande grupo MAHLE apenas se sucedeu em 1997. Neste momento, o principal objetivo da empresa é a produção de segmentos de pistão (Figura 1.1) para os mais variados tipos de veículos, sejam ligeiros ou pesados, a gasolina, gasóleo, GPL, etc.



Figura 1.1. Exemplo de produtos da empresa. *Adaptada [1]*

Reconhecida internacionalmente pelos seus clientes (Figura 1.2), a empresa disponibiliza uma vasta gama de produtos, desde segmentos de compressão a segmentos de óleo, bem como diferentes tipos e métodos de revestimento, que vão de crómio, crómio cerâmico, até às ligas de última geração aplicadas por PVD.



Figura 1.2. Algumas das mais conceituadas marcas de automóveis clientes da empresa.

1.2. Revestimentos PVD

Devido à crescente exigência do mercado automóvel quanto ao modo e às condições de funcionamento, os segmentos de pistão são componentes de desgaste fundamentais, pois em situações extremas a sua falha leva à gripagem total do motor. Como tal, é necessário o fabrico deste tipo de produtos com elevada qualidade, onde propriedades como a durabilidade, o desgaste, a vedação de gases, o controlo de consumo de óleo, as emissões para a atmosfera, a tolerância, sejam tomadas em conta, para que no conjunto se retirem mais e melhores rendimentos dos motores. [2]

De modo a diminuir o desgaste entre a superfície de trabalho e a camisa do cilindro, a empresa dispõe de diferentes tipos de revestimentos com os quais reveste os seus produtos, sendo o nitreto de cromo – CrN um deles (Figura 1.3).

Confidencial

Figura 1.3. Segmento nitrurado com deposição de CrN na face de contato. Adaptada [3]

O interesse pelo nitreto de cromo tem vindo a aumentar nos últimos anos, uma vez que devido às suas qualidades tribológicas, como elevada resistência à corrosão, elevada dureza (cerca de 2000HV), baixo coeficiente de atrito (cerca de 0,1 em condições de lubrificação), o tornam um ótimo revestimento para aplicações como esta, onde a resistência ao desgaste é crucial. É portanto uma excelente alternativa ao cromo eletrodepositado (também disponível na empresa), uma vez que a deposição de CrN é geralmente efetuada por processo PVD. [4] [5]

1.3. Otimização do Processo PVD

Confidencial

Gráfico 1.1. Percentagem de custos na produção de segmentos com revestimentos PVD.

Confidencial

Gráfico 1.2. Percentagem de custos no processo PVD.

Como foi referido, o principal objetivo deste trabalho é a otimização do processo PVD, mais concretamente do desgaste das fontes de evaporação, com o intuito de aumentar o seu rendimento. Este pode refletir-se de forma direta, em número de cargas suplementares de segmentos.

Confidencial

Confidencial

Figura 1.4. Fontes de evaporação: (a) início de vida; (b) fim de vida.

De forma a compreender como varia, e até quantificar o desgaste das fontes de evaporação, foi realizada uma componente de controlo dimensional no centro para o desenvolvimento rápido e sustentado do produto – CDRsp.

1.4. Centro para o Desenvolvimento Rápido e Sustentado do Produto – CDRsp

Criado em Maio de 2007, o centro para o desenvolvimento rápido e sustentado do produto (Figura 1.5) é uma unidade orgânica do Instituto Politécnico de Leiria – IPL.



Figura 1.5. Instalações do CDRsp. *Adaptada [6]*

Atualmente, é um dos 3 centros classificado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia – FCT como “excelente” na área da investigação em Engenharia Mecânica. Como consequência desta avaliação, o centro tornou-se uma unidade do IPL com autonomia administrativa, académica e científica, cuja gestão e organização é realizada pelo conselho de direção, constituído por 1 diretor e 2 vice-diretores.

