

Trattamenti di modificazione microstrutturale

Hanno lo scopo di **modificare la microstruttura superficiale** dei componenti meccanici senza alterare la composizione chimica.

AUMENTO DELLA DUREZZA SUPERFICIALE

Mediante incrudimento

Rullatura
Pallinatura

Mediante trasformazione martensitica

Fiammatura
Tempra a induzione
Tempra con fascio laser o elettronico

Selettività: i trattamenti di modificazione microstrutturale possono essere applicati a singole regioni dei componenti meccanici

1. I trattamenti meccanici

L'**indurimento superficiale** è ottenuto per **incrudimento** mediante **intensa deformazione plastica superficiale**

RULLATURA: rotolamento di un rullo sulla superficie con carico tale da indurre contatto completamente plastico

PALLINATURA: getto di sferette in acciaio o in materiale ceramico contro la superficie da trattare

Indurimento superficiale proporzionale all'**intensità del trattamento**

ESEMPI DI APPLICAZIONI:

Acciai cementati per trasformare l'austenite residua in martensite

Componenti sinterizzati per limitare il fenomeno della fatica superficiale

2. I trattamenti di tempra superficiale

La **trasformazione martensitica** è ottenuta dopo **austenitizzazione** e **rapido raffreddamento** dello strato superficiale

FIAMMATURA: per componenti di dimensioni relativamente grandi, dopo l'austenitizzazione necessario adeguato raffreddamento

TEMPRA A INDUZIONE: parametri di processo meglio controllabili

TRATTAMENTI LASER O EB: riscaldamento intenso e confinato in regioni ristrette, non più necessario mezzo di raffreddamento

La composizione chimica dell'acciaio deve essere tale da poter originare martensite

ESEMPIO DI APPLICAZIONE:

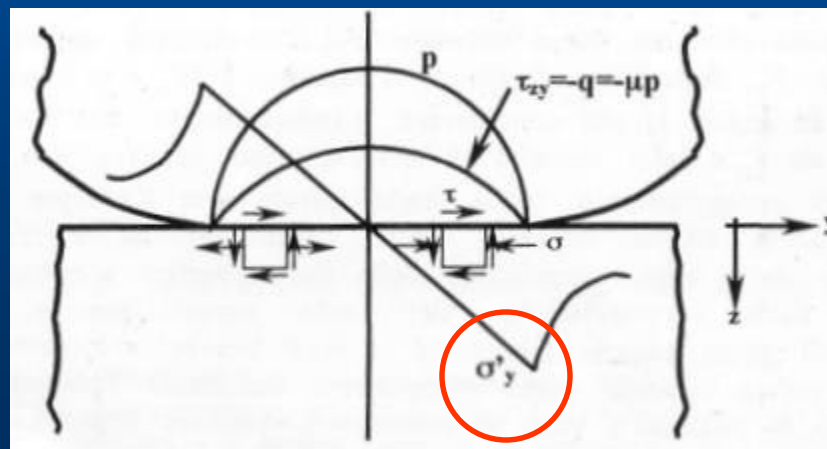
Tempra superficiale dei fianchi di un dente di ingranaggio

LIMITE NELL'APPLICAZIONE: tensioni residue indotte nel particolare trattato

L'entità delle tensioni residue è strettamente correlata alle **dimensioni** del pezzo, alla **temprabilità** dell'acciaio e alla **velocità di raffreddamento**

L'effetto delle tensioni residue può talvolta essere di natura benefica!

La **natura elastica** delle **tensioni residue di compressione** migliora la resistenza al danneggiamento per **fatica superficiale**



Trattamenti di conversione chimica

Consistono sostanzialmente in **attacchi moderatamente corrosivi** che portano ad un'**alterazione** dello **strato superficiale** di **natura chimica**



Formazione di uno STRATO SUPERFICIALE DI PRODOTTI INSOLUBILI

Principali trattamenti di conversione ad **interesse tribologico**



Fosfatazione



Anodizzazione



La fosfatazione

Trattamento di natura chimica impiegato principalmente sulle **leghe ferrose** mediante **spruzzatura** o **immersione** in un **bagno di acido fosforico**



Strato di FOSFATI IDRATI di METALLI presenti nel bagno

Entità della fosfatazione misurata in termini di **peso specifico di strato di fosfatazione**

