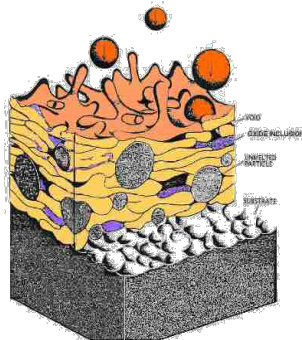


Rivestimenti ad alto spessore da fase solida



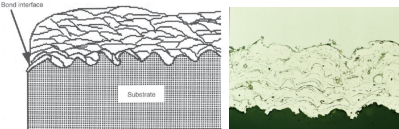
- **Termospruzzatura**
- **Riporti saldati**

02/05/16

1

Rivestimenti ad alto spessore

- **Rivestimenti termospruzzati**
Adesione solo meccanica al substrato (occorre $R_a > 4 \mu\text{m}$ per favorire ancoraggio), no modificazioni termiche del substrato.



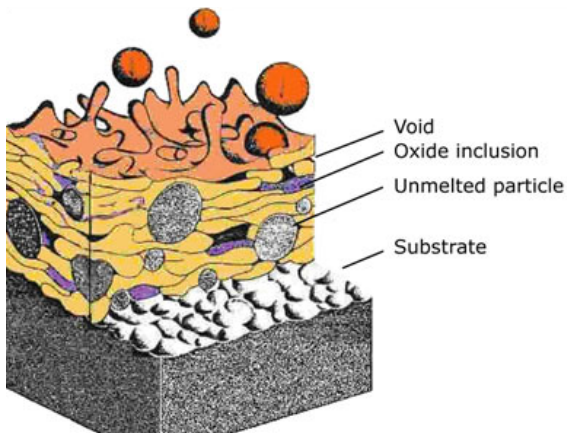
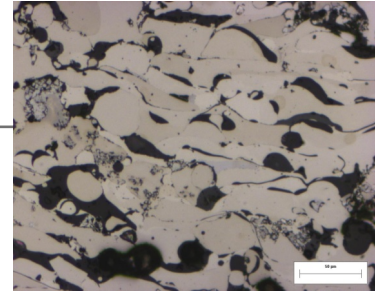
- **Rivestimenti saldati**
Alta adesione per effetto dell'elevata temperatura di deposizione (diffusione, fusione), possibili modificazioni termiche del substrato.



02/05/16

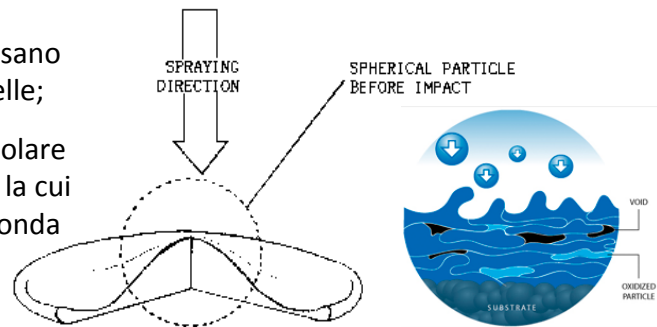
2

Rivestimenti termospruzzati



Gruppo di processi nei quali un materiale viene riscaldato vicino o poco oltre il suo punto di fusione e proiettato in forma di gocce parzialmente o completamente fuse contro la superficie del pezzo da rivestire.

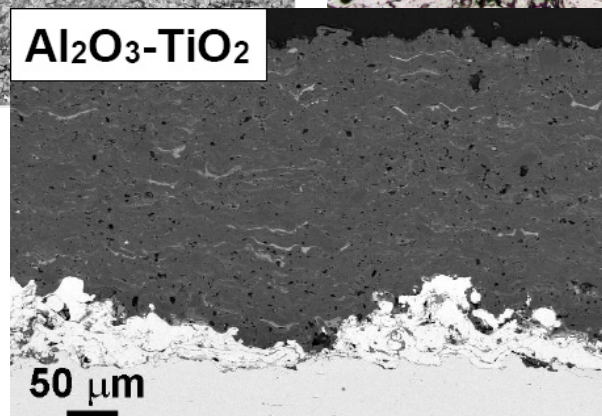
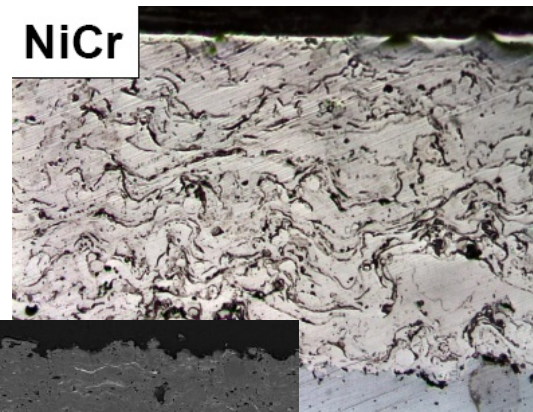
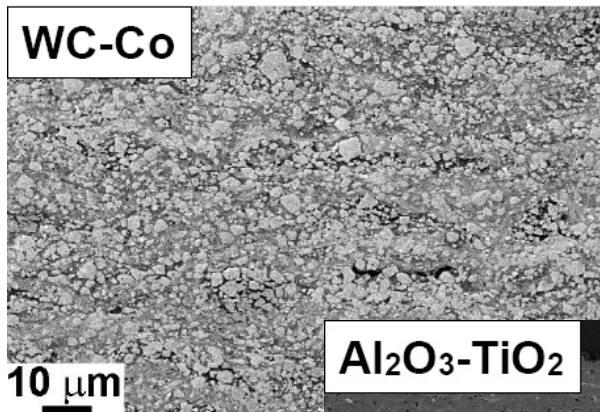
- a seguito dell'impatto, le gocce collassano ("splats") e solidificano in forma di lamelle;
- dalla sovrapposizione più o meno regolare di queste lamelle nasce un rivestimento la cui struttura presenta diversa densità a seconda delle modalità di deposizione.



02/05/16

3

Rivestimenti termospruzzati



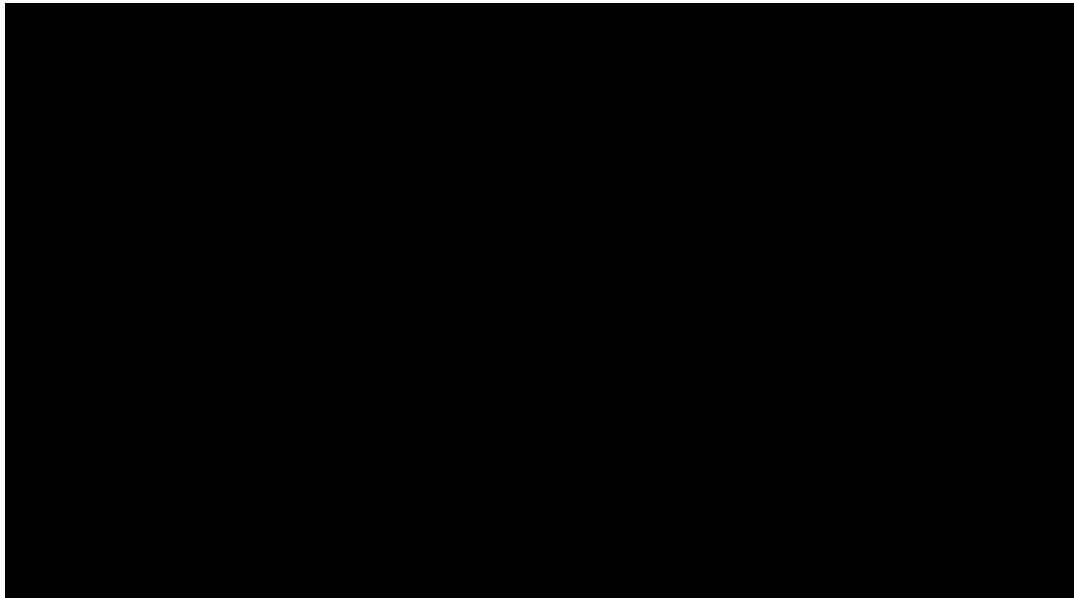
G.Bolelli et al., Università di Modena e Reggio Emilia

02/05/16

4

Rivestimenti termospruzzati

Spruzzatura termica HVOF (paletta turbina)

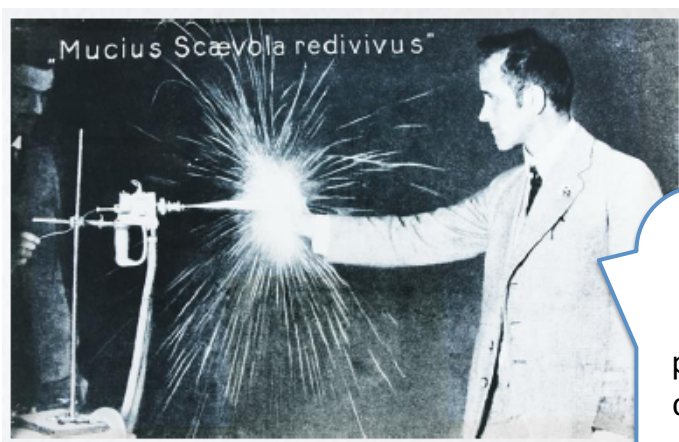


<http://www.youtube.com/watch?v=ZTTxi3a2OGI>

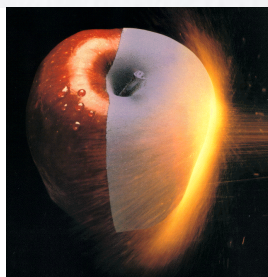
02/05/16

5

Termospruzzatura: effetti sul substrato?



L'Ing. Ulrich Schoop (CH),
che depositò il primo
brevetto per questo
processo nel 1909, dimostra
che **il substrato non subisce
modificazioni termiche
significative** durante la
termospruzzatura.



Nessun danno termico alla mela
termospruzzata ad arco...

02/05/16

6

Rivestimenti termospruzzati: tecnologie

Esistono tre categorie principali di dispositivi di spruzzatura, che si differenziano per il modo in cui le particelle da spruzzare vengono fuse e proiettate verso il substrato:

- **Dispositivi che sfruttano il calore di combustione**
- **Dispositivi ad arco elettrico**
- **Dispositivi che utilizzano l'energia di una scarica elettrica per generare un plasma**

→ **Tecnologie principali:**

1. **spruzzatura a fiamma (*Flame Spraying*)**
2. **spruzzatura ad arco**
3. **spruzzatura HVOF (*High-Velocity Oxy-Fuel*)**
4. **spruzzatura a detonazione (*D-Gun*)**
5. **spruzzatura a plasma (*Plasma Spraying*)**

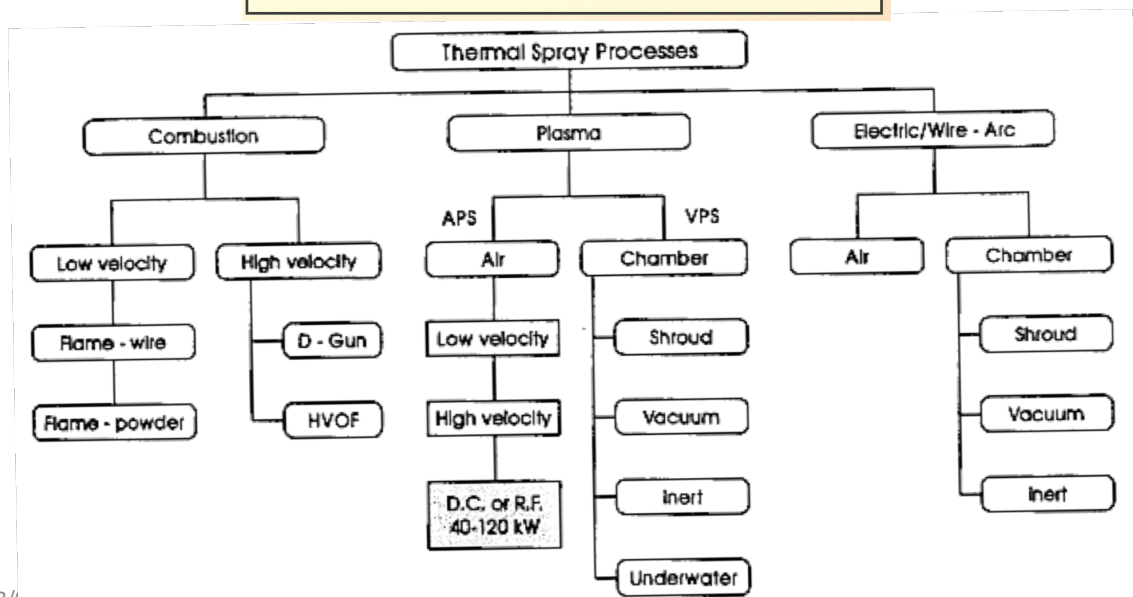
6. cold spray (aggregazione per deformazione plastica di particelle proiettate ad altissima velocità (300-1200 m/s), senza fusione)

02/05/16

7

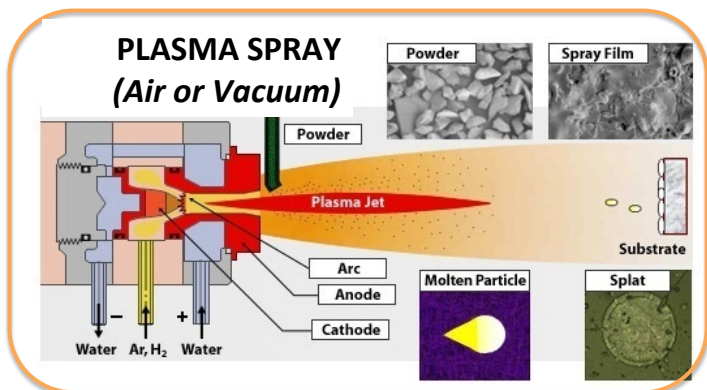
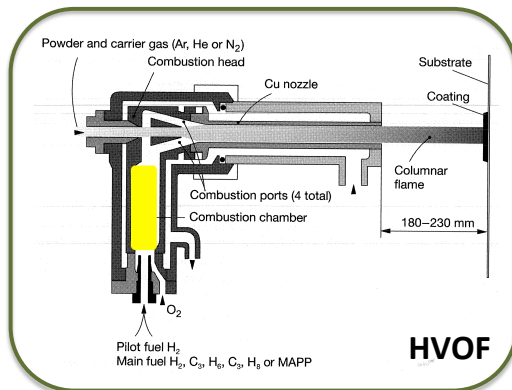
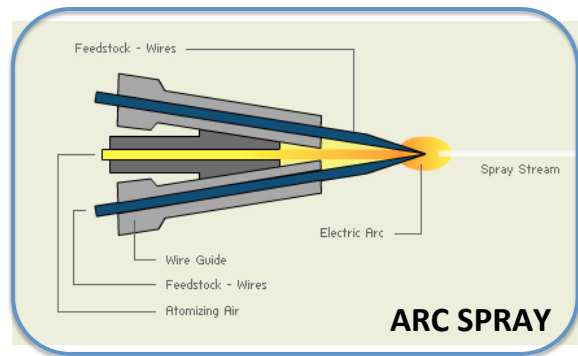
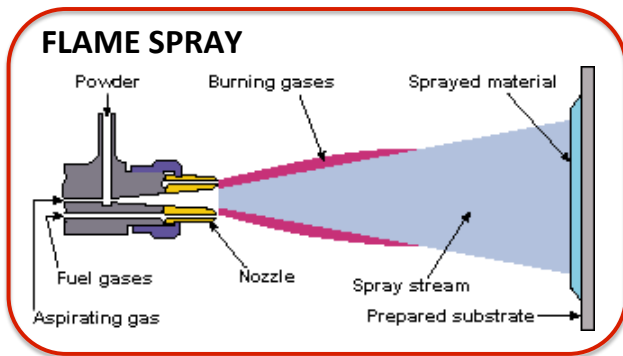
Rivestimenti termospruzzati: tecnologie