O CDRsp visa contribuir para o avanço da ciência e tecnologia com produtos, materiais e processos cada vez mais adequados, eficazes e eficientes, realizando para tal investigação de carácter científico e tecnológico, fornecendo consultorias, formações e serviços de investigação em áreas estratégicas, do desenvolvimento rápido e sustentado do produto. [6]

2. DEPOSIÇÃO FÍSICA EM FASE DE VAPOR – PVD

A deposição física em fase de vapor, do inglês *Physical Vapour Deposition*, é um conjunto de técnicas de revestimento que nos últimos anos tem vindo a ganhar cada vez mais importância. Sendo um processo conhecido pela capacidade de deposição de filmes finos, com excelentes propriedades tribológicas a relativamente baixa temperatura, as técnicas PVD permitem a deposição dos mais variados tipos de materiais (metais, ligas, compostos, compósitos) em diferentes tipos de substratos (metais, cerâmicos, vidros, polímeros). Tem ainda a vantagem de ser um processo com baixo impacto ambiental, uma vez que tais propriedades conseguem ser obtidas com pouca energia e matéria-prima, bem como poluição ambiental. Torna-se então uma boa alternativa a outros tipos de processos de revestimento, como por exemplo o Galvânico, muito utilizado industrialmente, que envolve compostos de crómio hexavalente (CrVI) perigosos à saúde humana, cujo desuso e até eventual eliminação é fundamentado por lei em vários países. [7] [8] [9]

Geralmente em vácuo, o processo PVD é caracterizado pelo seu método de revestimento, composto por 3 etapas distintas (Figura 2.1), todas elas puramente físicas e comuns às várias técnicas de deposição.

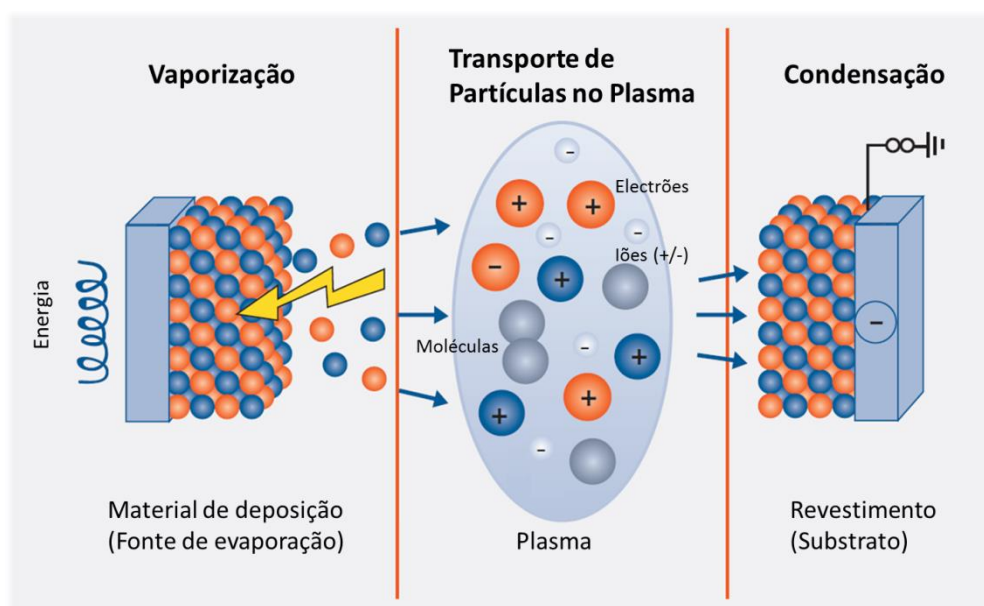


Figura 2.1. Etapas de deposição do processo PVD. Adaptada [10]

O material de deposição que inicialmente pode estar no estado sólido ou líquido, é levado à sua fase gasosa. Após isto, as partículas vaporizadas são transportadas em direção ao substrato, onde acabam por se condensar, dando origem ao crescimento do filme.

As diferentes formas de vaporizar as partículas e de condensá-las no substrato, permite a caracterização das várias técnicas que constituem o processo PVD, como mostra a Figura 2.2.

