

## EFFETTO DEL RIVESTIMENTO HVOF SUL COMPORTAMENTO A FATICA DELLA LEGA 6082-T6

<sup>a</sup> G. M. La Vecchia, <sup>a</sup> N. Franchi, <sup>b</sup> N. Lecis, <sup>c</sup> P. Marconi

*a Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Università di Brescia, Via Branze, 38, Brescia, marina.lavecchia@ing.unibs.it*

*b Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Via La Masa 34, Milano*

*c P. Marconi - 2 Effe Engineering Via Case Sparse, 105/107 Manerba del Garda (BS)*

### Sommario

L'esigenza di investigare gli effetti indotti da un rivestimento ottenuto utilizzando la tecnica di spruzzatura termica, HVOF, su di un substrato in lega di alluminio 6082-T6 costituisce la base di partenza della presente ricerca. In particolare il lavoro sperimentale effettuato ha consentito di caratterizzare la resistenza a fatica e lo stato tensionale residuo del rivestimento ottenuto depositando la polvere commerciale Woka 7302 ( $\text{Cr}_3\text{C}_2$  20NiCr) utilizzando la tecnica di deposizione HVOF. Poiché il ricorso a questa metodica di ricoprimento non è usuale per le leghe di alluminio è stato necessario definire i parametri di spruzzatura più idonei per le leghe leggere. Senza tale ottimizzazione, infatti, si possono causare sovrainvecchiamenti nel materiale del substrato, indurre stati tensionali elevati nei campioni e tali da deformare il substrato fino ad arrivare, al limite, a criccare il componente rivestito.

La sperimentazione ha dimostrato la possibilità di realizzare riporti HVOF su substrato in lega di alluminio da trattamento termico con ottimi risultati dal punto di vista di resistenza alla fatica dei pezzi rivestiti. I rivestimenti ottenuti sono risultati inoltre contraddistinti da una buona adesione con il substrato, vista l'assenza di delaminazione anche per sollecitazioni applicate superiori al carico di snervamento della lega leggera.

**Parole Chiave:** rivestimenti thermal spray, HVOF, substrato in lega di Al, fatica

### Introduzione

Per assicurare un incremento delle prestazioni in termini di resistenza all'usura ed alla corrosione è sempre più frequente il ricorso a rivestimenti mirati a modificare la sola superficie dei pezzi. Tali interventi, sia per quanto riguarda i rivestimenti sottili sia per quanto riguarda i rivestimenti spessi, hanno ormai raggiunto uno stadio di elevata ottimizzazione nel caso in cui il materiale del substrato sia un acciaio [1-5]. Sono necessari, invece, ancora perfezionamenti nel caso si voglia rivestire le leghe di alluminio; queste ultime presentano infatti, rispetto a numerose famiglie di acciai, vincoli molto più severi per quanto riguarda le temperature di deposizione per evitare modifiche microstrutturali che portino a riduzione della durezza del substrato e della rigidità del componente rivestito [6-7]. Interventi dedicati al miglioramento del comportamento all'usura delle leghe di alluminio sono peraltro

fortemente richiesti da numerosi settori industriali che devono assicurare il miglior compromesso tra ridotto peso del componente e durata dello stesso in applicazioni dove sono previste zone di contatto tra pezzo in lega leggera e materiale antagonista o dove l'ambiente, che verrà a contatto con il pezzo rivestito, può causare problemi di danneggiamento (es. cavitazione) [8-11].

Usualmente la tecnica di modifica della superficie più frequentemente utilizzata nel caso di substrato in lega di alluminio è l'ossidazione anodica [12-14]. Con tale tecnica si riescono ad ottenere, a costi contenuti, indubbi vantaggi sia in termini di resistenza all'usura sia di resistenza alla corrosione rispetto ai componenti non trattati superficialmente. In alternativa all'ossidazione anodica sono in corso studi e realizzazioni di prototipi di componenti in lega di alluminio rivestiti sia con film sottili sia con rivestimenti spessi ottenuti utilizzando metodiche che vanno dall'impiego del fascio di elettroni [15], al microplasma [9] fino alla spruzzatura termica [16].