La tecnologia di base → Flame Spray
Maggiore temperatura → Plasma Spray
Maggiore velocità → HVOF, Cold Spray
Altri concetti → Arc Spray, PTA



02/0

Rivestimenti termospruzzati: tecnologie



02/05/16

9

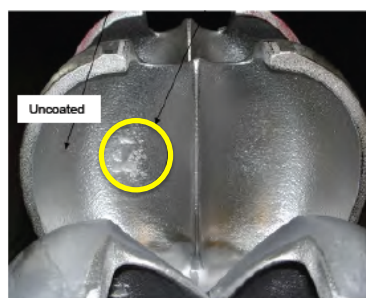
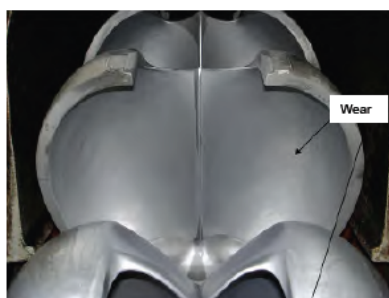
High Velocity Oxy-Fuel (HVOF)



Deposizione *in situ* per pezzi di grandi dimensioni

Rivestimento H654 dopo 3000 ore

Non rivestita dopo 3000 ore

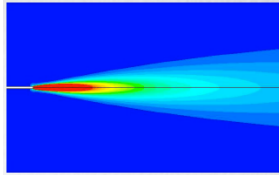


02/05/16

C.Martini - TRSM/7 Riv.Fase Solida

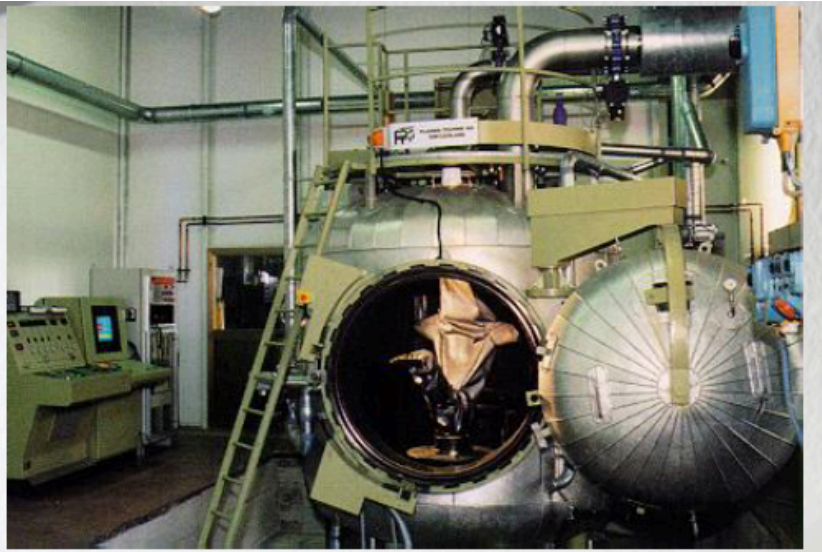
10

Plasma Spraying



Profilo di temperatura in uscita dal dispositivo di spruzzatura (la parte rossa è la più calda).

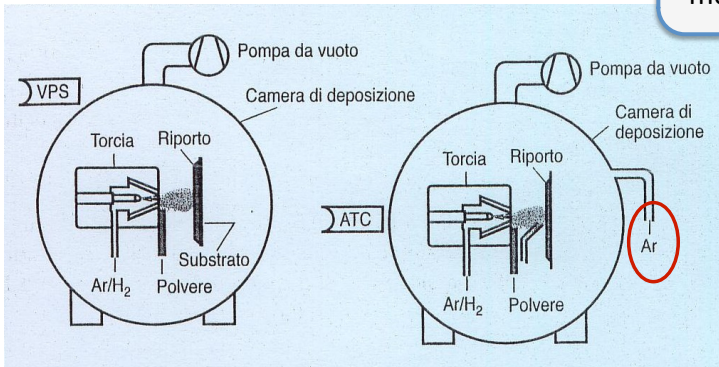
- APS (Atmospheric Plasma Spray)
- VPS (Vacuum Plasma Spray)
- IPS (Inert gas Plasma Spray)



Dispositivo di spruzzatura a plasma in ambiente confinato (camera chiusa)

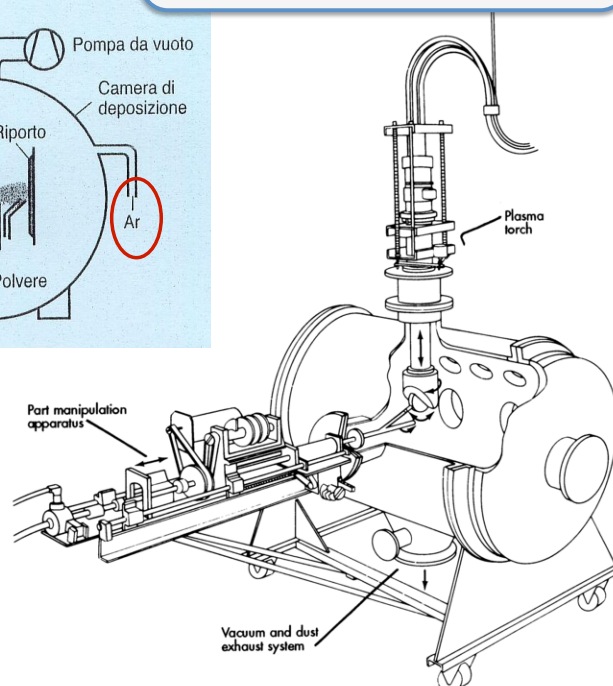
5. Plasma Spraying

NB: in ambiente confinato, la **torcia resta ferma** e viene movimentato il pezzo da rivestire

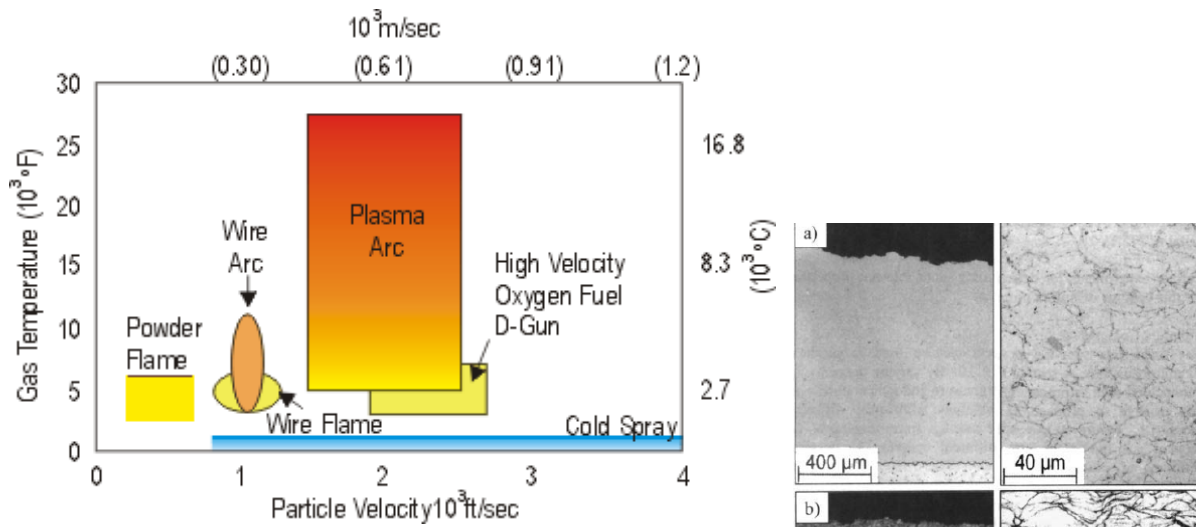


VPS=Vacuum Plasma Spray

ATC=Atmosphere/Temperature Controlled



Tecnologie di termospruzzatura a confronto



Rivestimento *Cold Spray*
Cu su substrato Al
 (in alto: non attaccato; in basso: dopo
attacco metallografico per evidenziare la
 microstruttura)

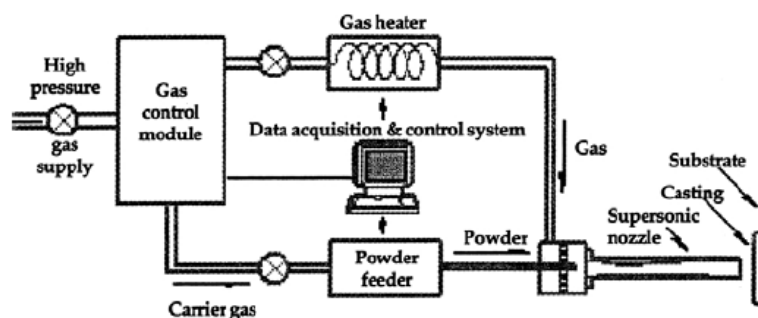
02/05/16

13

Cold Spray (spruzzatura a freddo)

- Particelle di **materiali deformabili** (es. **metalli** o **polimeri**; ceramici fragili sono depositabili solo con legante duttile) vengono accelerate ad alte velocità (**300-1200 m/s**) mediante proiezione attraverso un ugello, usando **flussi convergenti/divergenti di gas ad alta velocità**.
- L'alta velocità di proiezione permette la compattazione delle polveri per **deformazione plastica** (la T di pre-riscaldamento del gas vettore va da 0 a 700°C ed è in genere **inferiore alla T di fusione del materiale depositato**)

- **Velocità (V):**
 $V \ll V_{critica}$ = rimbalzo
 $V < V_{critica}$ = erosione
 $V > V_{critica}$ = deposizione



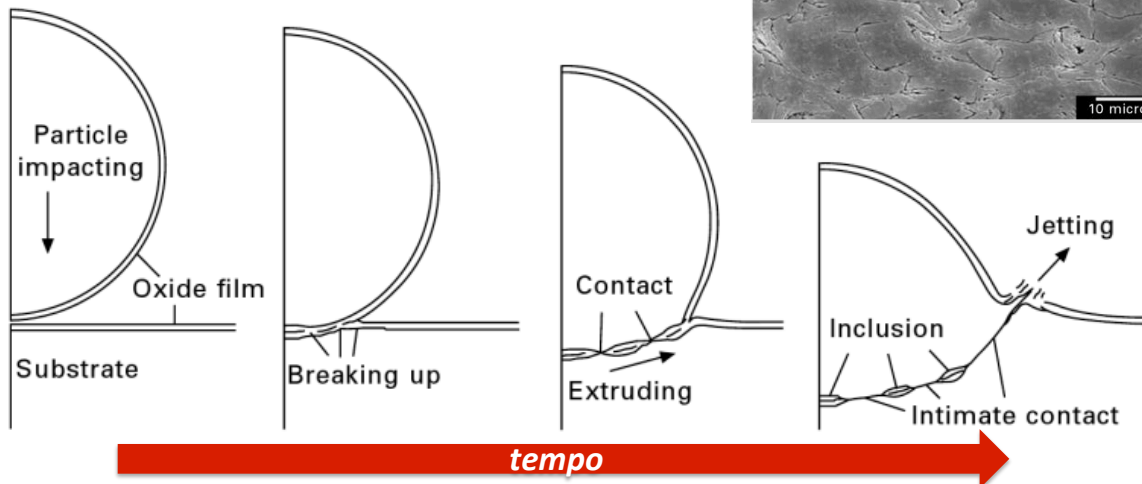
02/05/16

C.Martini – TRSM/7 Riv.Fase Solida

14

Cold Spray (spruzzatura a freddo)

L'impatto ad alta velocità delle particelle proiettate contro il substrato durante la spruzzatura a freddo **distrukge il sottile strato ossidato** che circonda i singoli granuli di polvere metallica, favorendo un intimo contatto metallo-metallo e la conseguente **compattazione per deformazione plastica**.

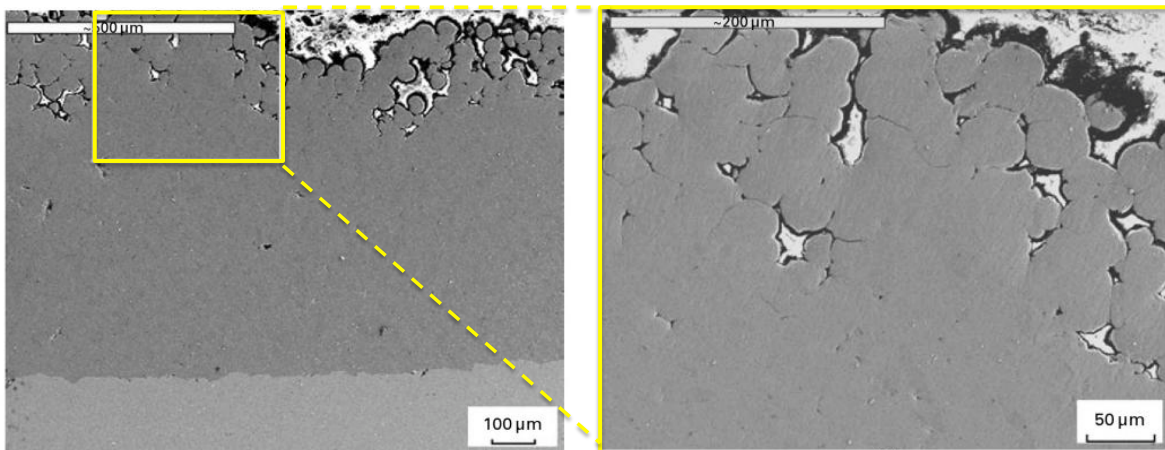


02/05/16

C.Martini – TRSM/7 Riv.Fase Solida

15

Cold Spray (spruzzatura a freddo): microstruttura



Microstruttura di un rivestimento in Ti depositato a partire da polveri rotondeggianti, spruzzate in N_2 .

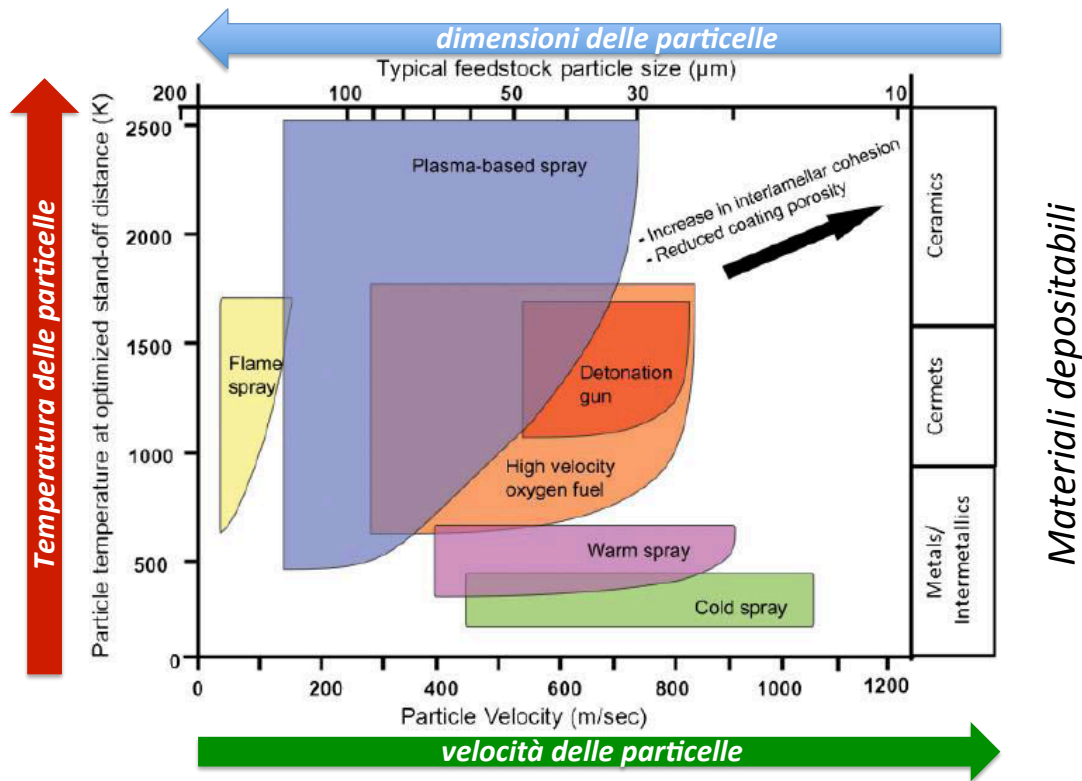
- Maggiore è la **duttilità** del materiale spruzzato, maggiore è la probabilità di ottenere un **rivestimento compatto a bassa porosità residua** (graduale densificazione degli strati più interni, mentre i più esterni restano più porosi).
- **Particelle fini** sono più veloci e formano più facilmente uno strato denso (*in questo caso l'ossidazione non è un problema*).