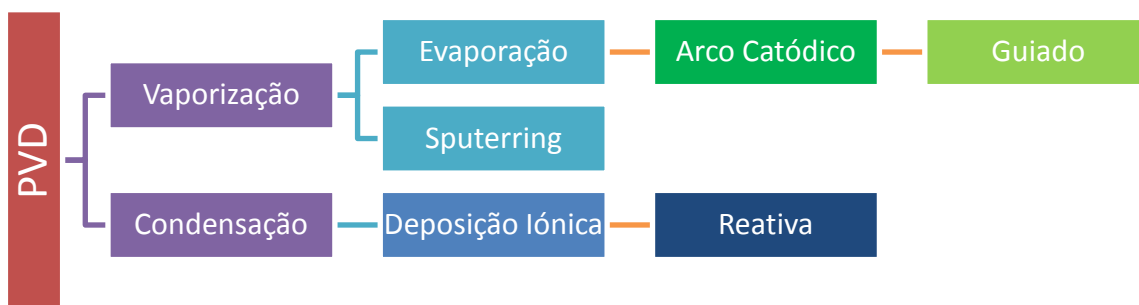


Figura 2.2. Técnicas que constituem o processo PVD. [9]

Confidencial

2.1. Deposição Reativa por Evaporação a Arco Catódico Guiado

De uma forma global, a deposição iónica por evaporação a arco catódico faz parte da família de técnicas PVD, e pode ser descrita como sendo a vaporização de partículas metálicas (plasma) em vácuo, através da incidência de um arco eléctrico com elevada densidade de corrente (10^9 W/cm^2) e baixa voltagem, na superfície de uma fonte de evaporação. A deposição do material é conseguida devido à aplicação/existência de uma diferença de potencial (*bias*) entre o plasma (material ionizado pelo arco eléctrico) e o substrato (face de trabalho do segmento).

O funcionamento do processo de revestimento pode ser verificado na Figura 2.3.

Confidencial

Figura 2.3. Funcionamento do processo de revestimento. *Adaptada [12]*

Esta técnica destaca-se pelas elevadas energias de condensação com que o plasma se deposita no substrato, e pelo constante bombardeamento iónico. Tais propriedades são conseguidas devido à capacidade que o arco eléctrico tem de evaporar grandes quantidades de partículas metálicas com uma elevada taxa de ionização (podendo mesmo chegar aos 100%), e que na presença de um *bias* aplicado ao substrato, leva a uma

deposição altamente energética e eficaz de partículas eletricamente carregadas (deposição iónica). O facto de existir um plasma altamente ionizado pelo arco elétrico, na presença de uma diferença de potencial associada ao substrato, aumenta substancialmente o rendimento desta técnica quando comparando com outras da família PVD. [8] [11]

2.1.1. Deposição Reativa

O nome “deposição reativa” advém da particularidade do processo em que, para além do material que se encontra nas fontes de evaporação, é introduzido na câmara de deposição um gás reativo ao processo. Devido à sua constituição e a todo o potencial energético presente nesta técnica, existe uma tendência para se estabelecerem ligações químicas entre o material das fontes e o gás reativo, possibilitando assim o revestimento de substratos com materiais como o CrN. A ativação do gás dentro da câmara de deposição pode ocorrer de várias formas (Figura 2.4): o gás pode ser ionizado pelo arco elétrico (tal como o material dos alvos), daí por vezes a sua introdução junto aos cátodos; através de choques atómicos no plasma (já ionizado) gerado pelo arco elétrico, onde iões de crómio se neutralizam ao colidirem com moléculas de azoto, ionizando-as; ou por fim, na fase de condensação, através do impacto de iões de crómio com moléculas de azoto já inseridas no substrato. Geralmente, a ativação do gás ocorre maioritariamente no plasma, daí a sua introdução entre o plasma e o substrato.