Considerando in particolare la termospruzzatura è necessario ricordare la sua elevata versatilità come processo di ricoprimento che, non solo è in grado di produrre barriere termiche, rivestimenti antiusura e anticorrosione su diverse tipologie di substrato, ma è, altresì, in grado di realizzare rivestimenti notevolmente diversificati per quanto riguarda la composizione chimica e la percentuale di legante metallico [17-19]. L'impiego di questa tecnologia di rivestimento applicata a componenti che in esercizio debbano garantire prefissate proprietà di resistenza meccanica non può, inoltre, prescindere dallo stato tensionale indotto dall'applicazione del rivestimento. Infatti, l'impatto ad alta velocità delle particelle di polvere fuse o semifuse con il substrato o con lo strato di coating già depositato, causa inevitabilmente, deformazioni plastiche e gradienti termici, che non possono essere trascurati per una corretta analisi dello stato tensionale residuo del pezzo rivestito [20-21]. Sia la componente meccanica sia quella termica hanno effetto sul profilo delle sollecitazioni residue il cui andamento risente dei diversi parametri di deposizione adottati così come delle caratteristiche meccaniche e fisiche proprie del substrato e del materiale di rivestimento [22-23].

Indipendentemente dalla tecnica di deposizione utilizzata, una zona debole di molti componenti rivestiti risulta essere la superficie di separazione tra materiale base e rivestimento. Per ottimizzare le caratteristiche meccaniche dell'interfaccia è necessario, quindi, intervenire con una opportuna preparazione del substrato prima della deposizione del rivestimento, preparazione che dipenderà in modo sostanziale dal metodo di rivestimento prescelto (es. sabbiatura, pallinatura, lucidatura, ecc.). Considerando in particolare i rivestimenti ottenuti per spruzzatura termica è prassi comune effettuare interventi meccanici quali la pallinatura o la sabbiatura finalizzati al raggiungimento di livelli di rugosità superficiali tali da favorire l'ancoraggio meccanico delle particelle che costituiranno il rivestimento.

Nel presente lavoro si è scelto come substrato la lega 6082-T6, materiale che viene frequentemente utilizzato in componenti dove, oltre al basso peso specifico, siano richieste proprietà anticorrosive (es. impieghi nel settore architettonico per la produzione di serramenti e nel campo dei trasporti dove può essere utilizzato per la realizzazione di telai per moto e biciclette). Una limitazione al suo utilizzo per impieghi strutturali è spesso legata a valori di durezza, rigidità, resistenza allo snervamento, all'usura ed alla fatica notevolmente inferiori rispetto alle analoghe grandezze riferite a leghe ferrose. Proprio per superare tale problema il ricorso ad un rivestimento contraddistinto da elevate proprietà meccaniche, prima tra tutte la resistenza all'usura e ottima resistenza alla corrosione, può essere la soluzione in grado di estendere i campi di utilizzo di questa famiglia di leghe di alluminio da trattamento termico nell'industria dei trasporti e, più in generale, in tutte quelle applicazioni dove il basso peso specifico e le buone doti di formabilità e lavorabilità risultano essere proprietà irrinunciabili. Per questi ultimi utilizzi non può essere trascurata la caratterizzazione a fatica viste le sollecitazioni cicliche a cui sono spesso soggetti i prodotti.

Partendo da questi presupposti, nel presente lavoro, si è provveduto a rivestire il substrato in 6082-T6 con polveri commerciali di  $Cr_3C_2$  20NiCr ottimizzando i parametri di deposizione tenendo conto della necessità di escludere fenomeni di sovrainvecchiamento a carico del substrato. Le provette rivestite così ottenute sono state sottoposte a prove di fatica flessionale alternata ed i risultati ottenuti sono stati infine correlati con la microstruttura e con lo stato tensionale residuo misurato in corrispondenza del rivestimento.