02/05/16

C.Martini – TRSM/7 Riv.Fase Solida

16

Spruzzatura termica: tecniche a confronto



02/05/16

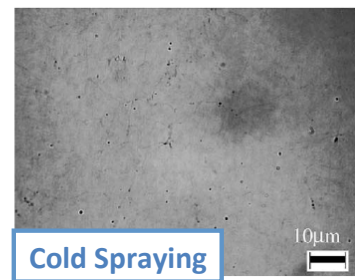
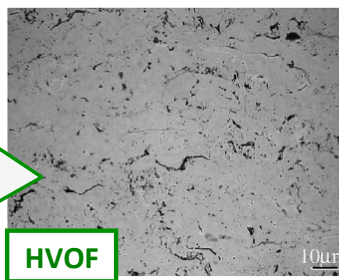
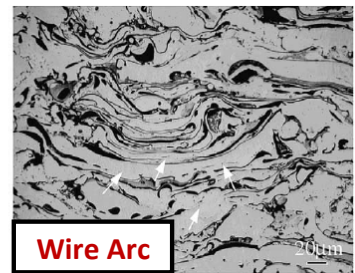
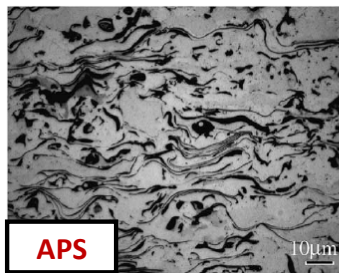
C.Martini – TRSM/7 Riv.Fase Solida

17

Influenza tecnica di deposizione su struttura rivestimento (Ni-5%Al)

APS: Air Plasma spray
 VPS: Vacuum Plasma Spray
 TWA: Twin Wire arc
 HVOF: High Velocity OxyFuel

Cold spraying e HVOF producono la microstruttura più densa, grazie all'**alta velocità** di proiezione delle polveri



S. Sampath et al. / Materials Science and Engineering A364 (2004) 216–231

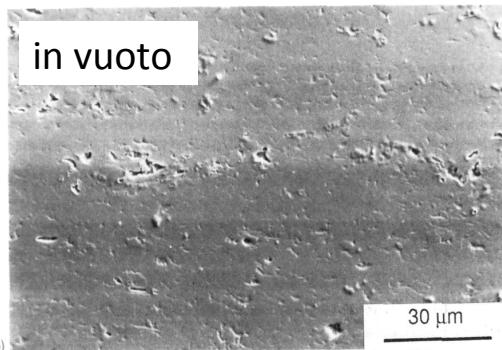
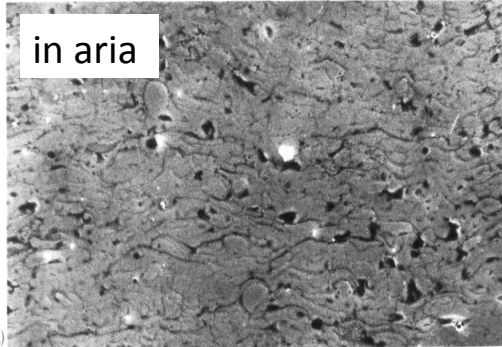
02/05/16

C.Martini – TRSM/7 Riv.Fase Solida

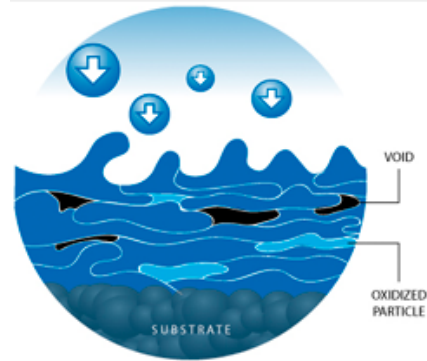
18

Rivestimenti Termospruzzati: microstruttura

Air Plasma Spray (APS)



02/05/16



Rivestimenti a **porosità minima** (più resistenti a corrosione) si ottengono quando:

- Si impiegano tecniche di spruzzatura ad **alta velocità** (es. HVOF)
- Si lavora in **ambienti controllati** (es. per limitare fenomeni di ossidazione)
- Si eseguono **post-trattamenti** (es. sigillatura o rifusione)

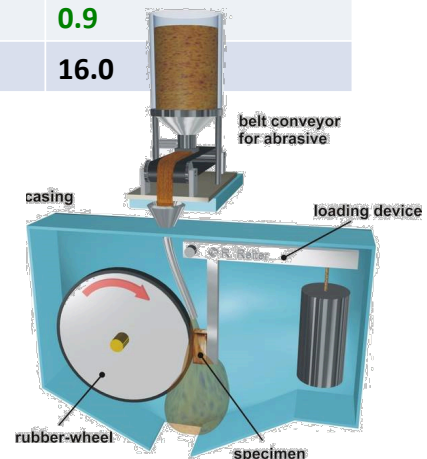
19

Spruzzatura termica: tecniche a confronto

Materiale	Tecnologia di produzione	Tasso di usura, mm ³ /1000 giri
WC-Co Carballoy 883	Sinterizzato (massivo)	1.2
WC-Co riporto	Super D-Gun	0.7
WC-Co riporto	Detonation Gun	0.8
WC-Co riporto	High-Velocity OxyFuel	0.9
WC-Co riporto	Plasma Spray	16.0

- ASTM G 65 dry sand/rubber wheel test
(**Usura abrasiva a 2 corpi**)
50/70 mesh SiO₂, 200 rpm, 30 lb load,
3000-revolution test duration

Il **tasso di usura** cresce al diminuire della **densità** (compattezza) dello strato, determinata dalla **velocità** di proiezione delle particelle



02/05/16

C.Martini – TRSM/7 Riv.Fase Solida

20

Tecnologie di termospruzzatura a confronto

Processo	Temperatura gas (°C)	Velocità particelle (m/s)	Adesione (MPa)	Contenuto di ossidi (%)	Porosità (%)	Velocità di deposizione (kg/h)	Spessori tipici (mm)	Costo relativo
Fiamma	3000	40	8	10-15	10-15	6	0,1-1,5	1
Arco elettrico	3000-5000	100	12	10-20	10	12	0,1-50	2
HVOF	3000	800	>70	1-5	1-2	2-4	1,1-2	3
Detonation gun	4000	800	>70	1-5	1-2	0,3	0,05-0,3	-
APS	12000	200-400	20-70	1-3	1-8	2-5	0,1-1	4
VPS	12000	400-600	>70	ppm	<0,5	2-5	0,1-1	5

- vantaggi
- limitazioni

02/05/16

21

Rivestimenti termospruzzati

Vantaggi



- Processo **versatile**
- **Ampia gamma di materiali depositabili**
- Elevata produttività, soprattutto per geometrie semplici
- **Temperatura del substrato limitata (< 200 °C)**

→ Largamente impiegata x produrre strati relativamente spessi (~100÷300 µm), da impiegare anche per incrementare la capacità di supporto del carico per substrati deformabili (es. Al, Ti, Acciaio inox) prima di applicare film sottili e duri (PVD, PACVD)

Limiti



- Processo "a linea di vista" (**direzionalità** della deposizione, in parte aggirabile con movimentazione motorizzata della torcia)
- Necessità di lucidatura/rettifica del riporto ad alta rugosità (**post-trattamento**)
- Possibile **porosità/difettività** dello strato (variabile con modalità di deposizione)

02/05/16

C.Martini – 10. Attrito/Usura: trattamenti/rivestimenti

22

Rivestimenti termospruzzati: materiali

Il materiale spruzzato deve:

- avere un punto di fusione abbastanza lontano (almeno 200°C) dalla T di eventuale decomposizione, oppure
- poter essere inglobato in una matrice fusibile.

I materiali di rivestimento per spruzzatura termica vengono generalmente classificati in gruppi omogenei, contrassegnati da un codice e con dati riguardanti:

- composizione chimica
- forme disponibili
- possibili tecniche di spruzzatura

02/05/16

23

Spruzzatura termica: materiali depositabili

Material types	Typical spray materials
Metals and alloys	aluminum, aluminum-zinc, copper, molybdenum, nickel-aluminum, nickel-chromium alloys (Ni-Cr, NiCrAl, NiCrAlY), NiCrBSi, carbon steel, stainless steel, zinc
Ceramics	Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , Cr ₂ O ₃ , mullite, spinel, ZrO ₂ , YSZ (Y ₂ O ₃ -ZrO ₂), hydroxyapatite (HA, Ca ₁₀ (OH) ₄ (PO ₄) ₆)
Cermets	WC-Co, Cr ₃ C ₂ -NiCr
Composites and blends	Al/Si/polyester, Ni/graphite, bentonite/NiCrAl
Intermetallics	NiAl, Ni ₃ Al, NiAl ₃
Polymers	Polyester, polyamides, polyethylene

Il materiale da depositare per termospruzzatura deve:

- avere un punto di fusione abbastanza lontano (almeno 200°C) dalla T di eventuale **decomposizione**, oppure
- poter essere **inglobato in una matrice fusibile**.

02/05/16

C.Martini – TRSM/7 Riv.Fase Solida

24

Termospruzzati anticorrosione

	Materiale depositato	Commenti
Corrosione ad umido	Al, Zn, Ti, Ta, Nb (spruzzati a fiamma, ad arco, a plasma (in vuoto) o HVOF)	Per proteggere l'acciaio dalla corrosione atmosferica o dal contatto con soluzioni aggressive; eventuale post-trattamento di rifusione o impregnazione (resine epossidiche).
Corrosione a secco (ad alta temperatura)	Multistrati con interstrato MCrAlY (M=Ni, Co, Fe) e strato esterno a base di YSZ (Zirconia stabilizzata con Yttria, $ZrO_2+Y_2O_3$)	Rivestimenti "barriera termica" da depositare con tecniche ad alta velocità (HVOF, D-Gun) o alta temperatura (VPS). Eventuale rifusione . Per palette di turbine.

I rivestimenti termospruzzati a base di **materiali ceramici** (es. allumina), a bassa duttilità, mantengono sempre un grado di **porosità residua** dopo spruzzatura tale da non poter essere usati efficacemente come strati protettivi se non si opera un **post-trattamento di densificazione** (sigillatura o **impregnazione** con materiali polimerici).

Termospruzzati per applicazioni tribologiche/1

	Materiale depositato (Tecnologia di spruzzatura)	Processi di usura	Esempi di applicazione
Ceramici	Ossido di Cromo (a fiamma, al plasma)	Usura per strisciamento, abrasiva ed erosiva	Pistoni per pompe, rulli per la stampa flessografica
	Allumina (al plasma) Allumina/titania (a fiamma, al plasma)	Usura per strisciamento, abrasiva ed erosiva, per cavitazione	Stampi per estrusione a caldo, punzoni per presse, slitte, pompe e giranti, palette di turbine, cilindri di raffreddamento di laminatoi a caldo (anche rivestimenti di zirconia)

Termospruzzati per applicazioni tribologiche/2

	Materiale depositato (Tecnologia di spruzzatura)	Processi di usura	Esempi di applicazione
Metalli	Bronzo (a fiamma)	Usura per strisciamento	Cuscinetti (anche resist. a corrosione)
	Molibdeno (a fiamma, ad arco, al plasma)	Usura per strisciamento e resistenza allo <i>scuffing</i> , <i>fretting</i>	Fasce elastiche, camme, bilancieri
	Leghe di Fe ad alto C: acciai per utensili o martensitici e ghise (a fiamma, ad arco)	Usura per strisciamento	-
	Leghe Co-Mo-Cr-Si (al plasma, HVOF)	Usura per strisciamento, <i>fretting</i>	Stampi per ceramica, battute di valvole
	Leghe Ni-Cr-Mo con SiC e/o WC (al plasma, HVOF)	Usura abrasiva e per cavitazione	Anelli di tenuta, componenti per l'industria petrolifera

Scuffing: usura adesiva severa// *Fretting*: usura per sfregamento con moti di piccola ampiezza

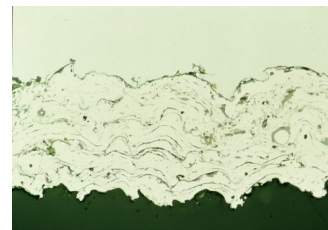
27

Termospruzzati per applicazioni tribologiche/3

	Materiale depositato (Tecnologia di spruzzatura)	Processi di usura	Esempi di applicazione
Metalli duri	WC-Co (al plasma, HVOF, D-Gun)	Usura per strisciamento, abrasiva ed erosiva	Cuscinetti a strisciamento, valvole, palette di turbine, collettori, componenti per l'industria tessile, cilindri essiccatori in cartiere, cilindri di laminazione a freddo
	Cr₃C₂-NiCr (al plasma, HVOF)	Usura per <i>fretting</i> ad alta temperatura	Anelli di tenuta, valvole

Spruzzatura termica: preparazione substrato

E' essenziale che la superficie da rivestire sia perfettamente ripulita non solo da patine di ossido ma anche da tracce di olio, fluidi di lavorazione, lubrificanti, inibitori di corrosione, etc.

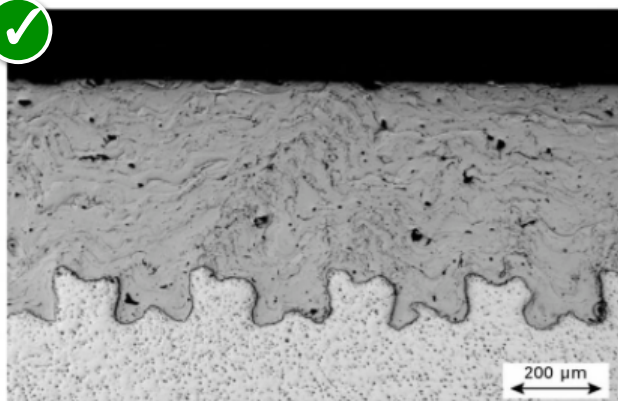


Dopo aver rimosso l'eventuale scaglia di ossido, il pezzo deve essere sgrassato ed immediatamente sottoposto a **granigliatura** o **sabbiatura** per facilitare il successivo **ancoraggio meccanico** del deposito. Questo trattamento non deve essere troppo energetico, onde evitare che frammenti di graniglia si fissino alla superficie e che le asperità della medesima vengano troppo smussate; la **rugosità media finale R_a deve essere almeno di 4 μm** .

La graniglia più utilizzata è il corindone ma, per alcune applicazioni, può essere preferita la graniglia d'acciaio o di SiC. Su materiali particolarmente duri, la granigliatura può non bastare a produrre un sufficiente grado di rugosità; in questo caso la superficie deve essere **corrugata per lavorazione meccanica**.

