

AVALIAÇÃO DE REVESTIMENTOS PRODUZIDOS POR ASPERSÃO TÉRMICA EM SUBSTRATO DA LIGA DE ALUMÍNIO 7075 – T3

D.T. de Macedo
C.A.R. Gouvêa
L.B. Cruvinel
R. Nucci
L.C. Casteletti

mecusp@gmail.com

EESC – Escola de Engenharia de São Carlos

RESUMO

Ligas de alumínio 7075-T3 são utilizadas na indústria aeronáutica, porém, sua resistência contra corrosão e/ou desgaste são relativamente baixas. O desempenho de componentes que trabalham em condições severas de uso pode ser otimizada pela deposição de revestimentos por aspersão térmica, que constitui-se num processo de simples produção e não deteriora as características do material base. Dentre os revestimentos disponíveis, destacam-se as superligas à base de cobalto, mais conhecidas como Stellite, que apresentam bom desempenho contra o desgaste e à corrosão, bem como o aço inoxidável AISI420 com adição de Corodur600. No presente trabalho, foram depositados esses dois tipos de revestimentos pelos processos de aspersão térmica LVOF e HVOF sobre a liga de alumínio 7075-T3. As camadas depositadas não produziram quedas de durezas nas interfaces do substrato. A camada de Stellite apresentou os maiores níveis de dureza e o melhor desempenho no ensaio de desgaste microabrasivo.

Palavras-chave: Alumínio, Stellite, AISI 420, Aspersão Térmica.

1. INTRODUÇÃO

A indústria aeroespacial necessita de materiais com relação resistência mecânica/peso cada vez mais elevada. As ligas de alumínio são largamente utilizadas em aplicações aeronáuticas, uma vez que atendem bem a esse requisito,

porém apresentam algumas limitações por não disporem de boa resistência contra a corrosão, além de apresentarem baixo nível de resistência ao desgaste. Uma das maneiras possíveis de se melhorar o desempenho das ligas de alumínio é a aplicação de camadas com materiais mais resistentes na superfície das peças, proporcionando a vantagem da união entre a boa resistência mecânica com baixa densidade das ligas de alumínio e a proteção contra corrosão e desgaste de materiais mais resistentes.

A partir da década de 40, ocorreu um grande desenvolvimento da técnica de deposição por aspersão térmica [1], que além de produção simples, em alguns casos praticamente não influencia termicamente o material base. Os processos de aspersão térmica podem ser divididos em dois grupos: o primeiro utiliza gases combustíveis como fonte de calor, e o segundo, utiliza a energia produzida por arco elétrico. O processo *LVOF (Low Velocity Oxygen Fuel)* utiliza como fonte de energia a queima de oxigênio e de acetileno. O material após ser aquecido é atomizado por meio de ar comprimido. Arame ou o pó do material que se deseja depositar na superfície do metal base podem ser utilizados no processo. No caso da deposição por *HVOF (High Velocity Oxygen Fuel)*, uma mistura de gases combustíveis e oxigênio a alta pressão é injetada na câmara de combustão, propiciando uma chama na faixa de 2900 °C, com uma velocidade dos gases de aproximadamente 2000 m/s. O pó do material a ser depositado é injetado na câmara e atinge a superfície a ser revestida com altas velocidade e temperatura, formando assim uma camada com menor porosidade, alta dureza, boa aderência e baixa rugosidade. Como nos dois processos a energia é proveniente da queima de gases, a camada formada por eles contém óxidos em sua estrutura. As propriedades dos revestimentos depositados dependem de fatores como porosidade, coesão entre as partículas e adesão ao substrato. Já a densidade da camada depositada dependerá do tipo do material, do método de deposição e das condições de aspersão.

A liga de Alumínio 7075, estudada neste trabalho, é muito utilizada atualmente para aplicações tanto aeroespaciais como industriais, principalmente na fabricação de matrizes para injeção.