## Parte sperimentale

### Quadro delle prove

Le provette per la caratterizzazione meccanica (prove di trazione e prove di fatica) sono state ricavate in direzione longitudinale da un estruso in 6082-T6 con sagoma ad L avente spessore di 9 mm. Le caratteristiche meccaniche ottenute mediante prove di trazione e di durezza sull'estruso prima della deposizione del rivestimento sono sintetizzate in Tabella I.

Materiale	$R_{p0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	A [%]	Durezza HB
6082 T6	315	342	15	100

Tabella I – Caratteristiche meccaniche dell'estruso prima della deposizione del riporto

In particolare per le prove di fatica dall'estruso sono stati ricavati campioni prismatici con giacitura longitudinale di dimensione 8x15x180 mm i quali sono stati in parte sottoposti a prove in assenza di rivestimento ed in parte rivesti utilizzando polvere di Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 20NiCr, in modo da ottenere un rivestimento di spessore prossimo ai 200 µm solo su una delle superfici 8x180 mm, superficie che nel corso delle prove di fatica flessionale verrà sollecitata a trazione.

Prima della deposizione del rivestimento le provette sono state sottoposte a sabbatura effettuata con polvere ceramica di forma sferica e contraddistinta da differente mesh: ZrO<sub>2</sub> 120 e ZrO<sub>2</sub> 600.

La scelta di due granulometrie delle particelle è motivata dalla volontà di ottenere due diversi gradi di finitura all'interfaccia, uno, ZrO<sub>2</sub> 600, che approssima la finitura standard dei campioni di acciaio da rivestire con la metodica thermal spray ( $R_a=2.7-3.5$  µm nel seguito del lavoro indicato come lotto A) ed uno, ZrO<sub>2</sub> 120, contraddistinto da una finitura meno accurata ma in grado di assicurare un miglior ancoraggio di tipo meccanico del rivestimento ( $R_a=4.5-5$  µm nel seguito indicato come lotto B). Immediatamente prima della deposizione i campioni da rivestire sono stati sottoposti ad un'operazione di pulizia della superficie agli ultrasuoni facendo uso di una soluzione di alcol etilico; è stato così possibile rimuovere i residui della sabbatura che, se presenti, agirebbero da discontinuità all'interfaccia causando inneschi prematuri della rottura durante le prove cicliche.

La definizione dei parametri di deposizione, sintetizzata in tabella II, ha richiesto un certo numero di prove preliminari di spruzzatura condotte al fine di escludere alterazioni microstrutturali del substrato riconducibili a fenomeni di sovrainvecchiamento.

Portata di O <sub>2</sub> [l/min]	Portata di Kerosene [ml/min]	Alimentazione della polvere [g/min]	Velocità di deposizione [m/s]	Distanza di spruzzo [pollici]	Interruzione della deposizione
830	430	70	0,1	14	Dopo ogni singola passata

Tabella II – Parametri di deposizione adottati per rivestire i campioni in lega 6082-T6

L'assenza del sovrainvecchiamento è stata valutata attraverso una serie di misure di microdurezza su sezioni trasversali lucidate dei campioni rivestiti a partire dall'interfaccia con il rivestimento, zona che, per quanto riguarda eventuali modifiche microstrutturali, è la più critica essendo sottoposta al massimo shock termico durante la fase di deposizione. Le misure di microdurezza sono state condotte con un microduremetro Vickers imponendo al penetratore un carico di 3N. Prove di microdurezza Vickers sono state inoltre effettuate in corrispondenza del rivestimento avendo cura di ripetere la misura almeno cinque volte per valutare il grado di disomogeneità del materiale che costituisce il riporto stesso (es. porosità).