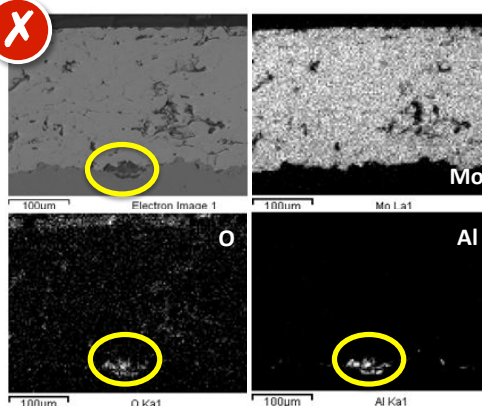
E' quasi sempre meglio **mascherare** le parti che non devono essere rivestite piuttosto che asportare il rivestimento dopo deposizione. Esistono molti tipi di nastro, di pittura o di lacca adatti allo scopo; nei processi di spruzzatura ad alta velocità occorrono, per esempio, nastri rinforzati con fibre di vetro o nastri metallici. Per ridurre i costi può essere conveniente adottare materiali di mascheramento riutilizzabili.

Termospruzzatura: pre-trattamenti



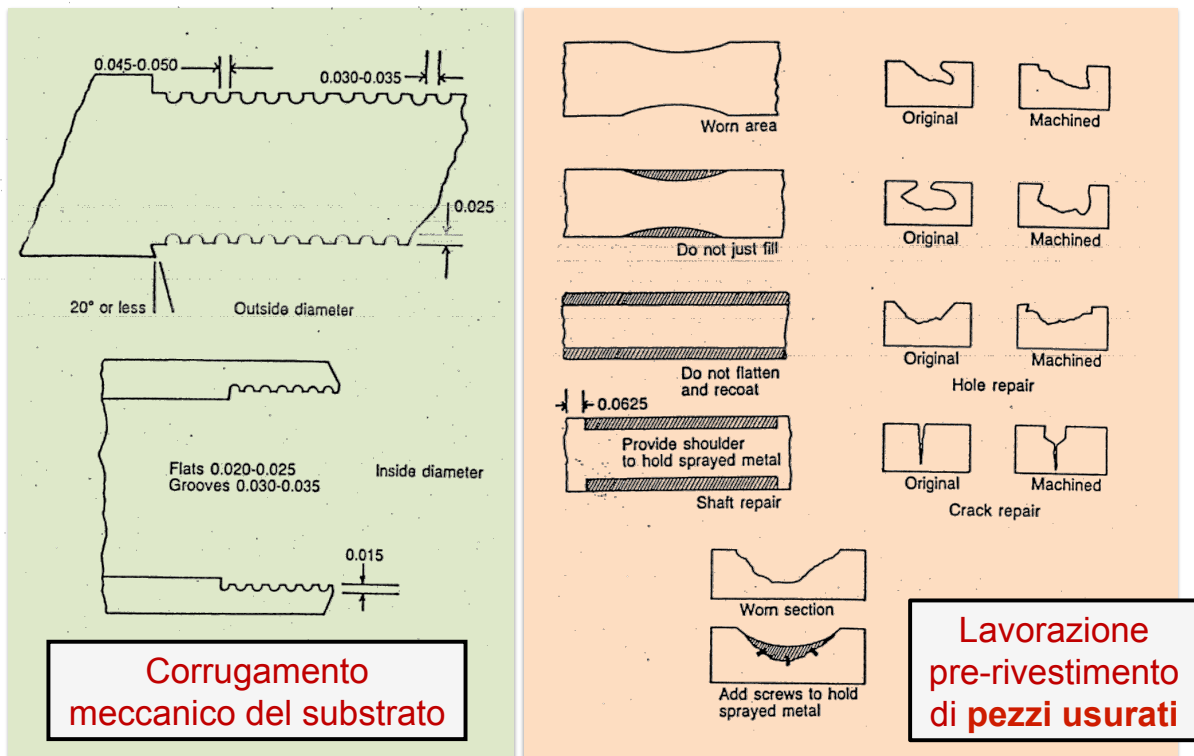
7.24 Microstructure of PTAW coating showing the well interlocked interface through mechanical cutting surface preparation (after Schlaefer *et al.*, 2008).

Esempio di **buon ancoraggio meccanico** del rivestimento termospruzzato su un substrato con rugosità modificata *ad-hoc* (corrugamento meccanico)



Presenza di **particella Al_2O_3** (residuo da sabbiatura con corindone) all'interfaccia fra rivestimento termospruzzato di Mo e substrato in acciaio

Termospruzzatura: pre-trattamenti



Spruzzatura termica: finitura e riparazione

In alcune applicazioni un pezzo rivestito per spruzzatura termica può essere utilizzato come tale ma è più frequente il caso in cui esso debba essere sottoposto a qualche operazione di **finitura**:

- **spazzolatura** (per eliminare le creste e creare una morfologia micronodulare)
- **rettifica**
- **lappatura a specchio** fino a una R_a finale di $0.05 \mu\text{m}$

I rivestimenti metallici possono essere **rettificati** con utensili di acciaio rapido, mentre quelli ceramici e compositi devono essere rettificati con mole abrasive, eventualmente al *borazon* (nitrato di boro cubico, c-BN) o diamantate.

Non è consigliabile **riparare un rivestimento danneggiato** spruzzando nuovo materiale sulle parti mancanti anche se il pezzo è stato ripulito con la massima cura; (l'adesione tra il nuovo strato e quello preesistente difficilmente è adeguata)

→ preferibile asportare completamente il vecchio riporto e spruzzarne uno nuovo.

→ anche nella deposizione di più strati in successione, ciascuno di essi va spruzzato sul precedente così come depositato, senza alcun tipo di trattamento intermedio.

- **Per applicazioni anticorrosione può essere necessario sigillare/impregnare i pori o ri-fondere il rivestimento!**

Termospruzzatura: post-trattamenti/1

1. SIGILLATURA per impregnazione:

- A **pressione atmosferica**
- A **bassa pressione** (aiuta l'evaporazione dei gas e dell'umidità residua nei pori)
- Ad **alta pressione** (facilita l'ingresso del sigillante nei pori)
- Combinazioni dei tre metodi precedenti

impiegando **materiali sigillanti**:

- organici
- inorganici
- metallici

Pori (in nero) parzialmente riempiti da **sigillante** (in grigio scuro)

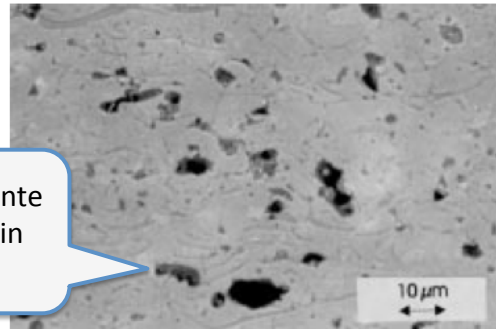


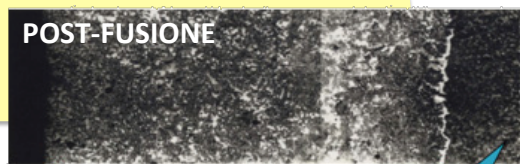
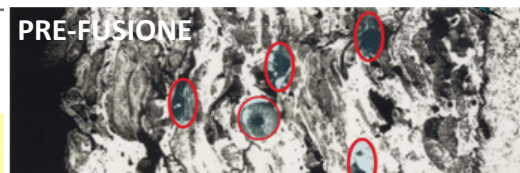
Fig. 6 Larger magnification from Fig. 5 showing smaller completely filled pores and larger partially filled pores. 680x

33

Termospruzzatura: post-trattamenti/2

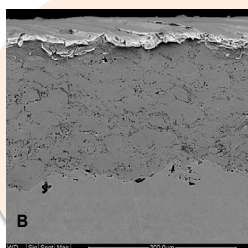
2. RIFUSIONE mediante:

- Riscaldamento convenzionale (es. **strati autofusibili NiCrBSi**; NB: attenzione al substrato)

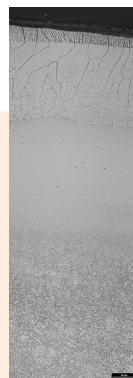


Extinction of open pores after fusing

Substrate(base material)part



← PRE-FUSIONE

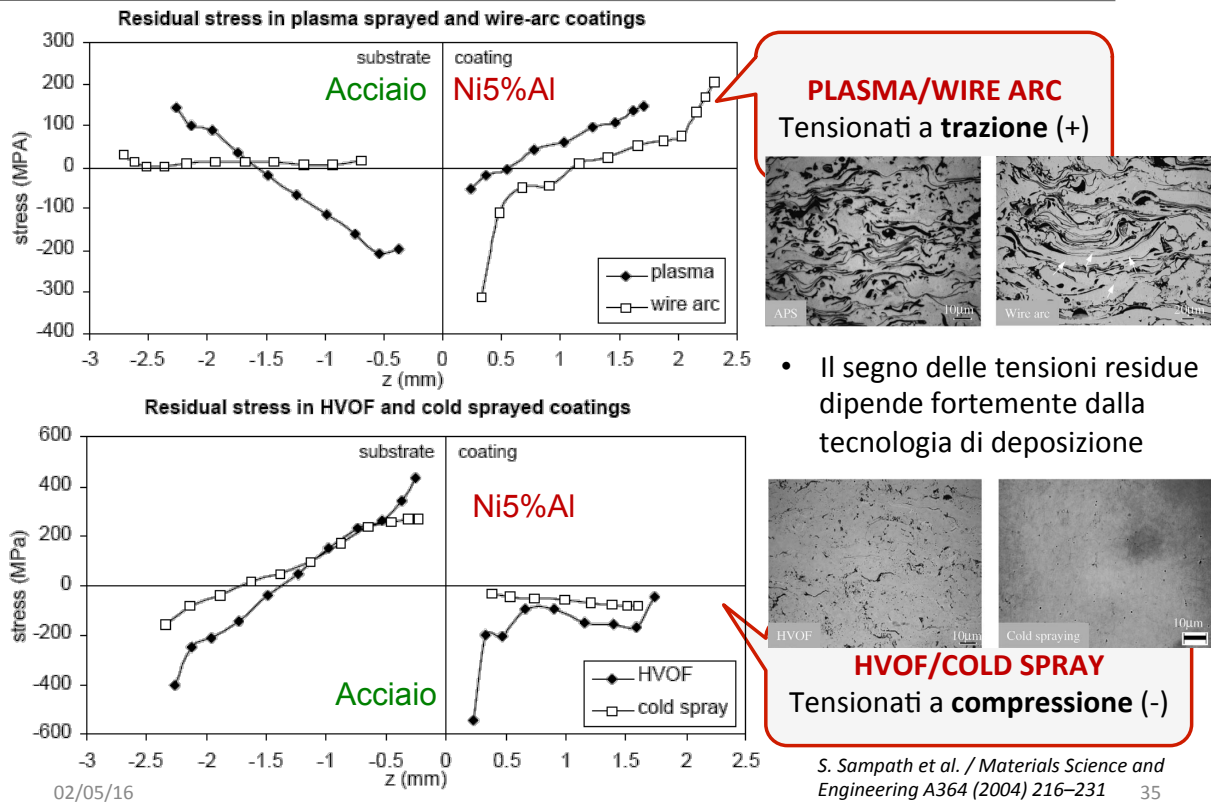


← POST-FUSIONE (laser)

- Impiego di **laser** (riscaldamento localizzato in superficie, senza coinvolgere il substrato)

34

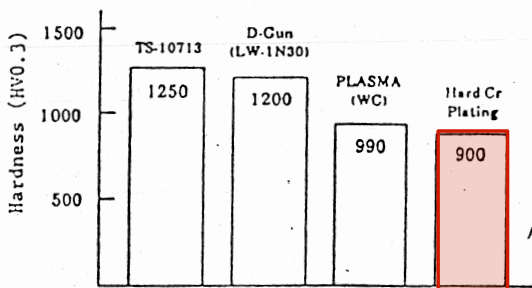
Rivestimenti termospruzzati: tensioni residue



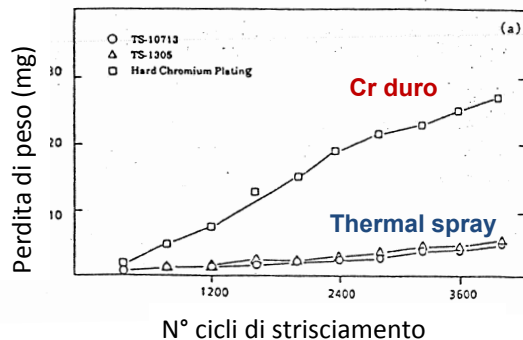
Rivestimenti termospruzzati: applicazioni tribologiche

I rivestimenti di WC-Co e di Cr₇C₃-NiCr sono considerati un'ottima **alternativa al Cr a spessore**, soprattutto nelle applicazioni in cui il fattore costo è marginale.

→ *Prove di abrasione* (strisciamento su carta abrasiva 320 grit sotto un carico di 3.25 kg (test JIS H8615).

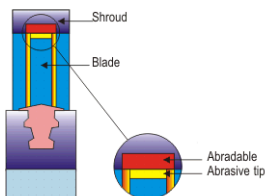


→ rivestimenti di WC-Co termospruzzati: durezza e resistenza all'abrasione > Cr duro

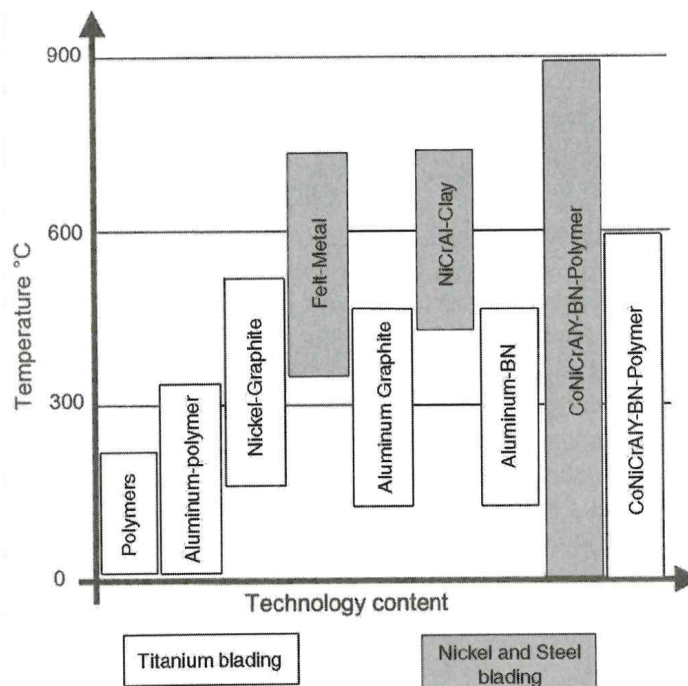


Rivestimenti termospruzzati: applicazioni

- Barriere termiche
- Antiusura
- Anticorrosione (dopo **sigillatura o rifusione**)
- Ripristino parti usurate
- Creazione strato conduttivo
- **Strati abrasibili** per tenute in compressori di motori a turbina