Strato fosfatato caratterizzato da **porosità**



Protezione contro corrosione



Autolubrificazione

La fosfatazione

FOSFATAZIONE ALLO Zn: supporto per la successiva applicazione di oli e saponi

ESEMPI DI APPLICAZIONI: processi di lavorazione per deformazione plastica, stampaggio a freddo di bulloneria, profondo stampaggio di lamiera

FOSFATAZIONE AL Mn: trattamento autolubrificante e antiusura

ESEMPI DI APPLICAZIONI: rivestimenti di ingranaggi, sistemi camma-punteria

Più in generale impiegata quando si ha criticità nelle fasi di run-in e problemi di scuffing

Trattamenti di ricottura del rivestimento a T di 250 – 450 °C possono promuovere fenomeni di microframmentazione!

L'ossidazione anodica

Trattamento di **conversione elettrochimica** impiegato tipicamente sulle **leghe di alluminio** per impieghi specificatamente tribologici

Trattamento condotto in un **bagno di acido solforico**



Strato superficiale di OSSIDI DEL METALLO TRATTATO

Presenza **microporosità**  Durezza ossido inferiore alla durezza allumina

ANODIZZAZIONE DURA: bassa T, bassa porosità, spessori abbastanza elevati (50 μm)

Trattamento non adatto per contatti non conformi!

L'ossidazione anodica

Problema **fragilità ossido** e attitudine alla **microframmentazione**

Elevata **rugosità**  Azione **abrasiva**

Elevata **durezza** ma **tenacità alla frattura** ridotta

ESEMPI DI APPLICAZIONI

Sistemi tribologici con **durezza elevata** dell'antagonista

Applicazione di **pellicole lubrificanti solide** a base PTFE o MoS₂

Richiesta resistenza all'**usura abrasiva** in presenza di **bassi sforzi di contatto**

Rivestimenti superficiali

Le **proprietà tribologiche** dipendono fortemente da **2 parametri**

1. **CAPACITA' DEL SUBSTRATO di SOSTENERE il rivestimento**

I rivestimenti antiusura sono **più duri** e quindi **meno deformabili** dei substrati



Aumento durezza substrato / Aumento spessore rivestimento

Esiste una dimensione di spessore ottimale!