Per quanto riguarda le procedure sperimentali adottate per la caratterizzazione a fatica, prima dell'esecuzione della prova i campioni sono stati sottoposti ad una operazione di lucidatura della

superficie rivestita effettuata mediante l'impiego di dischi dedicati alla lappatura di materiali duri. Tale operazione si è resa necessaria per simulare la finitura dei pezzi rivestiti per termospruzzatura che, in genere, prima della messa in esercizio vengono rettificati.

La prova di fatica a flessione alternata è stata condotta nella configurazione su quattro punti in accordo con la norma UNI 3964 utilizzando una macchina servoidraulica Instron 8501 dotata di cella di carico da 100 kN. Le prove sono state effettuate facendo uso della metodica stair case a temperatura ambiente utilizzando una frequenza di 18 Hz e considerando come non rotte le provette dopo un numero di cicli pari a  $3 \cdot 10^6$ . La macchina è stata impostata con un andamento sinusoidale dei carichi con  $R=0$ .

Sebbene il numero di cicli scelto come soglia di vita infinita sia basso per poter caratterizzare il substrato in lega di alluminio è bene precisare che tale valore ha l'obiettivo di ottenere una caratterizzazione del comportamento a fatica del rivestimento che, essendo prevalentemente costituito da materiale ceramico, presenta un limite a vita infinita sicuramente inferiore a  $3 \cdot 10^6$  cicli.

Le prove effettuate non devono pertanto essere considerate esaustive per il substrato in lega leggera per il quale il dato ottenuto di limite di fatica non può che sovrastimare l'effettiva resistenza alle sollecitazioni cicliche (vita infinita per leghe di alluminio:  $N \geq 10^7$  cicli).

Le prove di fatica sono state altresì utilizzate per analizzare i meccanismi di cedimento, con particolare riferimento alla zona di innesco della frattura, attraverso analisi frattografiche condotte al microscopio elettronico a scansione (SEM).

I campioni, sia prima sia dopo la deposizione del rivestimento, sono stati inoltre sottoposti a misure di tensione residua facendo uso di un diffrattometro stressX3000 della Italstructures, dotato di tubo al Cu. Le misure sono state eseguite imponendo  $E = 370$  GPa e  $\nu = 0,23$  [24] ed i risultati ottenuti, che si riferiscono ad uno spessore di rivestimento interessato dalla misura dell'ordine dei  $10 \mu\text{m}$ , sono stati correlati al comportamento a fatica ottenuto attraverso le prove sperimentali.

## Risultati e discussione

In fig. 1 è riprodotta la sezione trasversale lucidata di un provino preparato con  $\text{ZrO}_2$  120 dalla quale è possibile rilevare il grado di finitura dell'interfaccia, oltre che lo spessore del riporto ( $\cong 240 \mu\text{m}$ ).

L'assenza di fenomeni di sovrainvecchiamento indotti dalla deposizione del rivestimento è confermata dai dati di microdurezza che, ad una distanza dall'interfaccia minore o uguale a 0,8 mm, sono risultati pari a  $99 \pm 3$  HV contro un valore massimo misurato nel substrato in lega 6082 di  $100 \pm 3$  HV, valore corrispondente alla condizione di fornitura T6.