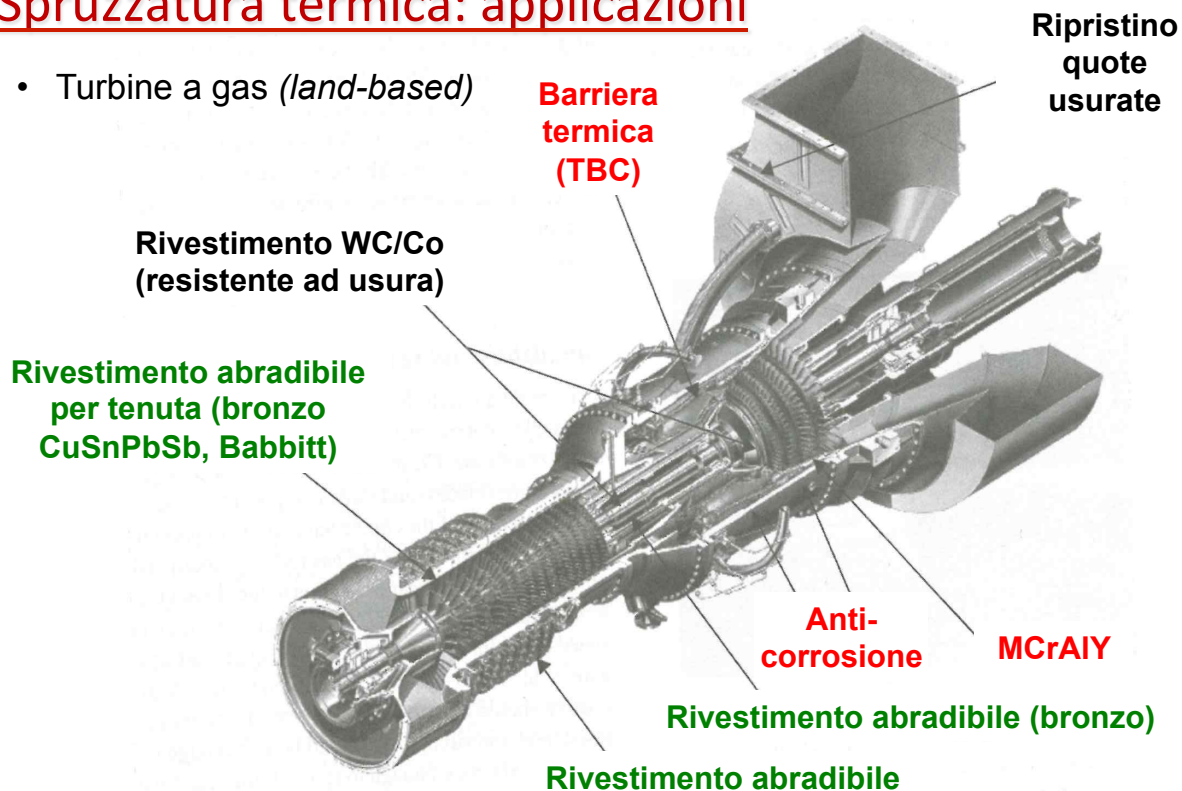
02/05/16



37

Spruzzatura termica: applicazioni

- Turbine a gas (*land-based*)

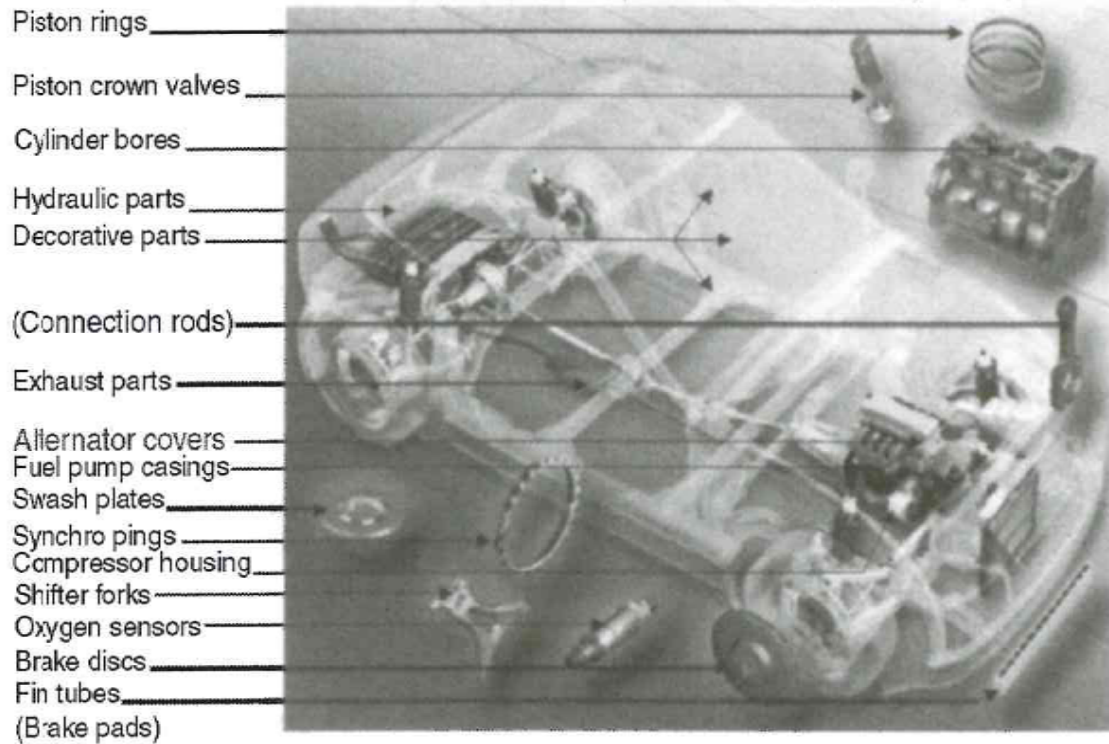


02/05/16

C.Martini – TRSM/7 Riv.Fase Solida

38

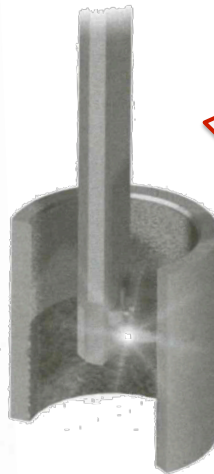
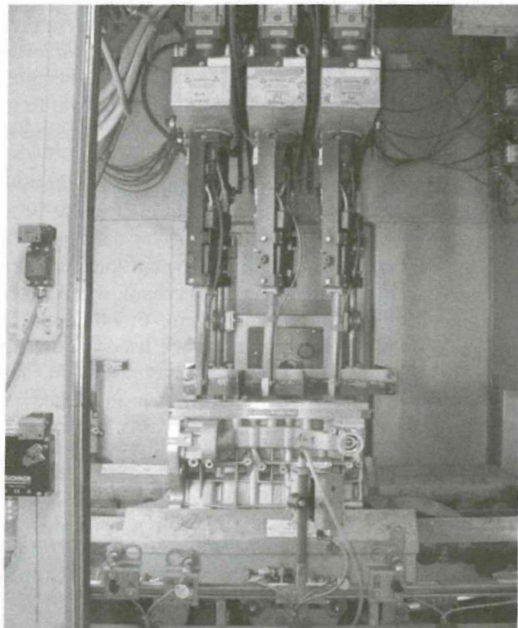
Rivestimenti termospruzzati nell'automobile



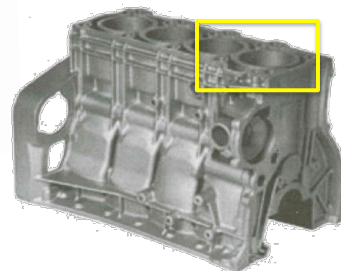
02/05/16

39

Rivestimenti TS: motore a combustione interna



Processo Rotaplasma
per il rivestimento delle
canne dei cilindri nel
blocco motore (in lega
AlSi) con uno strato di **Fe/
Mo** o **Fe/FeOx** con
spessore 150-200 μm (in
1 minuto); dopo la
deposizione le superfici
vengono rettificate con
mola diamantata



02/05/16

C.Martini – TRSM/7 Riv.Fase Solida

40

Rivestimenti termospruzzati (canne cilindri)

Si depositano soprattutto rivestimenti a base di **ossidi lubrificanti** come FeO (wustite) e Fe₃O₄ (magnetite)), prodotti in modo controllato durante termospruzzatura in aria) o di **ghise** per **canne dei cilindri** in blocchi motore a combustione interna.

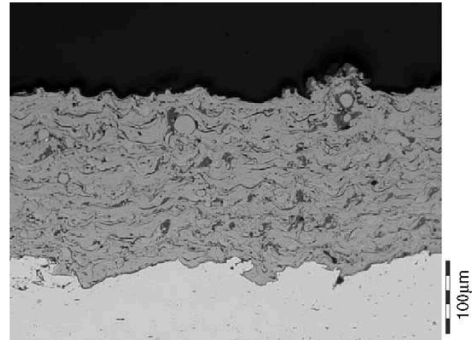


Fig. 1. Typical microstructure of low alloyed carbon steel with wustite and magnetite as solid lubricants ($HV_{0.3}=400$).

02/05/16

C.Martini – Mod. Sup. Leghe Al

41

Termospruzzatura: sviluppi



Functionally Graded Coatings (FGC):

si ottiene uno strato con composizione e proprietà gradualmente variabili dall'interfaccia col substrato alla superficie esterna (in questo caso, depositando una miscela a composizione variabile di polveri WC-Co e di acciaio AISI 316 ← materiale di substrato); **miglioramento stato tensionale**

A. Valarezo et al. / *Surface & Coatings Technology* 205 (2010) 2197–2208

02/05/16

C.Martini – TRSM/7 Riv.Fase Solida

42

Riporti saldati (*Welded Coatings, Hardfacing*)



La saldatura è in primo luogo una tecnica di giunzione, ma quando viene effettuata con apporto di materiale può diventare una tecnica di deposizione.

Vantaggi



- lo **spessore** del riporto può raggiungere valori elevati (3-10 mm);
- con una opportuna scelta dei materiali ed una corretta esecuzione del processo si realizza un vero e proprio **legame metallurgico** tra rivestimento e sostrato;
- è possibile **riportare in quota** parti usurate o **rivestire parti circoscritte** e non facilmente accessibili di componenti in esercizio;
- **economicità ed elevata produttività**

Limiti



- T_{fus} **materiale di riporto** $\leq T_{fus}$ **substrato** (gamma di materiali limitata rispetto a spruzzatura termica);
- anche la zona corticale del sostrato viene portata a fusione, così che il rivestimento sarà in parte "**diluito**" dal metallo base;
- il pezzo da rivestire viene più o meno fortemente **riscaldato** e può quindi subire delle distorsioni e delle alterazioni microstrutturali importanti;
- il pezzo rivestito ha quasi sempre bisogno di essere sottoposto a ulteriori operazioni di **finitura** meccanica

02/05/16

43

Riporti per saldatura: tecnologie

• **Saldatura a torcia** (metodo più convenzionale e consolidato: si impiega una fiamma ossiacetilenica, OAW, per fondere il materiale di apporto)

• **Saldatura ad arco**: un arco elettrico fra un elettrodo e il pezzo da trattare genera calore; i processi si dividono a seconda del tipo di elettrodo (consumabile o meno).

Nei **processi ad elettrodo non consumabile** (TIG o GTAW e saldatura ad arco plasma, PAW) si usa un elettrodo di tungsteno e il metallo di apporto viene introdotto sotto forma di filo o bacchetta (GTAW) o polvere (PW). Il materiale di riporto fonde e viene protetto da una guaina di gas inerte (nella PAW c'è un ulteriore gas inerte che supporta il plasma in uscita dalla torcia)

Nei **processi ad elettrodo consumabile**, l'arco scocca fra l'elettrodo che fornisce il materiale di riporto e il pezzo da trattare:

Shielded Metal Arc Welding (SMAW): l'elettrodo è un filo rivestito di fondente-flussante (flux) che, una volta fuso, forma una scoria liquida e un gas protettivo per il riporto

Flux Core Arc Welding (FCAW): fondente all'interno del filo di materiale di apporto

Gas Metal Arc Welding (GMAW): un gas, alimentato assialmente al filo di materiale di apporto, protegge il riporto allo stato fuso

Submerged Arc Welding (SAW): l'arco è sommerso da un fondente protettivo fornito da una tramoggia

• **Saldatura a fasci energetici** (Laser Beam (LBW) o Electron-Beam Welding (EBW))

02/05/16

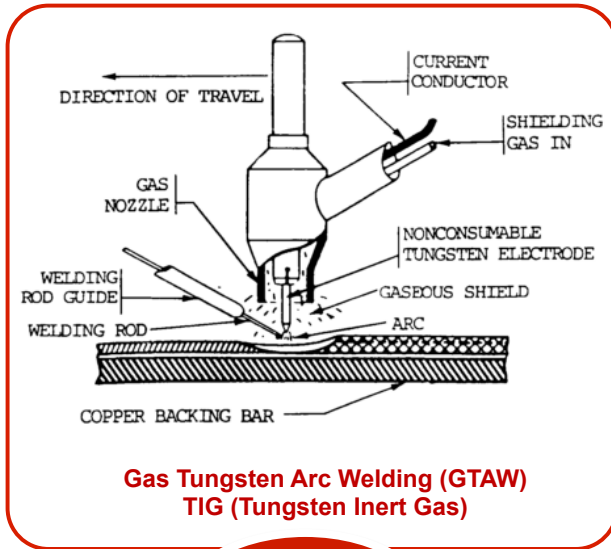
C.Martini – TRSM/7 Riv.Fase Solida

44

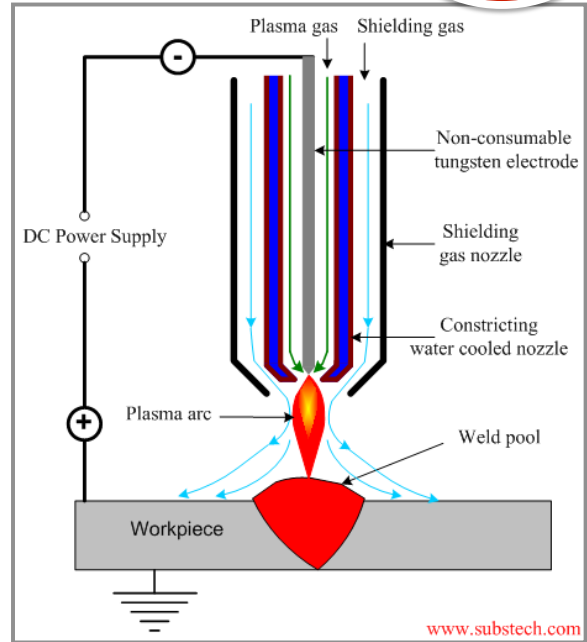
Riporti saldati (*Weld Overlays*)

Tecnologie ad elettrodo **NON** consumabile:

Ad arco plasma



Ad arco con elettrodo infusibile, sotto gas inerte



02/05/16

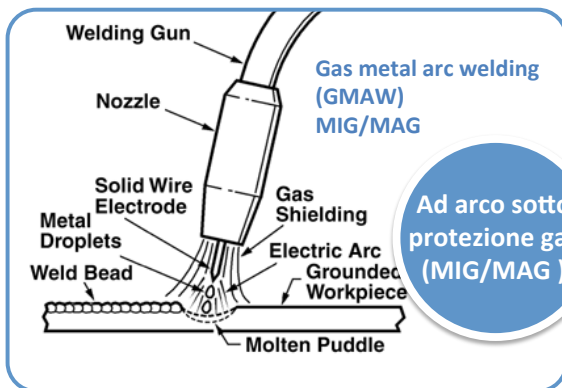
C.Martini – TRSM/7 Riv.Fase Solida

45

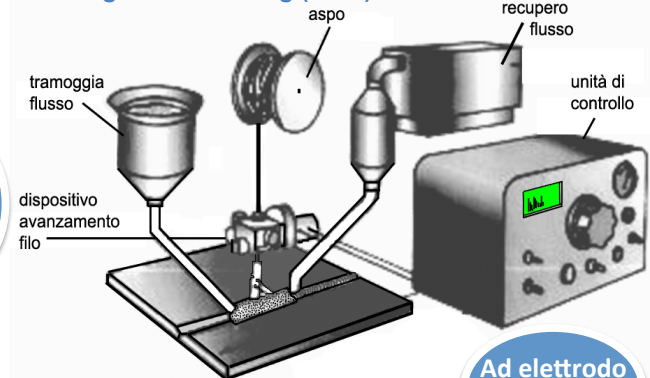
Riporti saldati (*Weld Overlays*)

Tecnologie ad elettrodo **consumabile**:

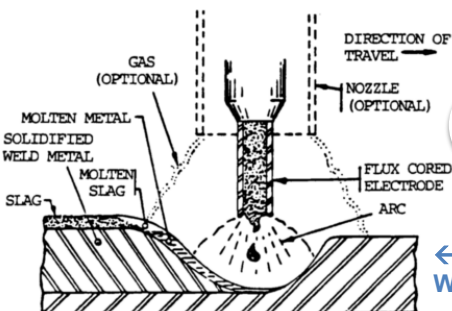
Ad arco sommerso



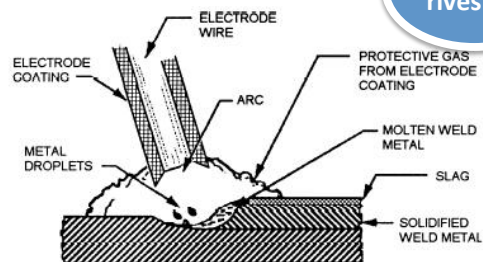
Submerged Arc Welding (SAW)



Ad elettrodo rivestito



A filo animato



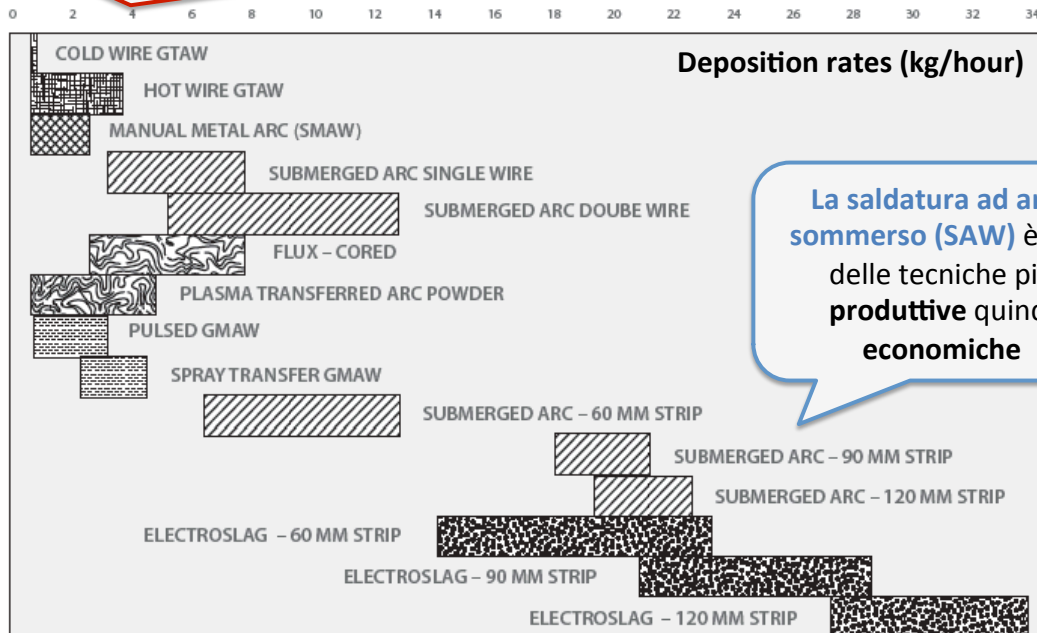
Shielded Metal Arc Welding (SMAW)

02/05/16

46

Riporti saldati: tasso di deposizione

La saldatura ad arco con elettrodo in tungsteno sotto gas inerte (GTAW) è una delle tecniche meno **produttive** ma permette la deposizione in aree difficilmente accessibili



La saldatura ad arco sommerso (SAW) è una delle tecniche più **produttive** quindi **economiche**

Riporti saldati (*Weld Overlays*)

Criteri di scelta per tecnologie di deposizione riporti saldati:

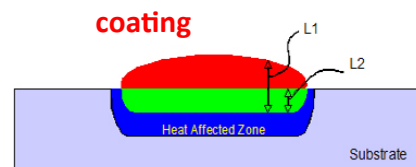
- **accessibilità della zona da rivestire**
- **posizione di saldatura** (rovesciata/orizzontale/verticale)
- **tipo di lega e rapporto di diluizione accettabile**

$$\text{rapporto di diluizione \%} = \frac{x}{x + y} * 100$$

dove:

x: quantità di metallo fuso (substrato)

y: quantità di metallo riportato



- **considerazioni economiche** (v. tasso di deposizione)

Riporti saldati: materiali depositabili

Classificazione AFNOR

N°	Lega depositata	Lavorabilità	Tratt. termico	Durezza HV ₃₀	Resist. usura abrasiva	Resist. usura adesiva	Resist. corrosione	Resist. urto	Tenuta a caldo
1	Acciai non legati	+++	no	< 230	-	-	-	++	-
2	Acciai poco legati	da ++ a +	si	230-500 (*)	++	++	-	-	+
3	Acciai inossidabili	++	no	150-550 (§)	++	-	+++	+	++
4	Acciai al manganese	++	no	200-600 (§)	++	++	+	+++	+
5	Acciai al Cromo	+	event.	200-600 (*)	+++	++	++	++	++
6	Ghise	+	no	400-800	++	+++	-	-	-
7	Ghise al cromo	-	no	700	++	+++	+	-	+
8	Leghe di Co-Cr-W	+	no	340-620	++	+++	+++	+++	+++
9	Leghe fusibili (base Ni)	++	no	200-600	++	+++	+++	+++	+++
10	Leghe di Cu	++	no		-	+++	+++	-	-
11	Carburi cementati	-	no		+++	-	(°)	-	(°)

(*) indurimento per trattamento termico

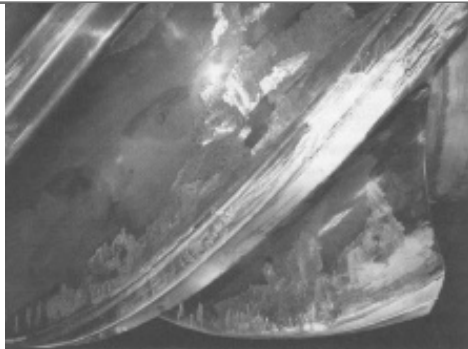
(§) indurimento per incrudimento

(°) dipende dalla matrice metallica

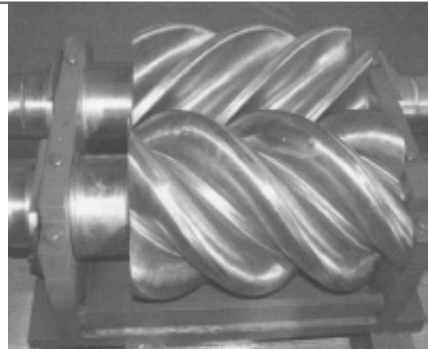
02/05/16

49

Riporti saldati: ripristino quote usurate



prima



dopo

Viti di coclea per granulato di materie plastiche



Palette da turbina in lega di Titanio

02/05/16

C.Martini – 10. Attrito/Usura: trattamenti/rivestimenti

50

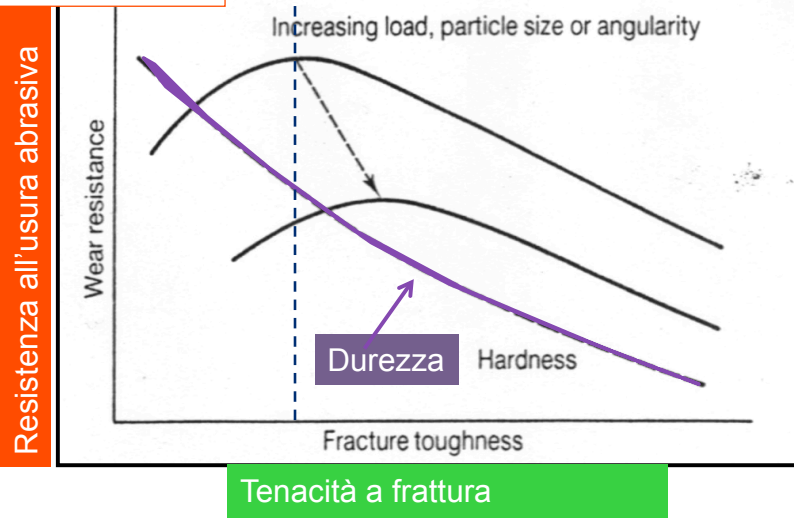
Usura abrasiva

Materiali fragili (alta durezza e bassa tenacità): **usura per frammentazione.**

La resistenza all'usura abrasiva aumenta all'aumentare della tenacità.

Materiali duttili (bassa durezza e alta tenacità): **usura per deformazione plastica.**

La resistenza all'usura abrasiva aumenta all'aumentare della durezza.



02/05/16

51

Riporti saldati: materiali e proprietà

Table 10.1 Relationship between abrasion resistance and toughness/resistance to impact

Group	Abrasion resistance increasing	Impact resistance increasing	Typical uses
6 Tungsten carbide materials			Sinter plant, rock drills, brick and clay tools
2/5 Hi-Cr complex irons			Hot wear — sinter plant scrapers and screens
2/4 Hi-Cr martensitic irons			Ball mill liners
2/3 Hi-Cr austenitic irons			Shovel teeth, screen plates, bucket lips
2/2 Martensitic irons			Abrasion and adhesive wear
2/1 Austenitic irons			Crushers, pump casings and impellers
1/7 Austenitic Cr-Mn steel			Heavy impact e.g. excavator buckets
1/6 Austenitic Mn steels			Heavy impact e.g. crushers, hammers
1/2 Low alloy steels			Build-up materials, tractor parts
1/1 Carbon steels			Build-up materials

Usura abrasiva a bassi sforzi di contatto (es. scivoli per minerali)

Alta durezza

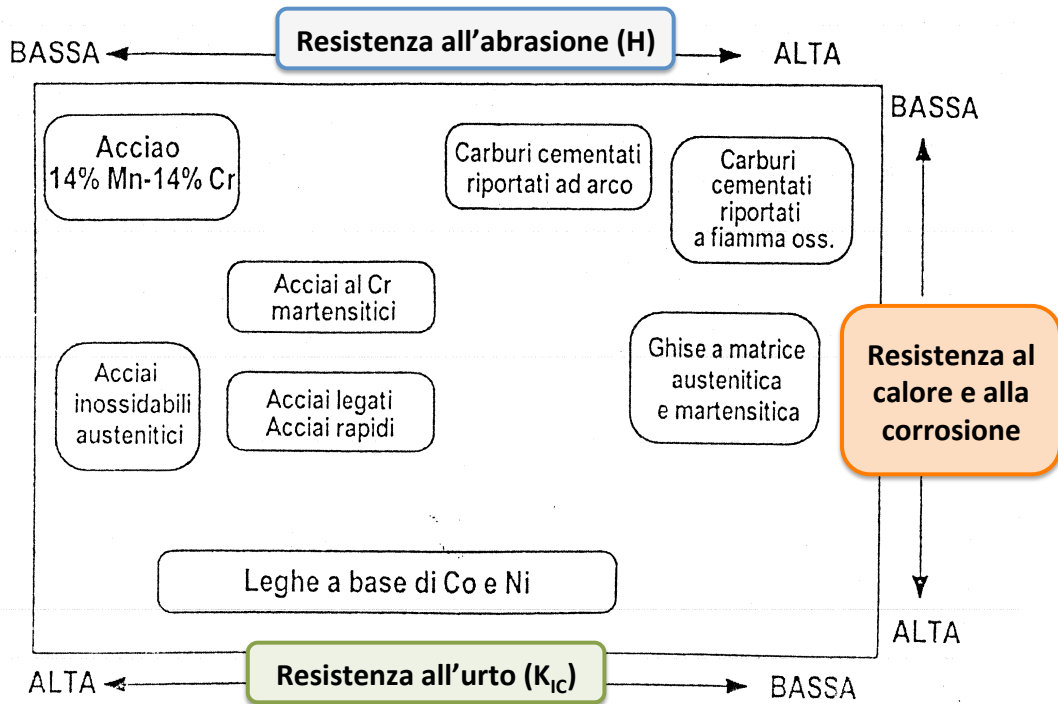
Usura abrasiva con componenti di impatto (es. macinazione minerali)

Alta tenacità

02/05/16

52

Riporti per saldatura: proprietà



02/05/16

C.Martini – TRSM/7 Riv.Fase Solida

53

Termospruzzatura vs. Saldatura

	Termospruzzatura	Saldatura
Adesione	Ridotta: Legame meccanico	Elevata: Legame "metallurgico"
Spessore	Variabile (100 µm ÷ 1 mm)	Solo elevato (3 ÷ 10 mm)
Versatilità	Molto elevata	Abbastanza elevata (T_{fus} riporto < T_{fus} substrato)
Effetti termici sul substrato	In genere Assenti	Significativi (distorsione, diluizione del riporto, modificazione microstrutturale del substrato)
Direzionalità della deposizione (<i>line-of-sight</i>)	Abbastanza elevata (il fascio spruzzato è parzialmente manipolabile per estendere la copertura ad angoli $\neq 90^\circ$)	Regolabile
Porosità	Non trascurabile (escluse tecniche ad alta velocità)	Assente

■ Vantaggi
■ Limitazioni

02/05/16

54

Rivestimenti e trattamenti

- Protezione dalla **corrosione**

- effetto **barriera** (strato aderente, continuo e inerte chimicamente)
- effetto **protettivo** (strato passivante, es. da trattamento di conversione chimica)
- effetto **sacrificale** (es. Zn su Fe)

mantenere tenacità a frattura adeguata!