Rivestimenti superficiali

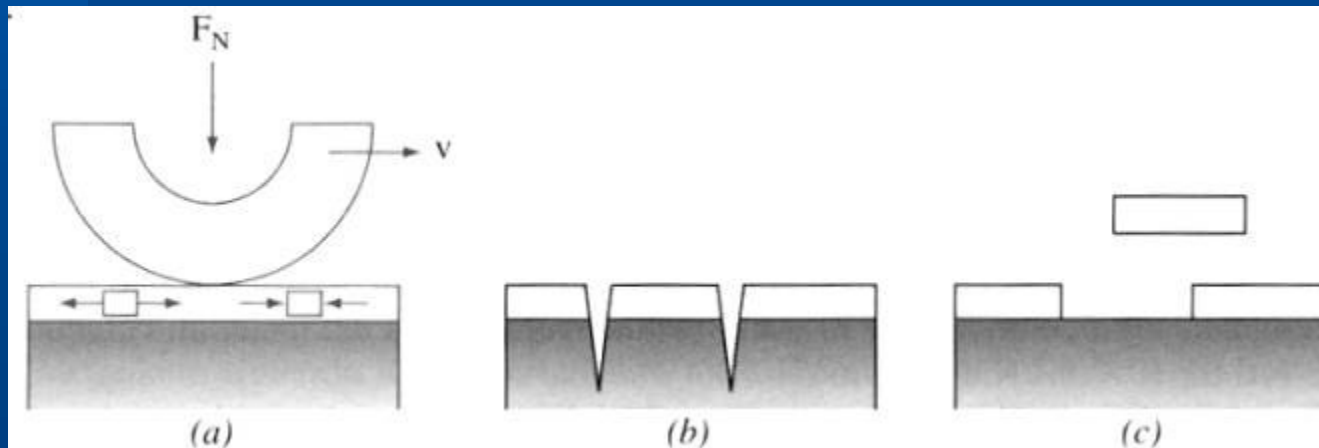
2. ADESIONE RIVESTIMENTO - SUBSTRATO

Dipende fortemente dall'**interazione chimico-fisica** all'interfaccia

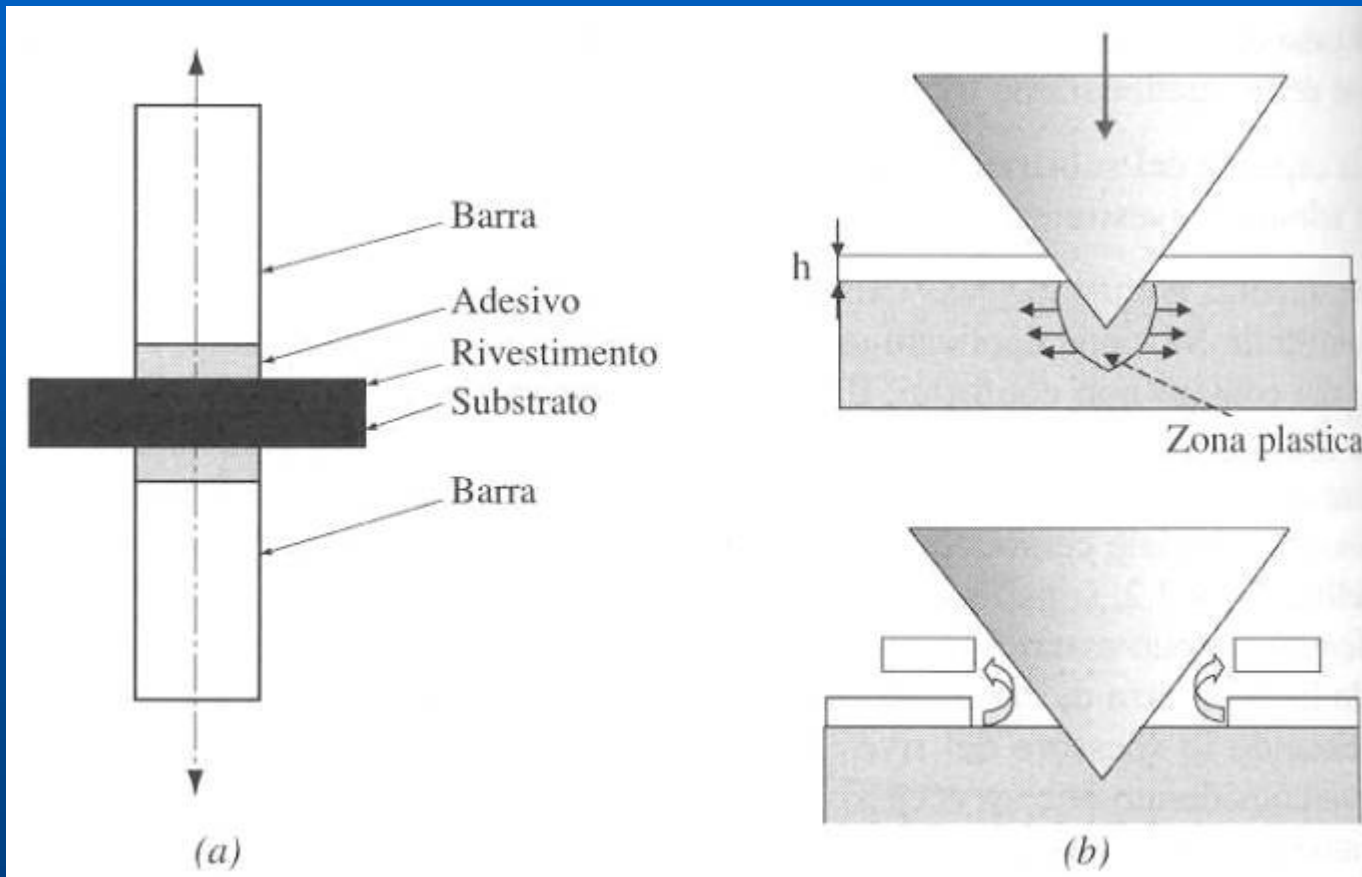
Possibile presenza di **tensioni residue**