O uso de ligas de cobalto para aplicações de resistência ao desgaste foi iniciado no início do século XX, com o desenvolvimento da família das ligas cobalto-cromo-tungstênio [2]. As ligas de cobalto foram denominadas "Stellite" em virtude de sua aparência brilhante, sem manchas. Tais ligas apresentam uso bastante

difundido devido às características essenciais para algumas aplicações, como grande resistência à corrosão, devido a alta porcentagem de cromo presente na liga, e boa resistência ao desgaste, devido aos carbonetos formados em sua matriz de cobalto, mesmo a temperaturas elevadas. Outro fator muito importante foi o desenvolvimento e caracterização da liga para melhorar seu desempenho em situações onde ocorre contato metal-metal não lubrificado, erosão por fluido a alta velocidade ou por choque de partículas sólidas [2]. Todos estes fatores possibilitaram a utilização da liga Stellite 6 em diferentes equipamentos, desde turbinas, bombas, válvulas e até mesmo em aplicações nucleares.

Os aços inoxidáveis martensíticos foram os primeiros a serem desenvolvidos industrialmente. Apresentam uma moderada resistência à corrosão, podendo sofrer tratamentos térmicos, alcançando altos níveis de resistência mecânica e dureza. Esses aços produzidos com a adição de cromo e carbono e são facilmente tratados termicamente. O teor de cromo varia entre 10,5 a 18% e o de carbono pode chegar a 1,2 %. As proporções de cromo e carbono são balanceadas para assegurar a formação da estrutura martensítica durante o tratamento térmico.

A caracterização laboratorial do comportamento ao desgaste das ligas citadas anteriormente pode fornecer importantes subsídios, referentes à sua aplicação em condições de trabalho [3]. Para a caracterização das camadas produzidas usando os processos, LVOF e HVOF em relação ao desgaste, no presente trabalho foi selecionado o ensaio microabrasivo de esfera livre, sendo utilizado como abrasivo uma mistura de água destilada e alumina, além dos ensaios de microdureza, medidas das porosidades e espessuras das camadas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho, foram utilizadas amostras com camadas depositadas por dois diferentes processos: HVOF e LVOF. Os materiais depositados sobre a liga de alumínio 7075-T3 foram Stellite 6 (HVOF) e uma liga formada pelo aço inoxidável AISI 420 com a adição de Corodur 600 (LVOF), contendo 50% de cada material. Para a caracterização das amostras, utilizou-se os seguintes procedimentos:

- Microscopia Ótica (aspecto microestrutural das camadas, espessura e porosidade);
- Microdurezas das camadas e substrato;

- Ensaios de desgaste microabrasivos com esfera livre (determinação do diâmetro das calotas e do volume desgastado);

2.1. Materiais utilizados

Os materiais foram depositados sobre o substrato, constituído da liga de alumínio 7075-T3. As tabelas 1 a 4 mostram as composições químicas dos materiais utilizados neste trabalho.

Tabela 1 – Composição química da liga de alumínio 7075.

Material	Composição Química (%peso)				
	Zn	Mg	Cu	Cr	Al
7075	5,6	2,5	1,6	0,23	Bal.

Tabela 2 – Composição química do Stellite 6.

Material	Composição Química (%peso)			
	Cr	Co	W	C
Stellite 6	28	Bal.	4	1,1

Tabela 3 – Composição química do aço inoxidável AISI 420.

Material	Composição Química (%peso)						
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Fe
AISI 420	0,3	1,0	0,04	0,03	1,0	12,0	Bal.

Tabela 4 – Composição química do Corodur 600.

Material	Composição Química (%peso)						
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Fe
Corodur 600	0,53	1,03	2,99	6,27	0,81	0,4	Bal.

2.2. Corpos de Prova

Os corpos de prova medindo 10 mm x 20 mm x 25 mm utilizados para os ensaios de desgaste microabrasivo foram obtidos após a deposição das camadas de Stellite 6 e de aço inoxidável AISI 420 com adição de Corodur 600 no substrato constituído da liga de alumínio 7075 – T3.

2.3. Preparação para análise micrográfica

Para a realização das medidas de porosidades e espessuras das camadas foram preparadas amostras dos dois tipos de revestimentos de acordo com as seguintes etapas:

- Corte transversal dos corpos de prova;
- Embutimento em baquelite;
- Preparação micrográfica convencional com lixamento, seguido de polimento final com óxido de cromo e alumina 0,3 μm ;

2.4. Microdureza

Para a obtenção das microdurezas das camadas e do substrato, utilizou-se um microdurômetro com o indentador tipo Vickers. As medidas foram realizadas na seção transversal da camada, para a obtenção de dados mais precisos. Foram realizadas dez medidas de dureza para cada camada. As características do ensaio como tempo, carga e procedimentos estão de acordo com a norma ASTM E384.