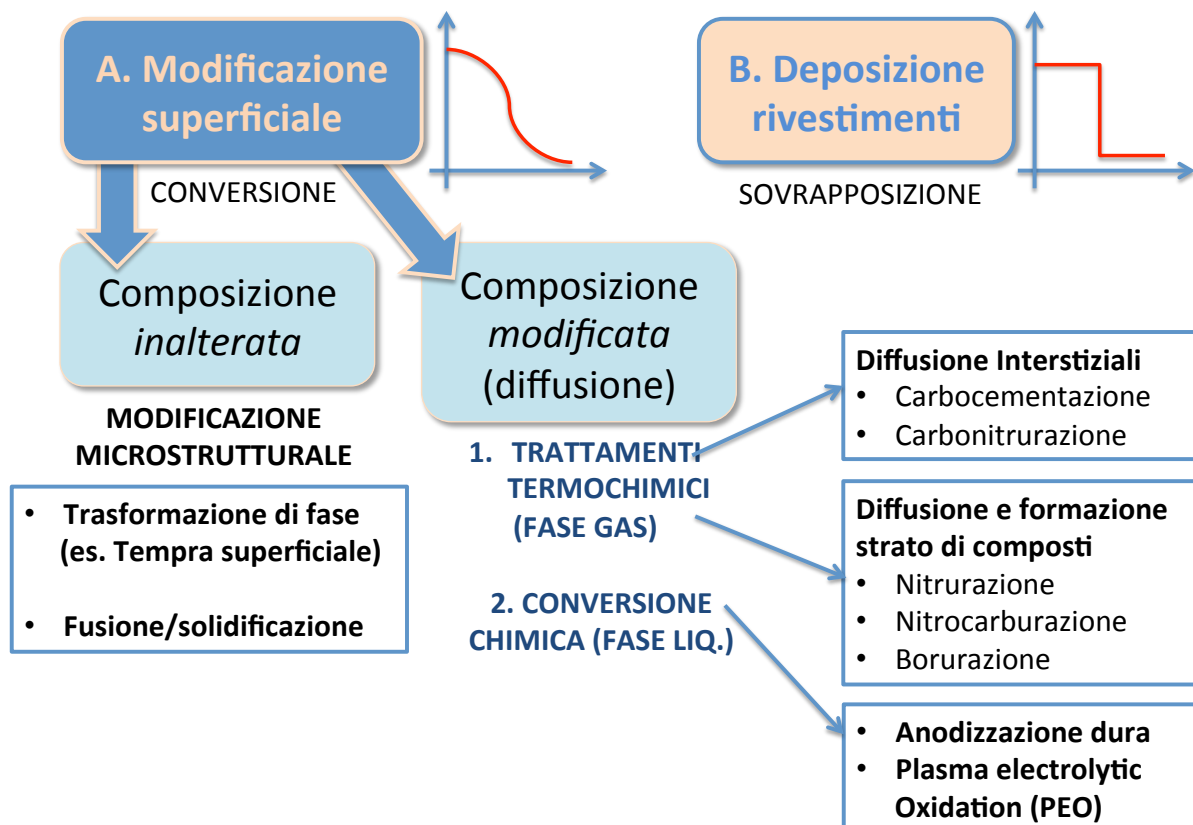
- Miglioramento del **comportamento tribologico**

- **indurimento** superficiale (incremento resistenza ad **usura**)
- materiali a bassa durezza e **basso τ_m** (riduzione **attrito**)
- materiali innovativi (basso **attrito** + bassa **usura**)

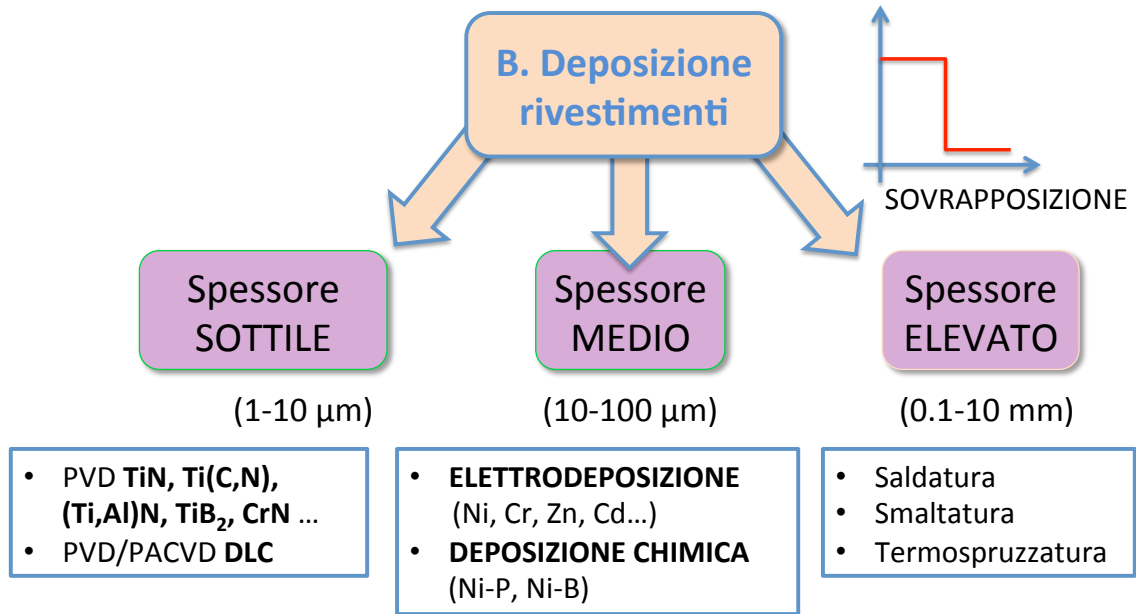
DLC

depositare in strati sottili

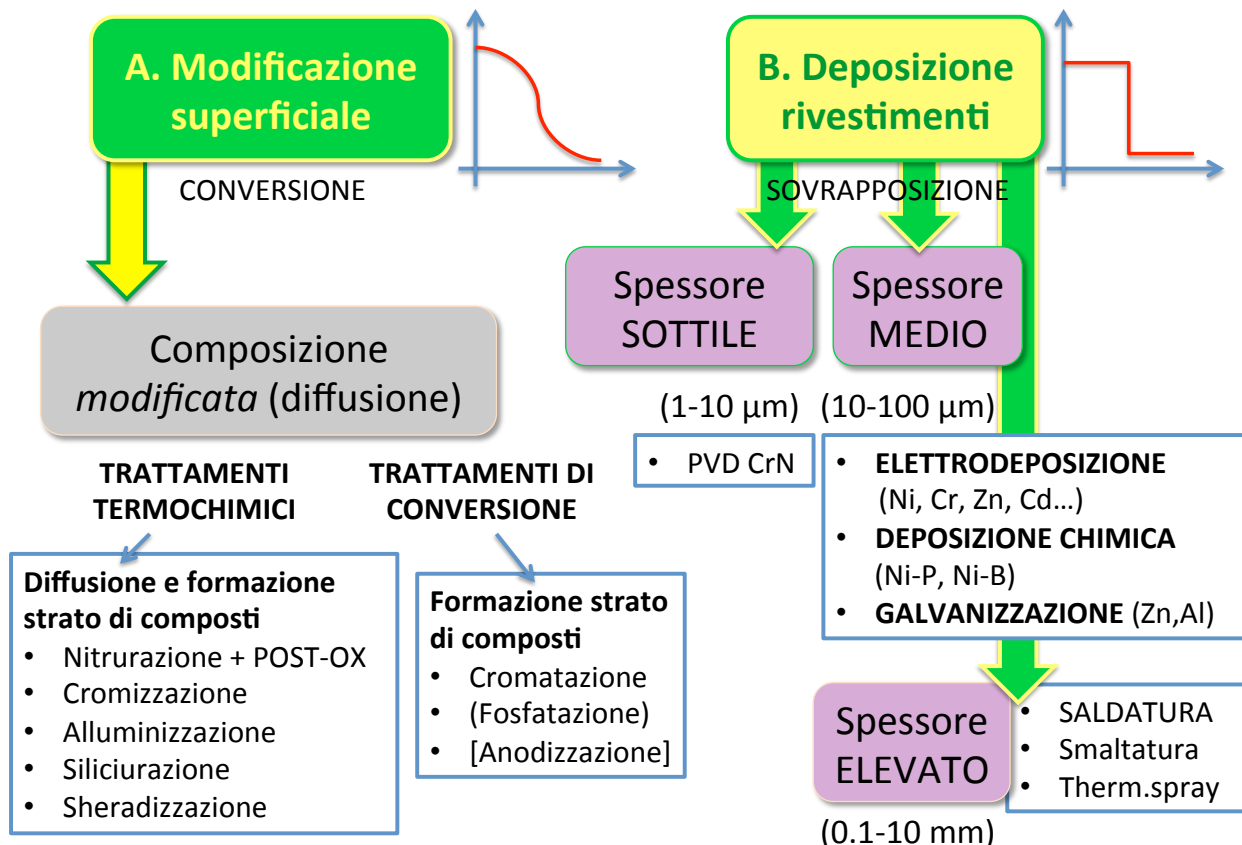
TRATTAMENTI/RIV. ANTIUSURA



TRATTAMENTI/RIV. ANTIUSURA



TRATTAMENTI/RIV. ANTICORROSIONE



Criteri di scelta per rivestimenti/trattamenti

Effettuare la scelta confrontando le diverse tecniche dal punto di vista di:

- parametri di processo
- caratteristiche impartite al materiale trattato

Parametri principali:

a) SPESSORE (supporto del carico (substrato deformabile), effetto barriera)

b) DUREZZA (tenacità?)

c) STATO TENSIONALE (resistenza a fatica)

d) EFFETTI SUL SUBSTRATO (modificazioni microstrutturali e distorsioni)

e) RUGOSITA' finale e iniziale

f) GEOMETRIA DEL PEZZO DA TRATTARE

(direzionalità della deposizione; potere livellante o penetrante)

e) ADESIONE (tipologia di interfaccia, temperatura di deposizione)

f) VELOCITÀ DI DEPOSIZIONE (produttività)

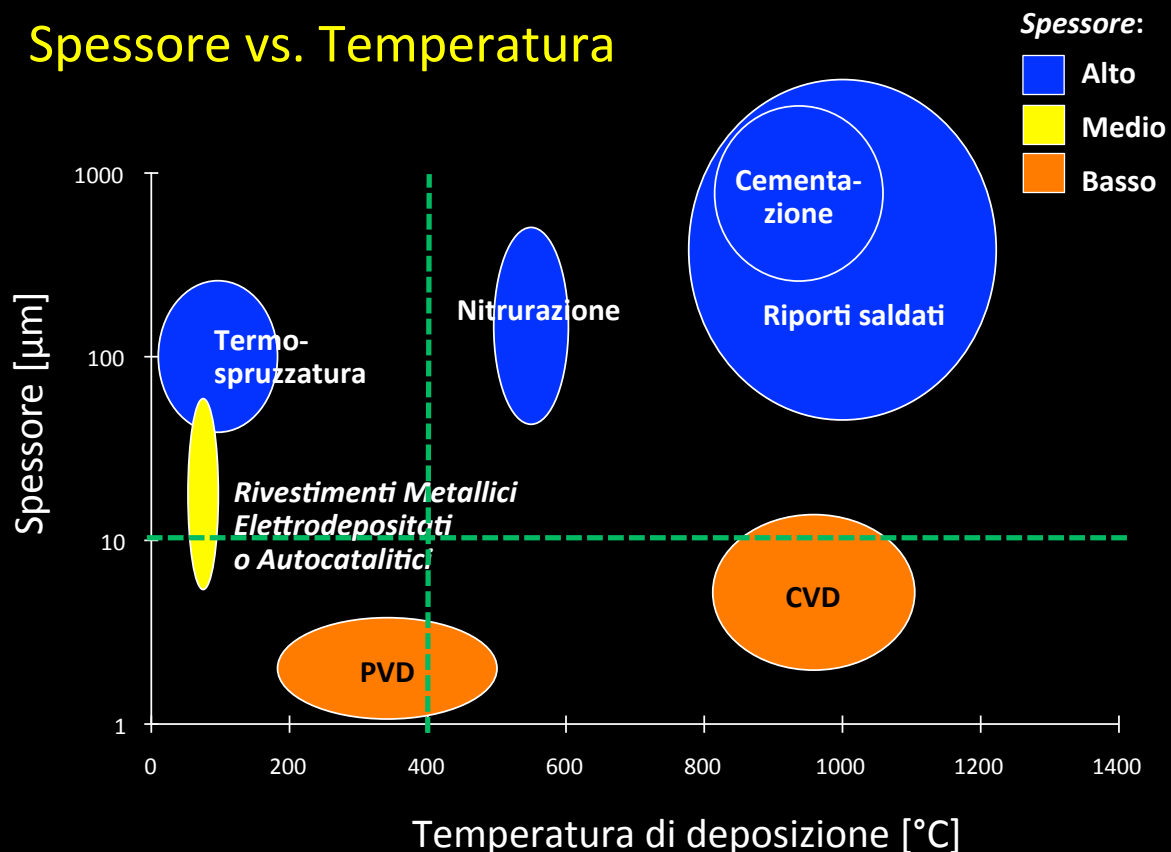
g) Ultimo ma non meno importante: COSTO!

→ Pensare in termini di SISTEMA (RIVESTIMENTO + SUBSTRATO)

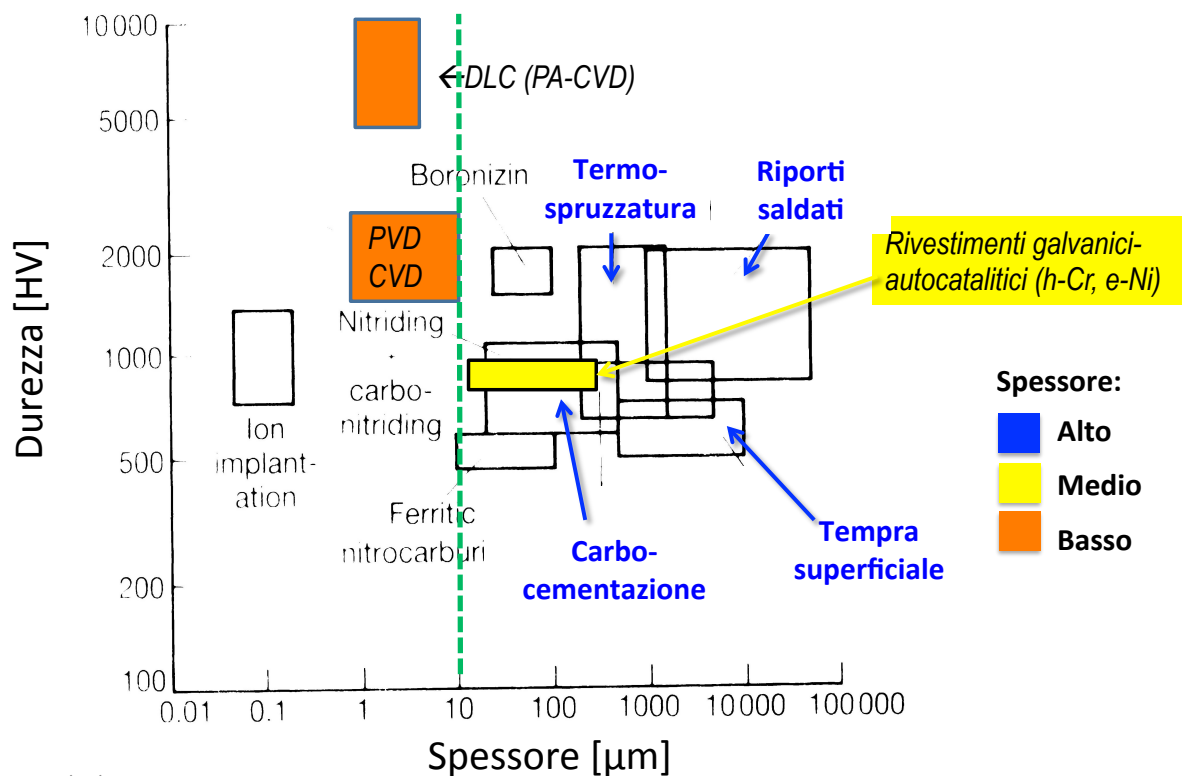
02/05/16

59

Spessore vs. Temperatura



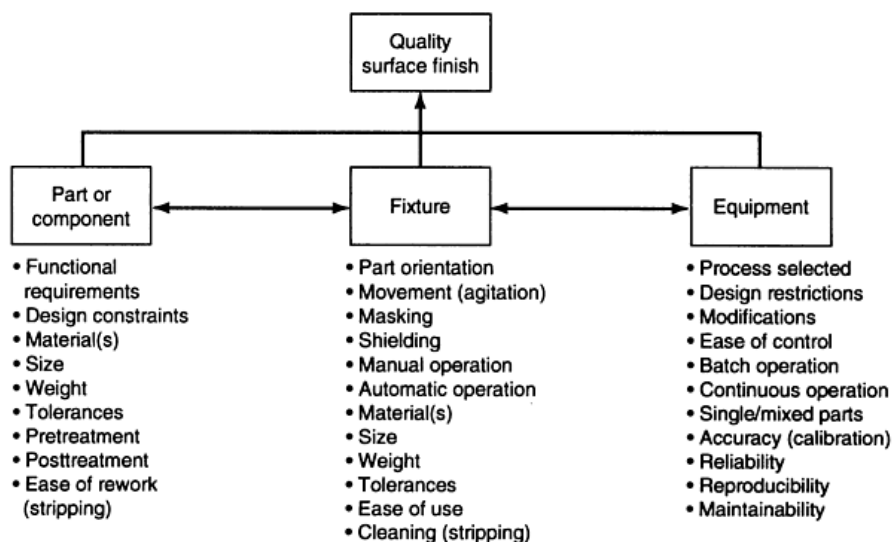
Durezza vs. spessore (rivestimenti tribologici)



02/05/16

61

Geometria del substrato → requisiti di processo



SUBSTRATO:

- come è gestibile in relazione alla tecnologia di deposizione (dim. camera/vasca/fissaggio)?
- che aumento di spessore è tollerabile?
- è compatibile con le condizioni di deposizione (effetti termici/geometria/dimensioni)?
- è compatibile con le esigenze del rivestimento (es. supporto carico)?
- progettazione del componente in funzione del rivestimento?