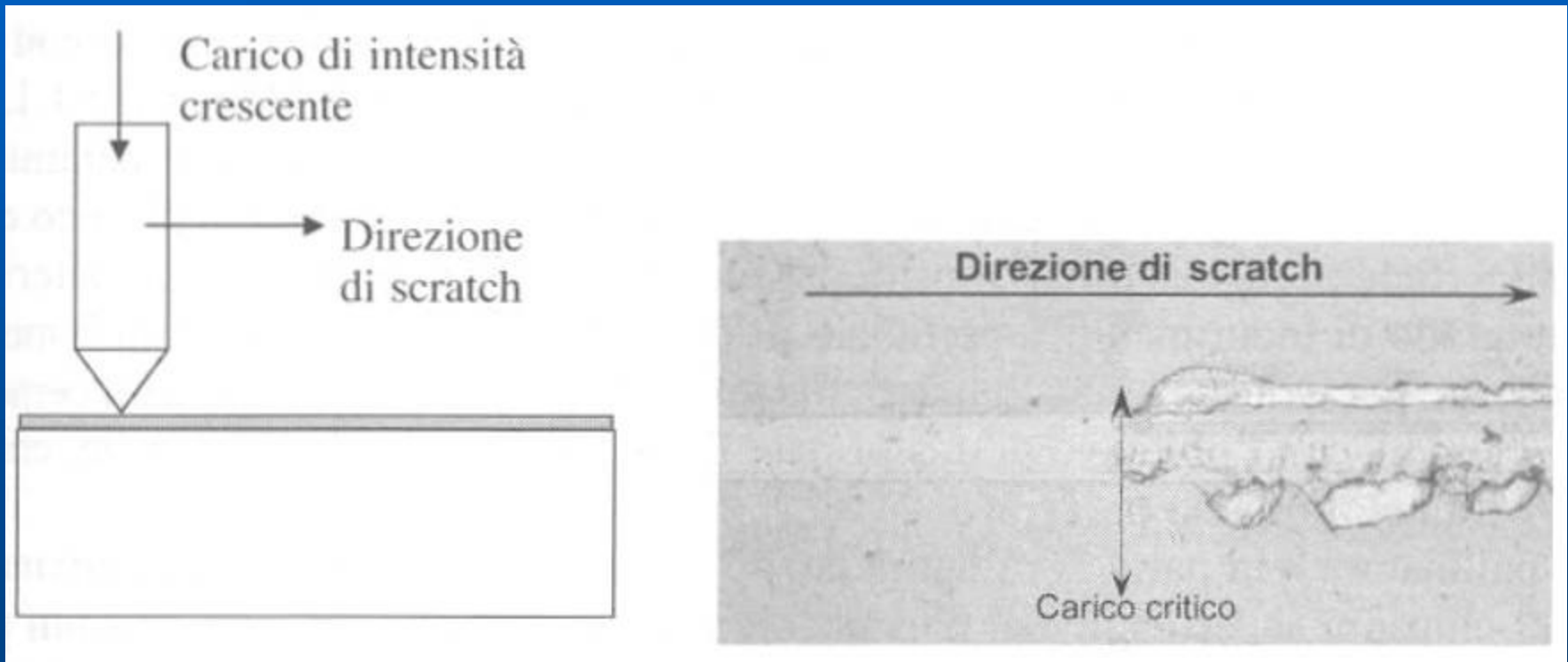
Nel caso dei rivestimenti possono sia di **trazione** che di **compressione**