2.5. Análise Micrográfica

Para a obtenção das porosidades e espessuras das diferentes camadas, foram utilizadas amostras previamente polidas, para a aquisição das fotomicrografias em 10 regiões diferentes, e através destas imagens foram calculadas as porosidades e as espessuras de cada camada.

As imagens das calotas formadas nos ensaios microabrasivos foram capturadas e posteriormente medidas, traçando-se várias retas e por meio delas foram obtidos os diâmetros médios. Sabendo-se os valores dos diâmetros das calotas para cada tipo de camada e em diferentes distâncias percorridas, construiu-se o gráfico que ilustra o valor do desgaste para cada camada.

2.6. Ensaio de Desgaste

Para a realização dos ensaios de desgaste microabrasivos, foi utilizada uma máquina de desgaste microabrasivo com esfera livre, onde uma esfera de aço ligado ABNT 52100 temperado com diâmetro de 25,4 mm girava contra o corpo de prova. A

solução abrasiva pingada entre a esfera e a amostra, possuía a proporção de 0,32 gramas de abrasivo de alumina 5 µm para cada mililitro de água destilada.

A rotação da esfera foi de 159 rpm, com uma velocidade tangencial de 0,22 m/s. As distâncias percorridas nos ensaios foram 158,4 m, 237,6 m e 316,8 m. O ensaio foi repetido três vezes para cada distância, para o cálculo da média entre os diâmetros das calotas.

Para uma calota de desgaste com geometria esférica produzida por uma esfera de raio “R” numa amostra plana, o volume desgastado pode ser calculado de acordo com a seguinte relação [3]:

$$V = \pi \frac{b^4}{64R^2} \left(R - \frac{b^2}{8R} \right) \approx \frac{\pi b^4}{64R} \quad \text{para } b \ll R \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

R – é o raio da esfera;
b - é a diâmetro médio da calota;
V – é o volume de desgaste;

Para que os valores do volume desgastado sejam corretos, torna-se necessário garantir que a profundidade da calota não ultrapasse a espessura da camada depositada e para isso calcula-se a profundidade da calota da seguinte maneira:

$$h \approx \left[\frac{V}{\pi R} \right]^{0,5} \quad \text{para } h \ll R \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

h – é a profundidade de desgaste.

Outro importante parâmetro para a comparação do desgaste microabrasivo é o coeficiente de desgaste ou taxa de desgaste específica. Obtemos este valor através da seguinte relação [4]:

$$K = V / (S \times N) \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

K – Coeficiente de desgaste;
S – Distância percorrida no ensaio;
N – Carregamento normal;
V – Volume desgastado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os aspectos das camadas formadas pela aplicação dos diferentes materiais são mostrados nas figuras 2 e 3. A tabela 5 mostra a profundidade que as calotas formadas atingiram e as espessuras das camadas, indicando que em nenhum caso as camadas foram perfuradas, o que valida os ensaios de desgaste microabrasivo.

Tabela 5 – Resultados das espessuras médias das calotas obtidas para cada material e profundidade das calotas, calculadas de acordo com a equação 2 nas diferentes distâncias ensaiadas.

Material	Profundidade da calota (μm)			Espessura média da camada (μm)
	158,4 m	237,6 m	316,8 m	
Stellite 6	17,7	18,5	19,3	504
AISI 420 + Corodur600	27,8	31,7	35,2	1094
Alumínio 7075-T3	34,2	41,2	49,8	---