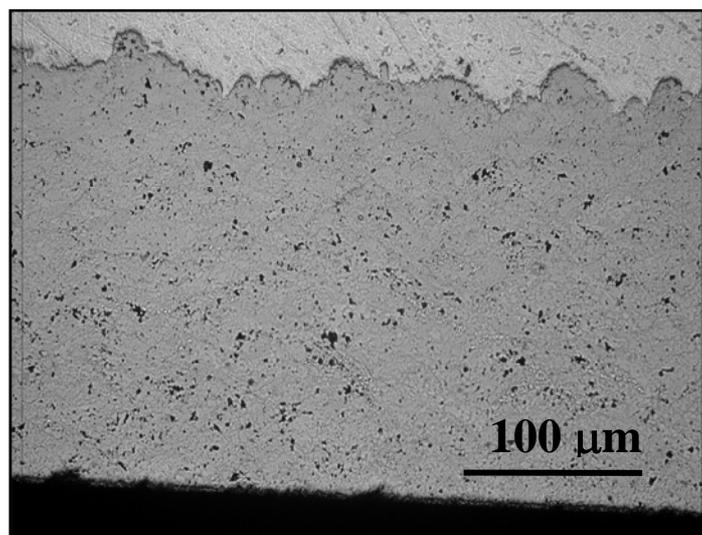


Figura1: Sezione trasversale lucidata del campione rivestito

La durezza del rivestimento presenta, invece, una variabilità tra misura e misura decisamente più elevata rispetto a quella rilevata testando il substrato a causa delle discontinuità presenti nel rivestimento (porosità, crescita per strati successivi, ecc.). Il valore ottenuto sperimentalmente è risultato essere pari a  $793 \pm 30$  HV.

Per quanto riguarda i dati di resistenza a fatica si è ottenuto un limite di fatica di  $150 \pm 10$  MPa per i campioni non rivestiti. Tale valore è risultato sensibilmente incrementato per i campioni sottoposti alla deposizione thermal spray raggiungendo rispettivamente il valore di  $280 \pm 21$  MPa per la finitura del substrato con  $ZrO_2$  120 e di  $290 \pm 23$  MPa nel caso di preparazione della superficie da rivestire con particelle di  $ZrO_2$  600. Pertanto è possibile affermare che, indipendentemente dalla preparazione dell'interfaccia, il rivestimento ha assicurato un sensibile miglioramento del comportamento a fatica della lega di alluminio considerata.

Per interpretare i dati ottenuti è innanzitutto utile analizzare i valori dello stato tensionale residuo presenti in corrispondenza della superficie dei campioni e della rugosità superficiale (Tabella III).

Come si può notare, già a monte della deposizione del rivestimento, la superficie del pezzo presenta uno stato di compressione che incrementa in modo sensibile dopo la fase di spruzzatura. Quest'ultima misura non è più influenzata dal tipo di finitura utilizzata per la preparazione dell'interfaccia, condizione questa che non deve stupire in quanto lo stato tensionale che deriva dalla termospruzzatura risente dei coefficienti di dilatazione del substrato e del materiale del rivestimento oltre che delle condizioni di spruzzatura adottate, variabili queste che sono state mantenute inalterate al variare del lotto di campioni esaminati. La presenza di un gradiente di tensioni residue all'interno dello spessore del rivestimento è invece documentata dalla variazione di stato tensionale residuo associata alla operazione di lucidatura dei rivestimenti. A valle di questa fase di preparazione delle provette di fatica, operazione che ha coinvolto l'asportazione attraverso una lucidatura di tipo meccanico di uno spessore di rivestimento decisamente esiguo rispetto a quanto depositato (5-10  $\mu m$ ), si evidenzia una non trascurabile riduzione dello stato di compressione che passa da 652 a 514 MPa (Tabella III). Proprio per limitare le variazioni di stato tensionale riconducibili all'operazione di lucidatura si ricorda che quest'ultima è stata condotta in presenza di fluido lufrorefrigerante con basse pressioni applicate anche per limitare l'insorgere di gradienti termici.

<b>Finitura superficiale</b>	<b>Rugosità, Ra [<math>\mu m</math>]</b>	<b>Tensioni residue [MPa]</b>	<b>Lotto</b>
<b>Campioni fresati</b>	1,7 $\pm$ 0,2	20 $\pm$ 7	A e B
<b>Sabbiatura <math>ZrO_2</math> 120</b>	2,8 $\pm$ 0,2	-135 $\pm$ 9	A
<b>Sabbiatura <math>ZrO_2</math> 600</b>	4,5 $\pm$ 0,3	-201 $\pm$ 11	B
<b>Rivestimento</b>	5,2 $\pm$ 0,3	-652 $\pm$ 28	A e B
<b>Rivestimento+Lucidatura</b>	0,2 $\pm$ 0,1	-514 $\pm$ 28	A e B

Tabella III: Valori di rugosità e misure dello stato tensionale residuo superficiale ottenute nelle diverse fasi di preparazione dei campioni da sottoporre a prove di fatica.