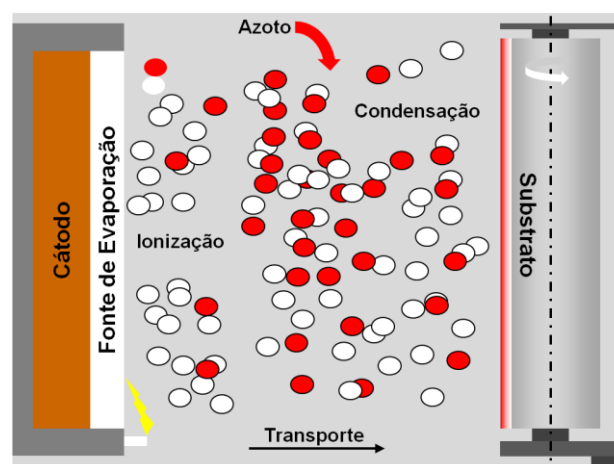


Figura 2.4. Representação da deposição reativa. Adaptada [3]

O processo de evaporação por arco catódico é também conhecido por gerar macro partículas (*droplets*) (Figura 2.5), principal ponto negativo e entrave desta técnica.

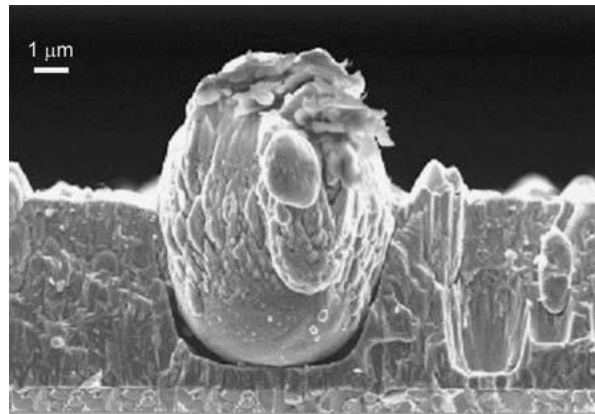


Figura 2.5. Exemplo de macro partícula. [7]

Embora presentes, ao ser utilizado um gás de trabalho como o azoto, a tendência é de se gerarem menos e menores macro partículas. Isto deve-se à reação do azoto com o crómio na superfície do alvo, contaminando-o com CrN, cujo ponto de fusão é superior ao material das fontes, diminuindo assim o tamanho das crateras de erosão do arco, e por sua vez a emissão de macro partículas. [11] [9] [13] [7]

2.1.2. Arco Catódico Guiado

O nome “arco catódico guiado” advém da particularidade do arco elétrico ser de movimento controlado, através de campos eletromagnéticos gerados por bobines que se encontram por de trás de cátodos. É assim possível, de uma forma mais ou menos precisa, alinhar e guiar o movimento do arco elétrico, ajustando a corrente que passa nas bobines (Figura 2.6).

Confidencial

(a) (b)

Figura 2.6. Efeito do campo eletromagnético no arco elétrico: (a) sem corrente; (b) com corrente.

Este parâmetro é fundamental à execução deste trabalho, pois é possível traçar diferentes perfis de erosão nas fontes sem que a deposição seja afetada, permitindo retirar e aproveitar mais material, tornando o processo mais rentável. Além de um controlo no desgaste, a ionização do gás reativo (azoto) é significativamente melhorada na presença de campos eletromagnéticos, bem como o transporte e condensação do plasma no substrato. É importante referir que, tal como abordado no subcapítulo 2.1.1, a tendência é de se gerarem menos e menores macro partículas, quando usados arcos catódicos de movimento controlado. Isto deve-se ao facto de existir um menor tempo de interação entre arco-cratera-plasma, uma vez que o efeito do campo eletromagnético leva a um aumento da velocidade do arco, e a uma maior aleatoriedade dos locais de desgaste (*race track*). [11]
[9]

2.2. Etapas do Processo de Revestimento

Confidencial

Figura 2.7. Etapas do processo de revestimento na empresa.