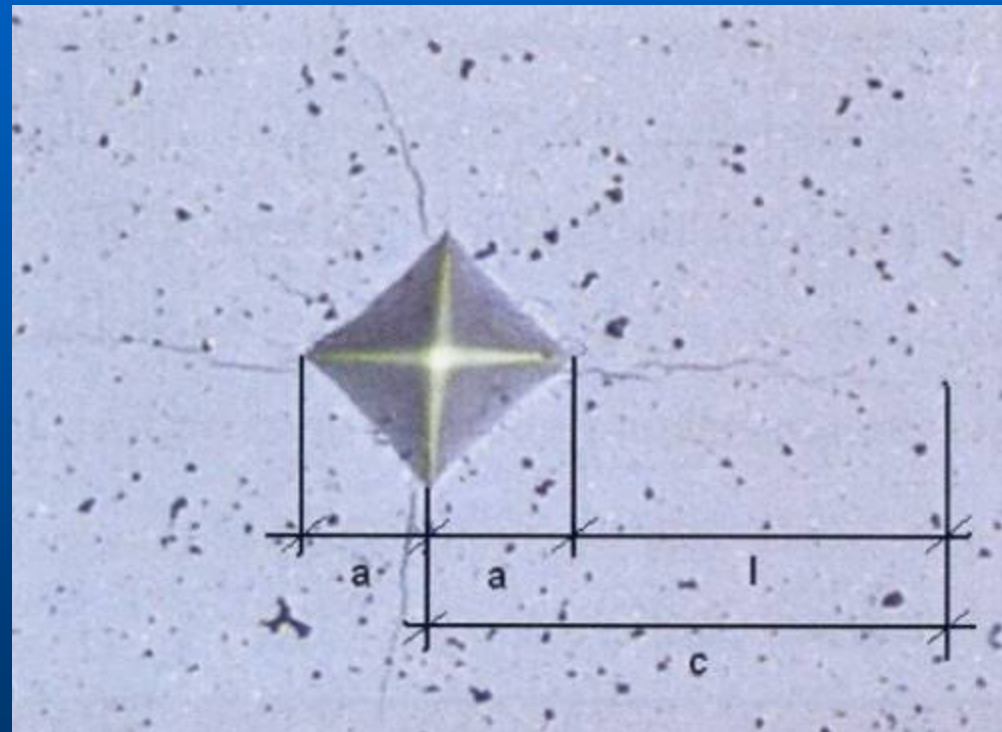
Prove di collaudo non convenzionale



Prove di collaudo non convenzionale



Prove di collaudo non convenzionale



$$K_{Ic} = 0.0122 \left(\frac{E}{HV} \right)^{2/5} \cdot \frac{P}{a \cdot l^{1/2}}$$
$$K_{Ic} = 0.0319 \cdot \frac{P}{a \cdot l^{1/2}}$$

1. I rivestimenti metallici

CROMATURA A SPESSORE: realizzata con tecniche elettrochimiche mediante soluzioni di acido cromico

CARATTERISTICHE: microstruttura nanocristallina, durezza elevata, spessori variabili

Possibile sviluppo di cricche perpendicolari

Deposizione in ambiente acido → Possibile fragilimento da idrogeno

Valori elevati di tensioni residue di trazione

Elevata resistenza all'usura per strisciamento con lubrificazione limite o scuffing

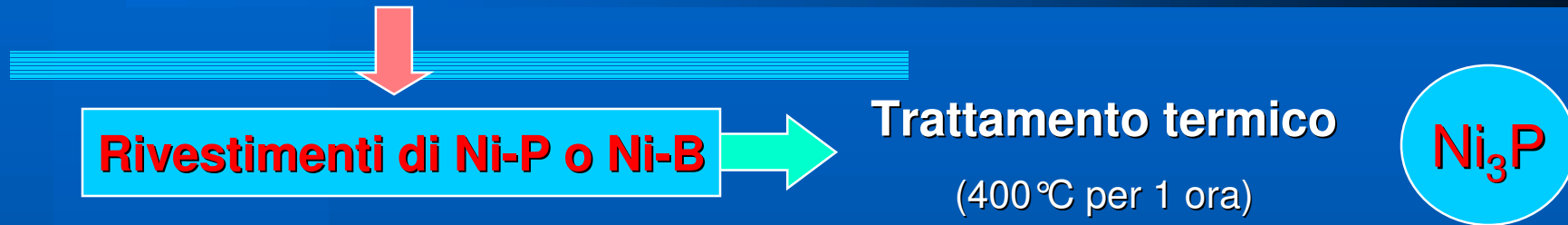
ESEMPIO DI APPLICAZIONE:

Segmenti elastici dei motori

Ripristino delle dimensioni nominali in componenti usurati

Rivestimento non adatto per contatti non conformi perché fragile!