Attraverso analisi frattografiche è stato infine possibile analizzare il meccanismo di cedimento che è risultato innescare dall'interfaccia con il substrato in corrispondenza di particelle di polvere che non sono state portate a fusione durante la fase di deposizione (Fig.2).

Anche in presenza di carichi applicati superiori a quelli di snervamento del substrato non sono stati rilevate delaminazioni sensibili all'interfaccia con il substrato, ma solo piccole decoesioni quasi sempre associate alla presenza di particelle non fuse, indice indiretto di una buona adesione del rivestimento (Fig.3).

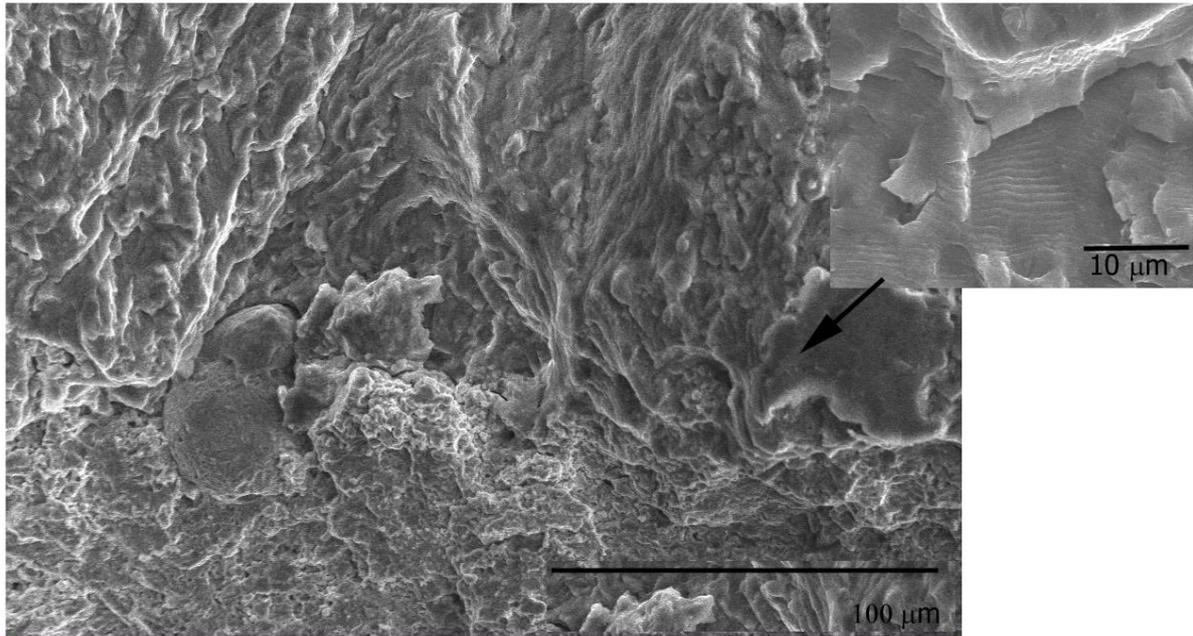


Figura 2: Particella di polvere non fusa durante la fase di deposizione in corrispondenza dell'interfaccia.

## Conclusioni

E' stata verificata la possibilità di rivestire con la tecnica HVOF una lega di alluminio da trattamento termico senza causarne, durante la deposizione, sensibili alterazioni microstrutturali, quali quelle indotte da fenomeni di sovrainvecchiamento.