Confidencial

2.2.1. Limpeza

Confidencial

Figura 2.8. Representação da limpeza. *Adaptada [12]*

[11] [8] [9]

Confidencial

2.2.2. Deposição da Camada Intermédia

Confidencial

Figura 2.9. Representação da deposição da camada intermédia. *Adaptada [12]*

Confidencial

Figura 2.10. Camada intermédia.

2.2.3. Deposição da Camada Funcional

Confidencial

Figura 2.11. Representação da deposição da camada funcional. *Adaptada* [12]

[5] [14] [4]

2.3. Equipamento PVD – Flexicoat750

Confidencial

Figura 2.12. Máquinas Flexicoat750.

Confidencial

Figura 2.13. Mesa com segmentos após PVD.

Confidencial

Figura 2.14. Numeração das fontes de evaporação no interior da máquina FLC750.

Confidencial

Figura 2.15. Bobines geradoras de campos: (a) externa; (b) intermédia.

2.3.1. Fontes de Evaporação

Confidencial

Figura 2.16. Fonte de evaporação em desenho CAD.

Confidencial

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

1. Testes visuais ao comportamento do arco elétrico;
2. Implementação dos novos programas;
3. Comparação visual dos resultados e discussão;
4. Controlo dimensional no CDRsp;

3.1. Testes Visuais ao Comportamento do Arco Elétrico

Confidencial

Figura 3.1. Parâmetros das bobines utilizados nos testes visuais.

3.2. Implementação dos Novos Programas

Confidencial

Tabela 3.1. Novos programas implementados.

Confidencial

Confidencial

3.3. Comparação Visual dos Resultados e Discussão

Confidencial

Figura 3.2. Exemplo da comparação visual dos resultados obtidos.

3.4. Controlo Dimensional – CDRsp

De modo a analisar e complementar os resultados obtidos na empresa, foi utilizado um equipamento de digitalização 3D, o T-SCAN CS da empresa Steinbichler (Figura 3.3), disponível no centro de investigação do IPL.

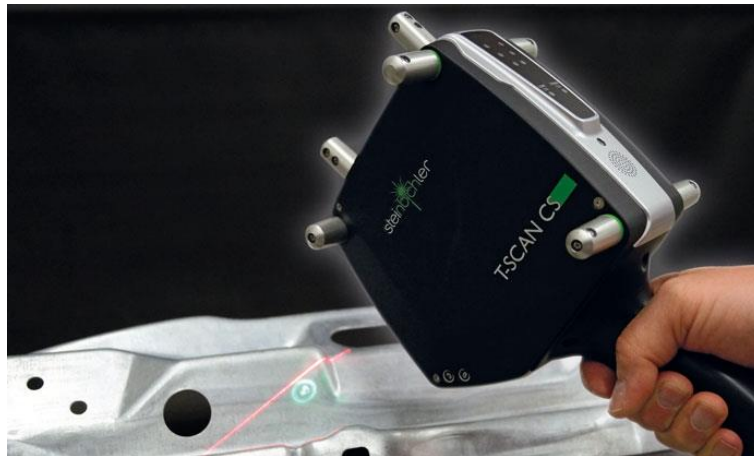


Figura 3.3. Equipamento T-SCAN CS da Steinbichler. [15]

O equipamento T-SCAN CS é composto por um scanner a laser de mão constituído por díodos, que através de um sistema de *tracking* ótico (T-TRACK CS) (Figura 3.4) faz a triangulação e localização espacial dos pontos captados pelo feixe laser, dando assim origem a uma nuvem de pontos, e por sua vez forma à digitalização 3D.

Confidencial

Figura 3.4. Exemplo de funcionamento do T-SCAN CS no CDRsp.

Este equipamento revela medições altamente precisas, obtidas a uma elevada velocidade de digitalização, com resoluções que podem ir até 0,075mm, tornando-o assim perfeito para a componente de controlo dimensional necessária a este trabalho. [15]

De forma a serem comparadas as várias superfícies e perfis de erosão gerados, foram digitalizadas, uma a uma, as fontes de evaporação, e virtualmente sobrepostas num programa de pós-processamento (COMETInspect) (Figura 3.5), que através de aproximações de pontos, calcula a diferença dimensional entre a referência CAD (fonte nova, Figura 2.16) e a digitalização (controlo dimensional).