NICHELATURA A SPESSORE: realizzata per via elettrochimica o chimica mediante soluzioni di sodio ipofosfito o boroderivati



CARATTERISTICHE: durezze elevate, possibile variare la **T** di trattamento

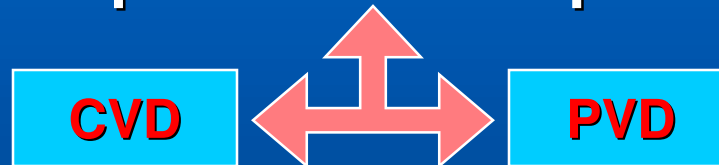
Possibilità di ottenere **rivestimenti compositi**



Il Ni chimico così come depositato migliora anche la resistenza a corrosione!

2. I rivestimenti sottili

Rivestimenti di materiali **ceramici** (nitruri, carburi, ossidi,...) ottenuti mediante tecniche di **deposizione in vapore**



SPESSORE: 2 – 10 μm

Ottima resistenza all'usura per **strisciamento** e **abrasiva** con **bassi sforzi di contatto**

Impiegato inoltre nei casi di **danneggiamento per fatica superficiale** con lubrificazione limite o mista

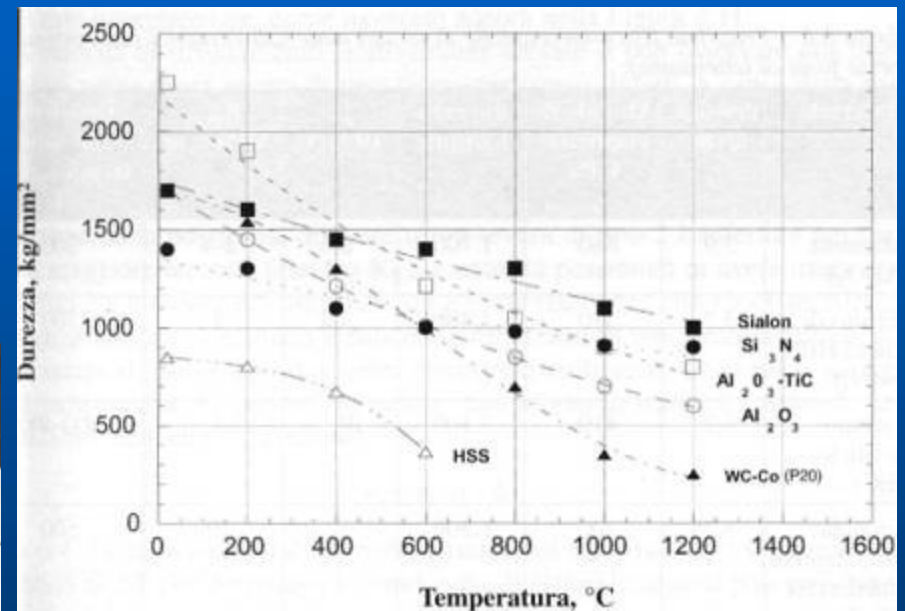
I materiali ceramici avanzati

Allumina, nitruri e carburi di silicio, zirconia,...

Elevata **durezza**, **inerzia chimica** in ambienti aggressivi

Bassa tenacità a frattura

Materiale	densità, g/cm ³	Modulo di elasticità, GPa	durezza kg/mm ²	β , 10 ⁻⁴ , °C	K_{IC} , MPa $\cdot\sqrt{m}$	Resistenza allo shock termico, ΔT_c , °C
Allumina (Al ₂ O ₃)	3,9	380	1.700	8,5	2-4	200
Nitrato di silicio HIP (Si ₃ N ₄)	3,2	310	1.400	3,8	4	700
Carburo di silicio (SiC)	3,2	410	3.100	10	4	300-400
Zirconia Parzialmente Stabilizzata (PS ZrO ₂)	5,78	200	1.300		10	500
Sialon (Si ₃ Al ₂ O ₃ N ₄)	3,2	300	1.430-1.850	4,4	6-7,5	510



Elevata **durezza** anche alle alte temperature

Carburi metallici sinterizzati *(metalli duri o cermet)*

Si tratta di rivestimenti ceramici con **migliorata tenacità alla frattura**, ottenuti per sinterizzazione di polveri di carburi metallici (WC, TiC e TaC) e polveri metalliche (Co, Ni)