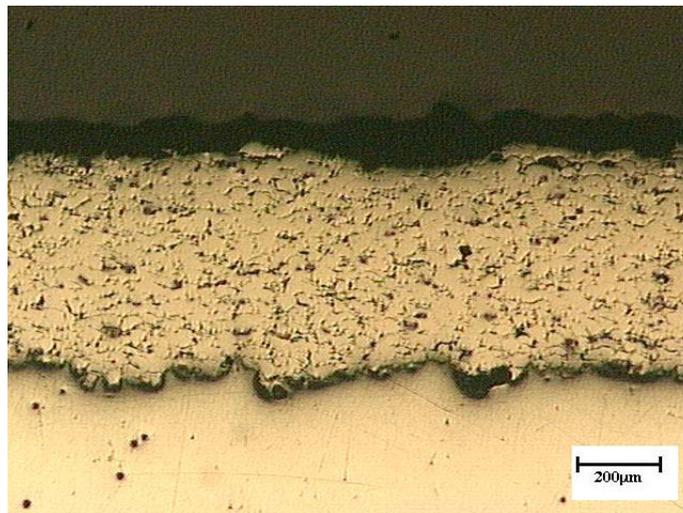


Figura 2: Fotomicrografia da camada formada por Stellite 6.

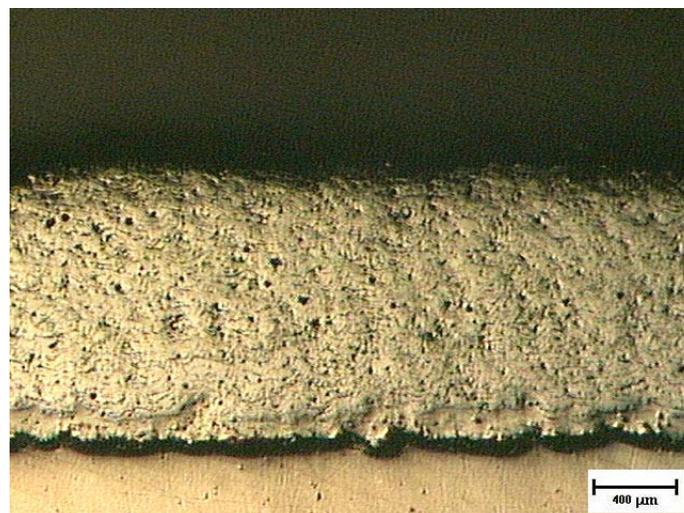


Figura 3: Fotomicrografia da camada formada pelo aço AISI 420 + Corodur 600.

Os aspectos típicos das calotas formadas pelo ensaio de desgaste microabrasivo com esfera livre na distância de 158,4 metros são mostrados nas figuras 4 a 6.

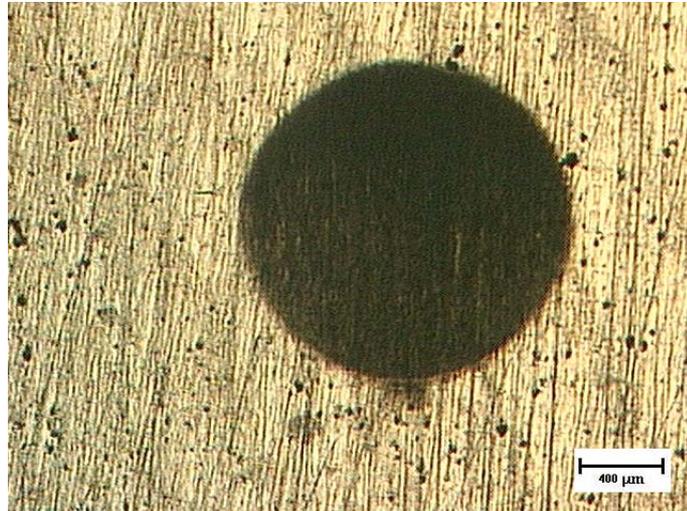


Figura 4: Imagem da calota formada na camada de Stellite.

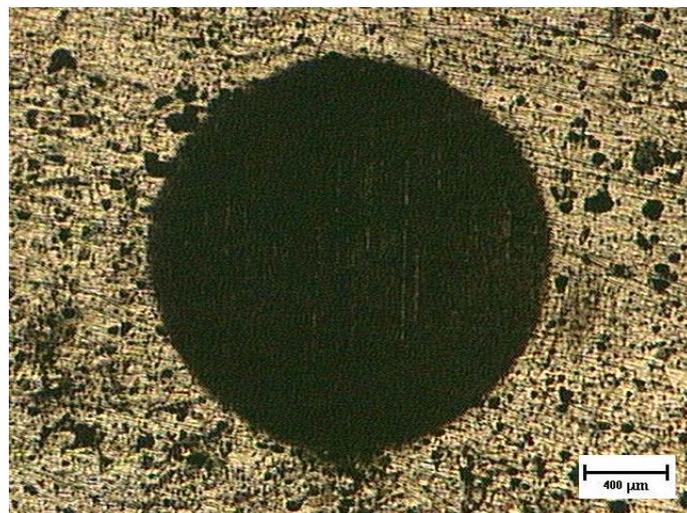


Figura 5: Imagem da calota formada na camada de aço inoxidável AISI 420 com a adição de Corodur 600.