Confidencial

Figura 3.5. Exemplo de controlo dimensional em COMETInspect.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise das Propriedades do Revestimento Depositado

Confidencial

Figura 4.1. Dados do analista 1.

Confidencial

Figura 4.2. Dados do analista 2.

4.2. Resultados na Empresa

Confidencial

Gráfico 4.1. Melhoria no tempo de vida das fontes.

Confidencial

Gráfico 4.2. Melhoria em número de cargas.

Confidencial

Gráfico 4.3. Melhoria em material utilizado das fontes.

Confidencial

Gráfico 4.4. Melhoria no rendimento das fontes em função do material utilizado.

Confidencial

Gráfico 4.5. Melhoria em número de trocas de fontes de evaporação.

Confidencial

4.3. Resultados no Centro de Investigação – CDRsp

Como já foi referido, de modo a analisar/complementar os dados obtidos na empresa, foram digitalizadas, uma a uma, as fontes de evaporação, com o intuito de comparar e perceber de que forma as superfícies e os perfis de erosão evoluíram ao longo da implementação dos vários programas.

4.3.1. Programa Original da Empresa – Alvos 1, 2 e 3

No APÊNDICE A encontram-se para consulta, os resultados obtidos do controlo dimensional dos alvos.

Confidencial

Figura 4.3. Esquema para análise das superfícies e perfis de erosão.

Confidencial

Figura 4.4. Superfícies de erosão dos alvos 1, 2 e 3 geradas pelo programa P0 original.

Confidencial

Figura 4.5. Perfis de erosão dos alvos 1, 2 e 3 gerados pelo programa P0 original.

Confidencial

Figura 4.6. Superfície e perfil de erosão do alvo 3 gerados pelo programa P0 - referência.

4.3.1. Programas Implementados – Grupo 3

No APÊNDICE B encontram-se para consulta, os resultados obtidos do controlo dimensional aos novos programas implementados, dos alvos.

Confidencial

Figura 4.7. Superfícies de erosão do grupo 3 geradas pelos novos programas.

Confidencial

Figura 4.8. Perfis de erosão do grupo 3 gerados pelos novos programas.

Tabela 4.1. Dados do grupo 3 para os novos programas implementados

Confidencial

Confidencial

4.3.2. Programa P6 – Grupo 3

No APÊNDICE C encontram-se para consulta, os resultados obtidos do controlo dimensional ao programa P6, dos alvos.

Confidencial

Figura 4.9. Superfícies de erosão do alvo 3 gerados pelos programas P0 e P6.

Confidencial

Figura 4.10. Perfis de erosão do alvo 3 gerados pelos programas P0 e P6.

Confidencial

Figura 4.11. Perspetiva da erosão do alvo 3 – programa P0.

Confidencial

Figura 4.12. Perspetiva da erosão do alvo 3 – programa P6.

4.4. Considerações Finais

Confidencial

Gráfico 4.6. Dados obtidos com a aplicação do programa P6 nos últimos 3 meses.

Confidencial

5. CONCLUSÃO

- ✚ A alteração das intensidades de corrente das bobines não afetou as propriedades da camada depositada pela empresa;



Confidencial

- ✚ O controlo dimensional confirma também que existe um grupo crítico de desgaste, o qual se verificou para as fontes número 3;
- ✚ A atualização das intensidades de corrente das bobines demonstrou ser um fator determinante na alteração das superfícies e perfis que surgem da erosão das fontes de evaporação;
- ✚ Devido às novas superfícies e perfis obtidos pela atualização das intensidades de corrente das bobines, é possível a execução de 9 cargas suplementares no processo, passando de 20 para 29, respetivamente;
- ✚ O aumento do número de cargas permite a diminuição de 4 conjuntos de consumíveis por ano usados pela empresa;
- ✚ A diminuição do número de consumíveis permite uma redução no custo unitário de 0,01€ em cada segmento com revestimento PVD produzido pela empresa;