La presenza di un rivestimento in  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  20NiCr dello spessore di poco superiore ai 200  $\mu\text{m}$ , dotato di durezza notevolmente superiore a quella propria della lega 6082-T6 che costituisce il materiale del substrato, sembra la soluzione ideale non solo per quelle applicazioni che richiedono un miglioramento del comportamento ad usura ma, anche, per quei componenti che devono garantire il miglior compromesso tra basso peso e buone proprietà di resistenza alle sollecitazioni cicliche. Infatti la caratterizzazione sperimentale effettuata nella presente ricerca mediante prove di fatica flessionale alternata ha evidenziato dopo  $3 \cdot 10^6$  cicli un incremento del limite di fatica almeno pari all'87% rispetto allo stesso parametro ottenuto in assenza di rivestimento. Il dato non è risultato inoltre particolarmente sensibile al grado di finitura dell'interfaccia con il substrato, almeno per quanto riguarda l'intervallo di rugosità investigato ( $R_a$  variabile da 2,7  $\mu\text{m}$  a 5  $\mu\text{m}$ ).

Indipendentemente dalle modalità di sabbiatura adottate per la preparazione del substrato, l'innescò della rottura per fatica è sempre risultato associato a particelle di polvere non fuse localizzate in prossimità dell'interfaccia substrato/rivestimento. La presenza di tali particelle è risultata essere superiore in numero rispetto a quanto rilevato in presenza della stessa metodica di deposizione ed analoga composizione di polvere depositata però su substrati in acciaio. Tale differenza è da ricondurre alle modifiche dei parametri di deposizione che si sono introdotte durante il rivestimento della lega di alluminio 6082-T6 per escluderne fenomeni di sovrainvecchiamento.

## Ringraziamenti

Si ringraziano gli ingegneri Andrea Mafezzoni e Ernesto Carretta della Metra (Bs) per aver fornito l'estruso in lega di alluminio utilizzato per le caratterizzazioni meccaniche e microstrutturali effettuate sia prima sia dopo la deposizione del rivestimento HVOF

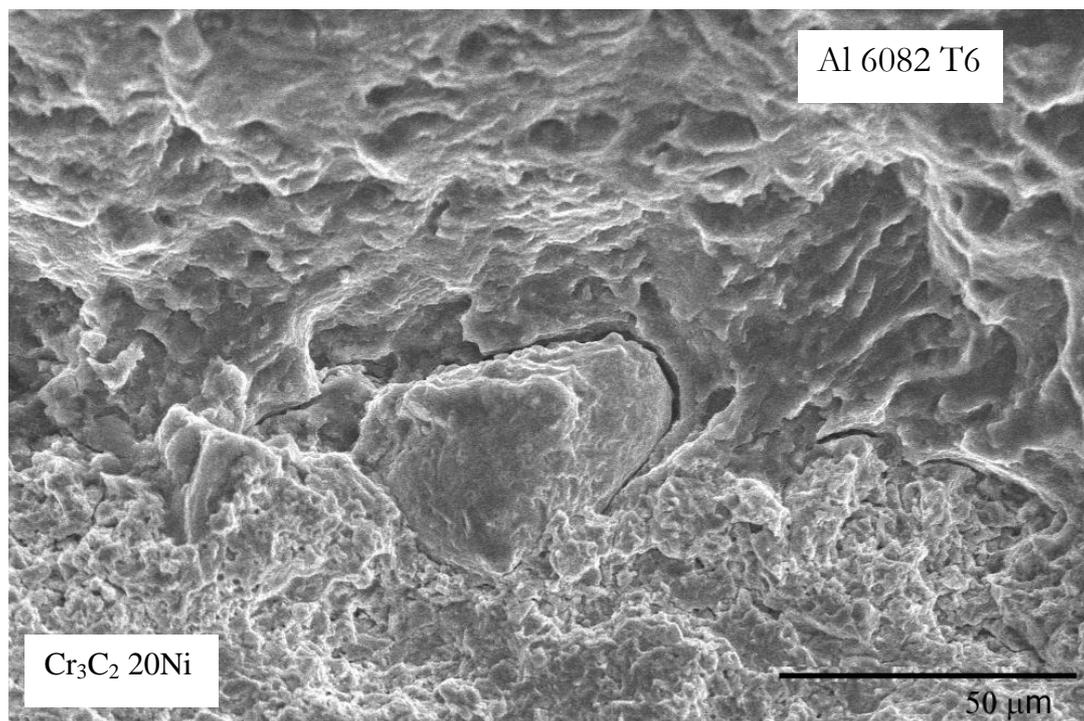


Fig. 3 – Ingrandimento dell'interfaccia rivestimento/substrato: sollecitazione applicata = 325 MPa, n=238.000