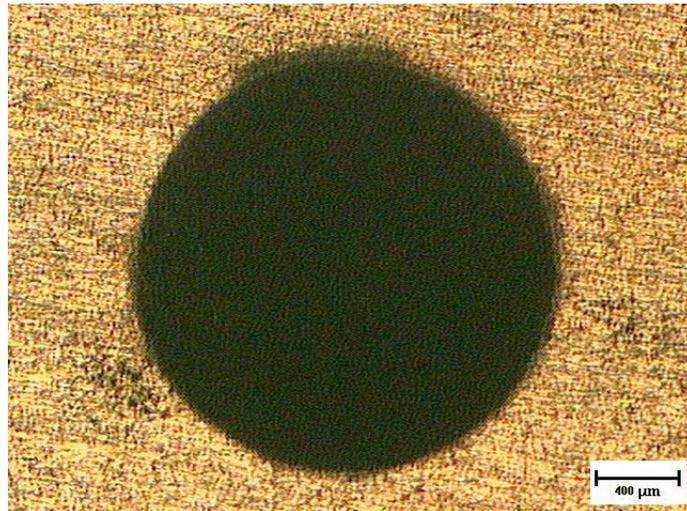


Figura 6: Imagem da calota formada no substrato de Alumínio 7075-T3.

Na tabela 6 apresenta-se os valores das durezas para cada amostra.

Tabela 6 – Resultados das durezas dos materiais.

Dureza das camadas (HV) carga 300 gf		
	Média	Desvio Padrão
Stellite 6	570,2	42
AISI 420 + Corodur 600	484,6	56
Alumínio 7075-T3	147,3	9

As medidas de durezas mostraram que a camada formada por Stellite 6 apresentou o melhor resultado, seguida pela camada composta pelo aço inoxidável AISI 420 com a adição de Corodur 600. Foi verificado também que o substrato possui uma dureza significativamente inferior em relação às encontradas nas camadas aspergidas.

Na tabela 7 encontram-se as medidas de durezas realizadas no substrato antes do processo de aspersão térmica e depois, sendo a segunda realizada logo abaixo da camada depositada.

Tabela 7 – Resultados das durezas no substrato (HV).

Dureza no substrato (HV) carga 200 gf		
Material Aplicado	Antes	Depois
Stellite 6	149,3	147,2
AISI 420 + Corodur 600	147,5	145,2

Por meio dos resultados das medidas de dureza foi possível verificar que os processos de aspersão térmica não influenciaram significativamente a dureza do substrato.

A tabela 8 apresenta os resultados das análises de porosidades.

Tabela 8 – Porosidade das camadas.

Porosidade das camadas (%)	
	média
Stellite 6	2,9
AISI 420 + Corodur 600	12,4

A grande diferença encontrada nas porosidades das camadas se deve ao fato da camada de Stellite 6 ter sido depositada pelo processo HVOF, e a camada formada pelo aço inoxidável AISI 420 com adição de Corodur 600 depositada pelo processo de LVOF.

A tabela 9 contém os valores dos coeficientes de desgaste encontrados para as camadas depositadas e para a liga de alumínio 7075-T3, calculada através dos ensaios de desgaste com distância percorrida de 316,8 m. Os gráficos dos volumes desgastados em relação à distância percorrida são mostrados na figura 7.

Tabela 9 – Coeficientes de desgaste para os diferentes materiais.

Material	Coef. de Desgaste “ K” (N/m²)
Stellite 6	$3,62 \times 10^{-13}$
AISI 420 + Corodur 600	$9,7 \times 10^{-13}$
Alumínio 7075-T3	$1,2 \times 10^{-12}$

Observa-se que a camada de Stellite 6 obteve a menor taxa de desgaste específica, seguida pela camada de AISI 420 com Corodur 600 e pela liga de alumínio 7075-T3.