In genere **carburi di tungsteno** in una **matrice di cobalto**

Designazione ISO	WC, %	TiC+TaC, %	Co, %	Densità, g/cm ³	Durezza kg/mm ²	Modulo di elasticità GPa
K01	92	4	4	15	1.800	630
K20	92	2	6	14,8	1.550	620
M10	84	10	6	13,1	1.700	580
M20	82	10	8	13,4	1.550	570
P10	63	28	9	10,7	1.600	530
P20	76	14	10	11,9	1.500	530

CVD: reazione chimica tra fasi gassose sulla superficie portata ad **alta T (1000 °C)**

Possibile deposizione di strati in successione, PACVD (200 °C)

PVD: possibile deposizione a **temperatura inferiore (500 °C)**

3 Tecnologie di rivestimento:

- ✓ **Evaporazione**
- ✓ **Bombardamento (Sputtering)**
- ✓ **Placcatura ionica (Ion-plating)**

Adesione rivestimento substrato favorita dalla **T di trattamento**

Principali rivestimenti

Tipo	Tecnologia prevalente	Massima temperatura di processo	Microdurezza HV 0,05 (molto variabile)	Colore del rivestimento	Carico critico* L_c, N
TiN	Ion plating	350-500 °C	2.500	Giallo-oro	70-80
TiCN	Ion plating	500 °C	3.000	Grigio-blu	60-70
CrN	Ion plating	500 °C	1.800	Grigio-argento	40-50
WC/C	sputtering	250 °C	1.000	Grigio-nero	-

*Determinato con prove di scratch.

TiN: deposizione come PVD su utensili da taglio in acciaio rapido, scarsa resistenza all'ossidazione

TiAlN: elevata durezza e buona stabilità in temperatura

TiC(N): elevata durezza, deposizione su metalli duri e base per rivestimenti multistrato

WC/C: lamelle di WC alternate a lamelle di carbonio amorfo

Il diamante

Forma allotropica del carbonio caratterizzata da **durezza elevatissima** (10.000 kg/mm²) ed **elevato modulo di elasticità** (1.000 GPa)

PCD: diamante policristallino sintetico (a livello industriale), CVD (generalmente ad alta T)

Impiegato per rivestire i metalli duri e non gli acciai rapidi!

Limitazione tecnologica: ridotta adesione tra substrato e rivestimento



Pretrattamento della superficie con attacco acido per rimuovere il Co superficiale, nel caso di deposizione su WC-Co

Il gas reattivo deve indurre la nucleazione del diamante e non della grafite!

Il diamante

Tecniche attualmente impiegate per l'accrescimento di diamante:

- CVD a filamento caldo (**HF-CVD**)
- **PA-CVD**, CVD assistito da plasma a bassa o ad alta frequenza
 - Plasma Jet a corrente continua (**DC-PJ**)
 - Tecnica della **fiamma** o della **torcia**
- Deposizione assistita da **fascio ionico** o da **laser**

Tecnologia dei **super-reticoli**: rivestimenti **nanostrutturati**



Ripetizione di strati di materiali simili con spessore ridotto (2 – 10 nm)

Nei rivestimenti in genere problemi delle **tensioni residue**

Intrinseche

Da variazioni di volume durante accrescimento

Termiche

Differenti coefficienti di espansione termica tra substrato e rivestimento

Possibile scagliatura o frammentazione del rivestimento in esercizio se bassa adesione tra rivestimento e substrato!

3. I rivestimenti spessi

2 Metodologie:

PER SPRUZZATURA TERMICA

PER SALDATURA

Differente legame tra **rivestimento** e **substrato**

SPRUZZATURA TERMICA: materiale fuso in una torcia e proiettato sul substrato, goccioline di forma lamellare che solidificano

CARATTERISTICHE: **bassa adesione** tra rivestimento e substrato data la bassa temperatura di trattamento, **porosità residua**, **ossidi**, **elevata rugosità**, spessori minimi dell'ordine dei decimi di mm

Possibile deposizione di qualsiasi materiale

Poco impiegati nel caso di fatica superficiale per la struttura lamellare e la difettosità!