- ✚ O programa implementado que obteve melhor resultado (programa P6) foi validado com sucesso, devido a resultados positivos obtidos ao longo dos últimos 3 meses;

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] [Online]. Available: http://www.enginebuildermag.com/wp-content/uploads/MAHLE-Rings-Pack-_PR_1-web.jpg. [Acedido em 7 Julho 2015].
- [2] D. F. Viccino, “O Anel De Pistão,” Cofap, 1995.
- [3] M. F. Ferreira, “Optimização de Processo PVD tendo em vista ganhos de produtividade,” Porto, 2008.
- [4] M. F. Ferreira, “Nitruração e Revestimentos de CrN por Processo de PVD em Aços Inoxidáveis Martensíticos,” Porto, 2007.
- [5] P. Shi, J. Wang, C. Tian, Z. Li, G. Zhang, D. Fu e B. Yang, “Structure, mechanical and tribological properties of CrN thick coatings deposited by circular combined tubular arc ion plating,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 228, p. S534–S537, 15 Agosto 2013.
- [6] [Online]. Available: <http://cdrsp.ipleiria.pt/>. [Acedido em 7 Julho 2015].
- [7] A. Anders, *Cathodic Arcs - From Fractal Spots to Energetic Condensation*, 1 ed., vol. 50, Springer New York, 2008, p. 544.
- [8] A. Mubarak, E. Hamzah e M. R. M. Toff, “Review of Physical Vapour Deposition (PVD) Techniques for Hard Coating,” *Journal Mekanikal*, n.º 20, pp. 42-51, Dezembro 2005.
- [9] S. S. Guerreiro, “Estudo e Caracterização de Filmes Finos de Nitreto de Titânio Obtidos Por Evaporação A Arco Catódico e Deposição A Vácuo,” São Paulo, 1994.
- [10] “Heat & Surface Treatment,” [Online]. Available: <http://www.h-st.nl/upload/file/Downloads/Leaflet%20Vapour%20Deposition%20NL.pdf>. [Acedido em 08 Maio 2015].
- [11] A. Anders, “Cathodic Arc Plasma Deposition,” *Vacuum Technology & Coating*, vol. 3, 30 Maio 2002.
- [12] L. Pinto e N. Costa, “Degradação e Protecção de Materiais - PVD Arco Catódico,” Coimbra, 2004.
- [13] D. M. Mattox, *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing*, Albuquerque: Noyes Publications, 1998.

[14] B. Warcholinski e A. Gilewicz, “Effect of substrate bias voltage on the properties of CrCN and CrN coatings deposited by cathodic arc evaporation,” *Vacuum*, vol. 90, p. 145–150, April 2013.

[15] [Online]. Available: <http://www.steinbichler.de/pt/>. [Acedido em 7 Junho 2015].

Bibliografia Segundo Norma: IEEE 2006

APÊNDICE A – PROGRAMA ORIGINAL P0

Programa P0 – Alvo 1

Confidencial

Programa P0 – Alvo 2

Confidencial

Programa P0 – Alvo 3

Confidencial

Programa P0 – Alvo 3 Perspetiva

Confidencial

APÊNDICE B – PROGRAMAS IMPLEMENTADOS

Programa P0 – Alvo 3

Confidencial

Programa P1 – Alvo 3

Confidencial

Programa P2 – Alvo 3

Confidencial

Programa P3 – Alvo 3

Confidencial

Programa P4 – Alvo 3

Confidencial

Programa P5 – Alvo 3

Confidencial

Programa P6 – Alvo 3

Confidencial

APÊNDICE C – PROGRAMA P6

Programa P6 – Alvo 1

Confidencial

Programa P6 – Alvo 2

Confidencial

Programa P6 – Alvo 3

Confidencial

Programa P6 – Alvo 3 Perspetiva

Confidencial