#### Bibliografia

1. S. S. Eskildesen, C. Mathiasen, M. Foss, *Surface Coat. Techn.* 116-119 (1999) 18-24.
2. T. Björk, R. Westergard, S. Hogmark, *Wear* 249 (2001) 316-323.
3. M.P.Nascimento, R.C. Souza, I. M. Miguel, W.L. Pigatin, H.J. Voorwal, *Surface Coat. Techn.* 138 (2001) 113-124.
4. J.C. Tan, L. Looney, M.S.J. Hashmi, *J. Materials Processing Techn.* 92-93 (1999) 203-208.
5. H.J.C. Voorwald, R.C. Souza, W.L. Pigatin, M.O.H. Cioffi, *Surface Coat. Techn.* 190 (2005) 155-164
6. M. Wenzelburger, M. Escribano, R. Gadow, *Surface Coat. Techn.* 180-181 (2004) 429-435
7. A. Edrisy, T. Perry, Y.T. Cheng, A.T. Alpas, *Wear* 251 (2001) 1023-1033.
8. K. Nakata, M. Ushio, *Surface Coat. Techn.* 169-170 (2003) 443-446.
9. S.H. Awad, H.C. Qian, *Wear* 260 (2006) 215-222
10. W.T. Tomlinson, A.S. Bransden, *Wear* 185 (1995) 59-65.
11. R. Gadow, D. Scherer, *Surface Coat. Techn.* 151-152 (2002) 471-477
12. C. A. Grubbs, *Metal Finishing* 97 (1999) 480-496
13. H. Konno, K. Utaka, R. Furuichi, *Corrosion Science* 38 (1996) 2247-2256.
14. A.K. Mukhopadhyay, A.K. Sharma, *Surface Coatings Techn.* 92 (1997) 212-220.
15. M. Heydarzadeh Sohi, *J. Mater. Processing Techn.* 118 (2001) 187-192.
16. J.A. Picas, A. Forn, R. Rilla, E. Martin, *Surface Coatings Techn.* 200 (2005) 1178-1181.
17. C.-J. Li, Y.-Y. Wang, T.Wu, G.-C. Ji, A. Ohmori, *Surface Coatings Techn.* 145 (2001) 113-120
18. A. Kulkarni, J. Gutleber, S. Sampath, A. Goland, W.B. Lindquist, H. Herman, A.J. Allen, B. Dowd, *Mater. Scie. Engin.* A369 (2004) 124-137
19. D. S. Arensburger, S. M. Zimakov, P. A. Kulu, and M. A. Oyaviir, *Powder Metallurgy & Metal Ceramics*, 40 (2001) 127-134
20. K. B. Kowalsky, D.R. Maranz, K.F. Smith, Proc. 3th National Thermal spray Conf., Long Beach 1990, USA 587-546.
21. C. Godoy, E.A. Souza, M.M. Lima, J.C.A. Batista, *Thin Solid Films*, 420-421 (2002)438-445

22. J. Stokes, L. Looney, Surface Coatings Techn., 177-178 (2004) 18-23.
23. R.T. Mc Grann, D.J. Greving, J.R. Shadley, E.F. Rybicki, T.L. Kruecke, B.E. Bodger, Surface Coatings Techn. 108-109 (1998) 59-64.
24. J.M. Guilemany, J.M. Miguel, S. Vizcaino, Atti VIII Congr. National Propiedades Mecanicas de Solidos, Gandia (2002) 443-450.