RIVESTIMENTI PER SALDATURA: realizzata mediante una qualsiasi tecnica di saldatura

CARATTERISTICHE: spessori fino a **5 mm**, legame interfacciale forte

ESEMPI DI APPLICAZIONI:

Depositi di leghe a base nichel (**Ni-Cr-B**), strisciamento a elevata temperatura

Depositi di **stelliti (Co-Cr-W)**, strisciamento o abrasione con bassi sforzi di contatto in ambienti ad alta temperatura

Criteri di scelta

Occorre innanzitutto classificare il **processo di usura** (strisciamento, rotolamento, strisciamento-rotolamento, abrasione, fretting, erosione,...)



MECCANISMI DI USURA (adesiva, tribossidativa, abrasiva, fatica superficiale)

Natura del contatto (conforme o non conforme)

Campo degli sforzi (bassi o alti sforzi)

Presenza e regime di lubrificazione (se presente)



Scelta del trattamento superficiale



Sistemi tribologici e meccanismi di usura riscontrabili

Strisciamento				
Sistema tribologico	Adesione	Corrosione	Abrasione	Fatica superficiale
Cuscinetti radenti (lubrificazione fluida)		+	(++)	++
(lubrificazione limite)	++	+		++
Camma-Punteria	++	+	(+)	+
Utensili per lavorazione	++	+	(+)	+
Strisciamento - Rotolamento				
Sistema tribologico	Adesione	Corrosione	Abrasione	Fatica superficiale
Ingranaggi	++	+	(+)	++
Ruota-rotaila	+	+	(+)	++
Cuscinetti volventi	+	+	(+)	++
Cilindri di laminazione	+	+	(+)	++
Abrasione				
Sistema tribologico	Adesione	Corrosione	Abrasione	Fatica superficiale
Estrusori	+	+	++	
Sistemi idraulici sporchi	+	+	++	
Molini di macinazione	+	+	++	

Legenda:

++ = principalmente

+ = parzialmente

(+) e (++) = dove è presente un agente abrasivo



Conclusioni

Meccanismo di usura	Materiale ottimale	Trattamento superficiale ottimale
Adesione/ tribo-ossidazione	<ul style="list-style-type: none"> – Metalli duri vs. metalli duri – Acciai per utensili vs. acciai per utensili – Contro acciai ad alta resistenza: Materiali ceramici, compositi a matrice polimerica, bronzi, ghise. 	<ul style="list-style-type: none"> – Rivestimenti spessi per spruzzatura o saldatura (es. WC-Co e leghe Ni-Cr-B) – Rivestimenti sottili (es. TiN) – Rivestimenti metallici (es. Cr duro) – Trattamenti di diffusione (es. cementazione, nitrurazione) – Tempra superficiale
Fatica superficiale con lubrificazione fluida	<ul style="list-style-type: none"> – Acciai per cuscinetti – Acciai martensitici ad alta resistenza 	<ul style="list-style-type: none"> – Trattamenti di diffusione (es. cementazione, nitrurazione) – Tempra superficiale – Rivestimenti spessi per saldatura
Fatica superficiale con lubrificazione mista o limite	<ul style="list-style-type: none"> – Metalli duri – Acciai per cuscinetti – Contro acciai ad alta resistenza: Bronzi, ghise. 	<ul style="list-style-type: none"> – Trattamenti di diffusione (es. cementazione, nitrurazione) – Tempra superficiale – Rivestimenti spessi per saldatura – Fosfatazione – Cromo duro
Abrasione con bassi sforzi di contatto	<ul style="list-style-type: none"> – Metalli duri – Materiali ceramici – Ghisa bianca – Acciai per utensili (es. AISI D2) – Accia martensitici al Cr – Acciai al Mn – elastomeri 	<ul style="list-style-type: none"> – Rivestimenti spessi per spruzzatura o saldatura (es. WC-Co) – Rivestimenti sottili (es: TiN) – Rivestimenti metallici (es. cromo duro) – Trattamenti di diffusione (es. cementazione, nitrurazione) – Tempra superficiale – Anodizzazione (nel caso delle leghe di Alluminio)
Abrasione con elevati sforzi di contatto	<ul style="list-style-type: none"> – Metalli duri – Ghisa bianca – Acciai per utensili – Acciai martensitici al Cr – Acciai al Mn e HSLA 	<ul style="list-style-type: none"> – Rivestimenti spessi per saldatura – Tempra superficiale