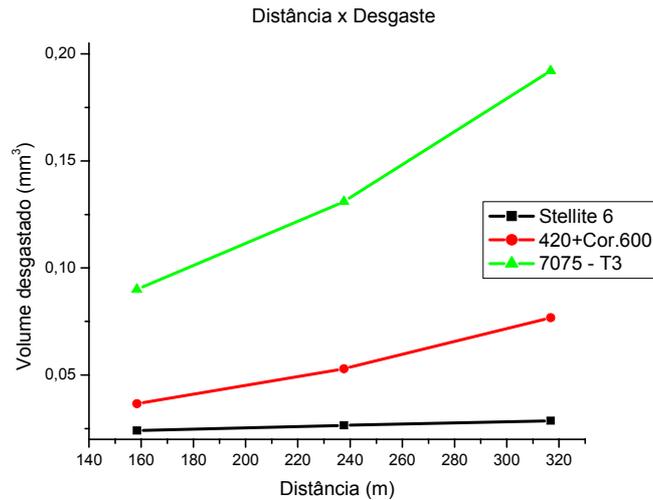


Figura 7 – Gráficos dos ensaios microabrasivos dos 3 diferentes materiais.

Observa-se que a camada formada pelo Stellite 6 apresentou os melhores resultados, seguida pela camada formada pelo aço inoxidável AISI 420 com adição de Corodur 600. O material base (7075-T3) apresentou o maior desgaste microabrasivo entre os materiais. Verifica-se aqui a grande efetividade das camadas para atuarem como revestimentos resistentes ao desgaste para a liga de alumínio.

3. Conclusões

O processo de aspensão térmica não exerceu influência significativa no substrato, que permaneceu com dureza semelhante à anterior ao processo de deposição das camadas. Tal comportamento é fundamental para viabilizar a aplicação de revestimentos, pois se houvesse queda de dureza significativa do substrato, o processo tornar-se-ia inviável.

Os ensaios indicaram que em relação à dureza e ao desgaste microabrasivo, a camada de Stellite 6 apresentou os melhores resultados, seguida pela camada do aço inoxidável AISI 420 com adição de Corodur 600. Isso mostra que a deposição de materiais pode ser uma forma eficiente de se melhorar o desempenho do substrato de alumínio, quando se necessita maior resistência ao desgaste e/ou corrosão.

4. Referências Bibliográficas

- [1] MENON, R. New Developments in hardfacing alloys. *Welding Journal*, v.75, n2, pp.43-49, Feb.1996.
- [2] WU, J.B.C., REDMAN, J.E. Hardfacing with cobalt and nickel alloys. *Welding Journal*, v.73, n.9, pp.63-68, Sept.1994.
- [3] Rutherford, K. L. Hutchings, I. M. A micro-abrasive test, with particular application to coated systems. *Surface and Coatings Technology* 79, p. 231-239, 1996.
- [4] Ceschini, L. Palombarini, G. Sambogna, G. Firrao, D. Scavino, G. Ubertalli, G. Friction and wear behaviour of sintered steels submitted to sliding and abrasion tests, *Tribology International* 39, pp 748 -755, 2006
- [5] American society for metal, metals handbook, 9 th Ed. , Ohio, ASM, 1981, V4.

COATINGS BY THERMAL SPRAY IN SUBSTRATE OF 7075-T3 ALUMINUM ALLOY

The 7075 Aluminum alloys are used in aeronautical industry, however, its corrosion and/or wear resistances are relatively low. The performance of components that work in severe conditions can be optimized by the coating deposition by thermal spray, that consists in a process of simple production and it does not spoil the characteristics of the material base. Amongst available coatings, the superalloys cobalt-base, more known as Stellite, present good performance against the wear and to the corrosion, as well as stainless steel AISI 420 with addition of Corodur 600. In the present work, two types of coatings obtained by thermal spray processes LVOF and HVOF on 7075-T3 aluminum alloy had been produced. The deposited layers had not produced falls hardness in the interfaces with the substrate. The layer of Stellite presented the higher levels hardness levels and the better performance in microabrasive wear test.

Key-words: Aluminum, Stellite, AISI 420, Thermal Spray.