ASM Handbook Volume 20, Materials Selection and Design → Effects of Surface Treatments on Materials Performance

02/05/16

C.Martini – TSRM/Criteri di scelta

62

Criteri di scelta: schema generale

1. Requisiti prestazionali:

- resistenza all'usura abrasiva/adesiva/fatica sup./tribo-ox?
- resistenza alla corrosione a umido/a secco?
- resistenza a fatica?
- requisiti dell'interfaccia rivestimento/substrato?

2. Vincoli di progettazione:

- pretrattamento (finitura → rugosità)
- forma del componente (→ potere livellante del rivestimento)
- dimensioni del componente (→ camera/vasca di deposizione)
- effetti termici su microstruttura e composizione?
- mascheratura?
- post-trattamento?

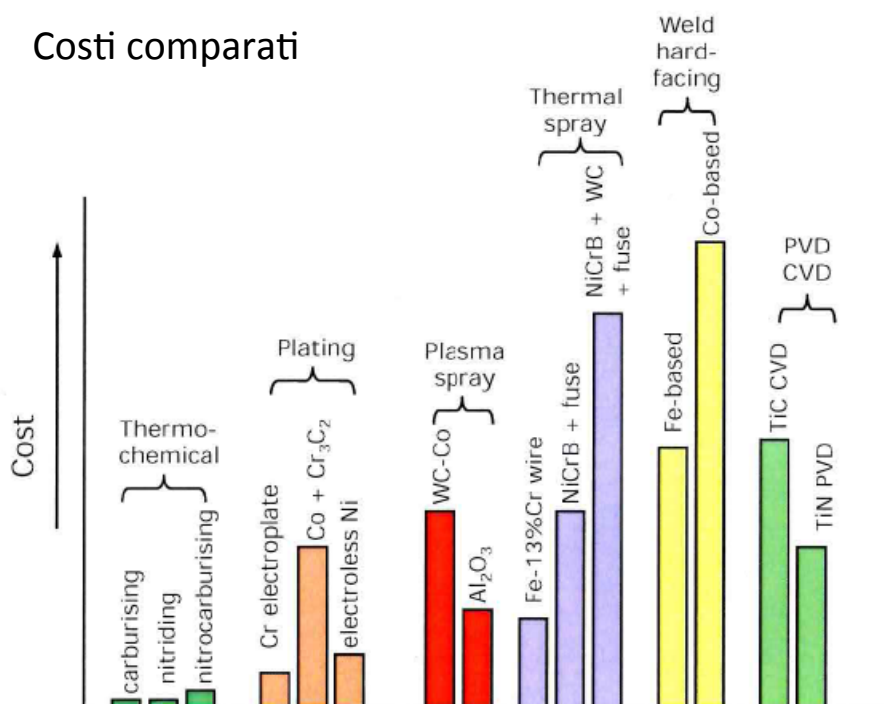
3. Analisi economica:

- prendere in esame il ciclo completo
- tenere in considerazione effetti di scala (n. parti rivestite)
- produttività (tempi di rivestimento)
- controllo qualità

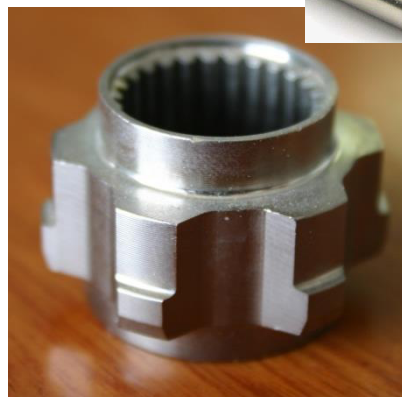
Tecniche a bassa P:
il costo cresce exp con
dimensioni camera deposizione

Criteri di scelta per rivestimenti/trattamenti

- Costi comparati



Un esempio di scelta: Perni, boccole e parti per pompe in acciaio



1. Requisiti prestazionali:

- tribologia: resistenza a strisciamento
- corrosione: resistenza in ambienti aggressivi

2. Vincoli di progettazione:

- forma anche irregolare
- dimensioni limitate

3. Analisi economica:

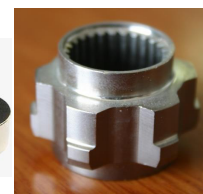
- elevato numero di parti da rivestire (grande serie a costi più bassi possibile)

02/05/16

C.Martini – TSRM/Criteri di scelta

65

Un esempio di scelta: Perni, boccole e parti per pompe in acciaio



1. Requisiti prestazionali:

- tribologia: resistenza a strisciamento
- corrosione: resistenza in ambienti aggressivi

2. Vincoli di progettazione:

- forma anche irregolare
- dimensioni limitate

3. Analisi economica:

- elevato numero di parti da rivestire (grande serie a costi più bassi possibile)

Cr duro
Ni Chimico

Galvanizzazione (Zn da
bagno di metallo fuso)

OK Ni chimico:

- Rispetto tolleranze
- Protezione all'usura + corrosione

Perché non la zincatura:

- Le tolleranze strette non sono rispettate
- Non offre protezione dall'usura

Perché non la cromatura:

- scarso potere penetrante ("effetto punta")

02/05/16

C.Martini – TSRM/Criteri di scelta

66

Un esempio di scelta: Anelli di tenuta

1. Requisiti prestazionali:

- tribologia: alta resistenza a strisciamento
- corrosione: resistenza all'ossidazione a caldo

Funzioni degli anelli per pistoni:

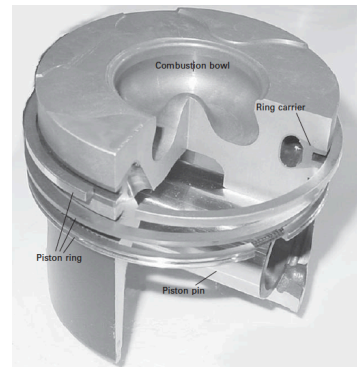
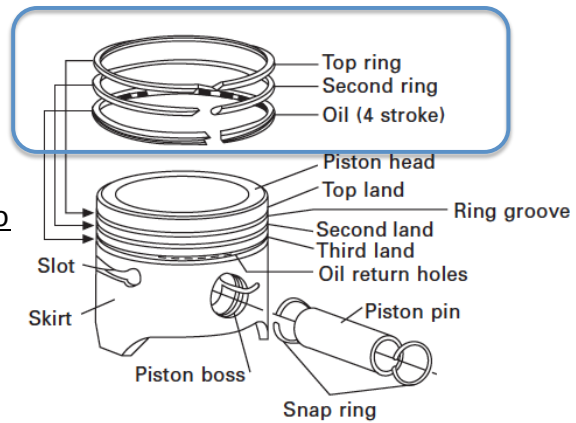
- Tenuta dei gas di combustione
- Distribuzione dell'olio
- Trasmissione del calore

2. Vincoli di progettazione:

- forma non eccessivamente complessa
- dimensioni limitate, compatibili con molti processi

3. Analisi economica:

- vincoli di costo

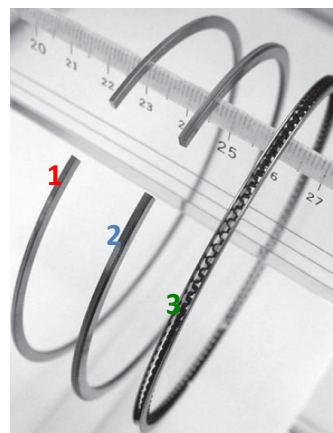
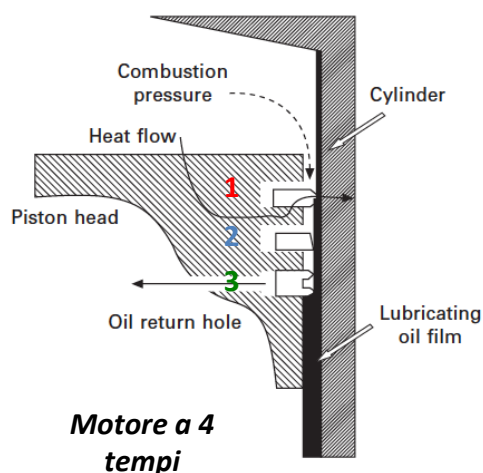


02/05/16

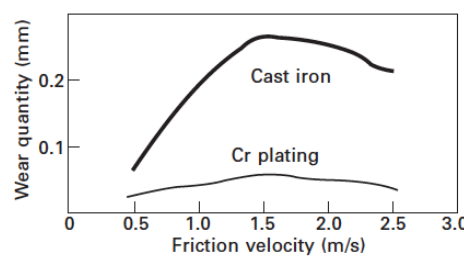
C.Martini – TSRM/Criteri di scelta

67

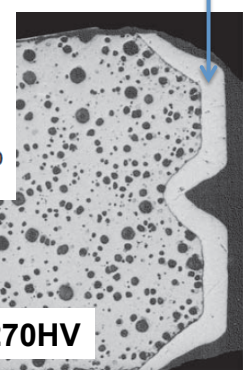
Un esempio di scelta: Anelli di tenuta



Dettaglio dello **spaziatore** nell'anello (3), raschiaolio (acciaio inox austenitico)



Cr (800-1200 HV)



Soluzione convenzionale (anello 2, motore a 2 tempi): ghisa sferoidale (tenace) rivestita con Cr a spessore (banda anti-scuffing al centro)

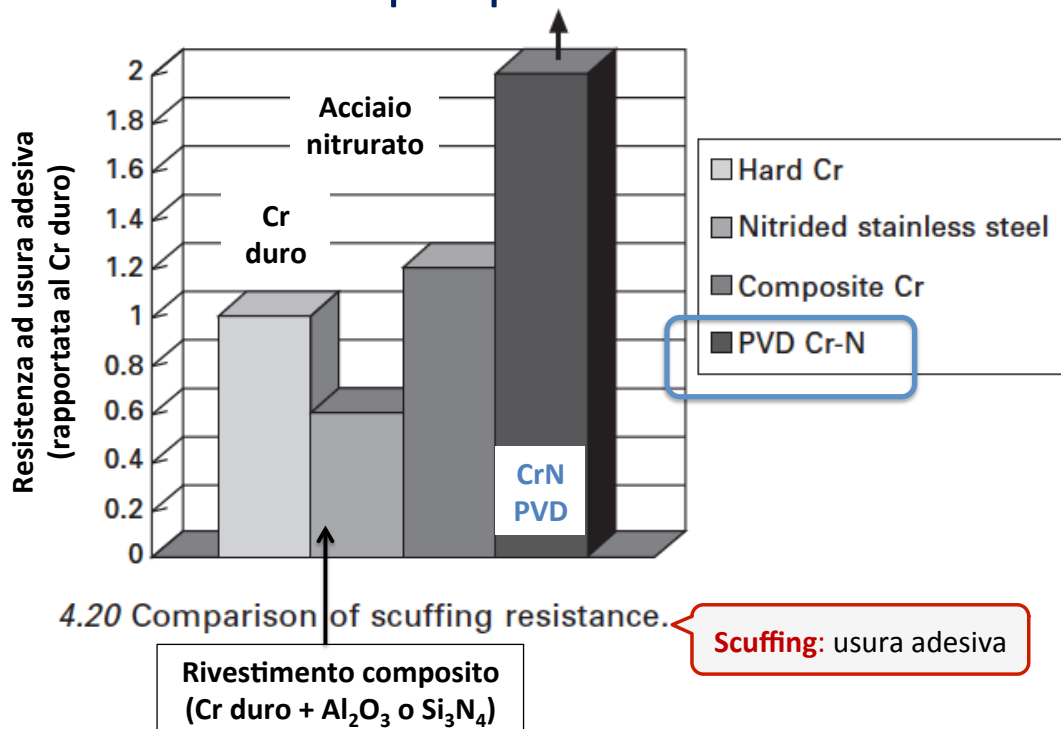
02/05/16

C.Martini – TSRM/Criteri di scelta

200 μm

Un esempio di scelta:

Anelli di tenuta per pistoni (motore a combustione interna)



02/05/16

C.Martini – TSRM/Criteri di scelta

69

Un esempio di scelta:

Anelli di tenuta per pistoni (motore a combustione interna)

1. Requisiti prestazionali:

- tribologia: alta resistenza a tribo-ossidazione ed adesione
- corrosione: resistenza all'ossidazione a caldo

PVD CrN

2. Vincoli di progettazione:

- forma non eccessivamente complessa
- dimensioni limitate, compatibili con molti processi

OK PVD

3. Analisi economica:

- l'elevato numero di parti rivestibili giustifica economie di scala che riducono i costi elevati della tecnologia PVD (la nitrurazione è più economica in valore assoluto, ma dà prestazioni peggiori; il Cr duro deriva da processi ad elevato impatto ambientale per via del Cr esavalente nei bagni di cromatura)

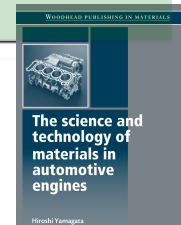
02/05/16

C.Martini – TSRM/Criteri di scelta

70

Table 4.2 Ring materials with surface treatments. Gas-nitrided martensitic stainless steel generates a hard nitrided surface layer containing carbides and nitrides, which has superior wear and scuffing resistance. Physical vapor deposition (PVD) is a coating process in which a vaporized metal is deposited under a reduced pressure atmosphere. CrN is widespread for piston rings. Ionized Cr is deposited under nitrogen gas at high adhesion speed (Appendix H)

Specifications			Base material	Outer surface modification	Side surface modification
Top ring			Nodular cast iron Si-Cr steel	Cr plating Cr plating	Phosphate conversion Fe ₃ O ₄ coating, Solid lubricant coating
1			Martensitic stainless steel	Gas nitriding, Composite plating, Physical vapor deposition	Phosphate conversion Solid lubricant coating
Second ring			Nodular cast iron Gray cast iron	Cr plating Phosphate conversion	Phosphate conversion Phosphate conversion
Oil control ring	3-piece	Side rail	Carbon steel	Cr plating	Fe ₃ O ₄ coating, Phosphate conversion
		Space expander	Martensitic stainless steel Austenitic stainless steel	Gas nitriding Ion nitriding Salt bath nitriding	Phosphate conversion
3	2-piece	Oil ring surface piece	Carbon steel Martensitic stainless steel	Cr plating Gas nitriding	Fe ₃ O ₄ coating Phosphate conversion
		Coil expander	Carbon steel Austenitic stainless steel	Cr plating Salt bath nitriding	



Glossario

anodizzazione dura	hard anodising
attrito	friction
carbocementazione	carburising, case hardening
Cr a spessore, Cr duro	hard chromium
indurimento superficiale	surface hardening
ingegneria delle superfici	surface engineering
lubrificante	lubricant
Ni chimico	electroless Ni
niturazione	nitriding
riporti saldati	welded coatings
termospruzzatura	thermal spraying
tribologia	tribology
usura	wear
usura adesiva	adhesive wear
usura abrasiva	abrasive wear
usura da strisciamento	sliding wear

Principali riferimenti bibliografici

- K.Holmberg, A.Matthews (2009), *Coatings Tribology: Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering*, Elsevier.
- G. Straffelini, “Attrito e usura. Metodologie di progettazione e controllo”, Tecniche Nuove, 2005.
- P.Pedefferri, “Corrosione e Protezione dei Metalli”, CLUP.
- P. Paracchini (a cura di), “Manuale di trattamenti e finiture”, Tecniche nuove (2003)
- S.Grainger (1989), *Engineering coatings: design and applications*, Abington Publishing.
- ASM Handbook vol.5 (2010 on-line), *Surface Engineering*, ASM International
- ASM Handbook vol. 20, *Materials Selection and Design: Effects of Surface Treatments on Materials Performance*