



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA

TESI DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA
ANNO ACCADEMICO 2010 – 2011

**PISTONI PER MOTORI ENDOTERMICI
IN MATERIALE CERAMICO**

Relatore: Ing. ENRICO BERNARDO

Laureando: MATTEO POVOLO

Indice

Argomenti	Pag.
- <u>Introduzione</u>	<u>5</u>
- <u>Materiali ceramici</u>	<u>7</u>
<u>Definizione</u>	<u>7</u>
<u>Classificazione secondo legame chimico prevalente</u>	<u>7</u>
<u>Classificazione secondocomposizione molecolare</u>	<u>10</u>
<u>Classificazione secondo prestazioni e purezza degli elementi</u>	<u>10</u>
- <u>Motori a combustione interna alternativi</u>	<u>13</u>
<u>Principio di funzionamento</u>	<u>13</u>
- <u>Pistoni per motori endotermici</u>	<u>17</u>
<u>In lega di alluminio</u>	<u>18</u>
<u>In matrice di alluminio rinforzati con particelle ceramiche</u>	<u>20</u>
<u>In lega di alluminio con rivestimento ceramico</u>	<u>22</u>
- <u>Pistoni in materiale ceramico</u>	<u>31</u>
<u>Vantaggi di un pistone in materiale ceramico</u>	<u>31</u>
<u>Aspetti termici e meccanici</u>	<u>33</u>
<u>Caratteristiche richieste dal materiale per pistoni</u>	<u>38</u>
<u>Scelta del materiale</u>	<u>39</u>
<u>Produzione</u>	<u>48</u>
<u>Aspetti economici</u>	<u>49</u>
- <u>Conclusioni</u>	<u>51</u>
- <u>Bibliografia</u>	<u>53</u>

Introduzione

Il continuo sviluppo di nuove soluzioni ingegneristiche, che trovano riscontro pratico in numerosi campi, dall'ambito industriale a quello sportivo, da quello aeronautico fino all'automotive, richiedono la conoscenza e la padronanza dei materiali, soprattutto in fase di progettazione .

La grande varietà di materiali disponibili oggi sul mercato offrono all'ingegnere ampia possibilità di scelta per lo sviluppo di nuovi componenti. Tuttavia le numerose variabili, che intervengono nella scelta del materiale, rendono la scelta stessa parte fondamentale e indispensabile per l'ottimizzazione del prodotto (per esempio la capacità di un componente meccanico di soddisfare requisiti strutturali, termici, chimici ecc.) nonché fattore chiave per la competitività economica e il buon inserimento nel mercato. In sostanza la progettazione efficace di nuovi componenti meccanici passa per una buona conoscenza, gestione intelligente e scelta dei materiali più appropriati da parte dell'ingegnere.

Le nuove tecnologie di produzione e miglioramento dei materiali hanno consentito, negli ultimi decenni, l'impiego di materiali innovativi (come per esempio i ceramici e i materiali polimerici) anche in applicazioni per le quali tradizionalmente si sono sempre impiegati materiali metallici, per le loro ottime proprietà di colabilità, lavorabilità e per la possibilità di ottenere prodotti finiti con buona resistenza meccanica, all'usura, termica e buone tolleranze dimensionali. Occorre di volta in volta effettuare una accurata valutazione della convenienza o meno di operare la sostituzione di taluni componenti in materiali metallici con componenti, per esempio, in ceramico. Tale convenienza va valutata non solo in termini di miglioramento delle prestazioni, ma anche in termini economici, fattore di primaria importanza per la commerciabilità del prodotto. Pertanto è indispensabile conoscere non solo il materiale ma anche l'onerosità del ciclo tecnologico, compatibile con esso, necessario per l'ottenimento del componente finito.

La trattazione in oggetto si propone, nello specifico, di analizzare la possibilità di sostituire i pistoni per motori endotermici, realizzati con materiali tradizionali (quali l'alluminio o leghe d'alluminio, soluzione più diffusa, oppure l'acciaio e la ghisa, decisamente poco usati) con stantuffi in materiale ceramico, e mettere in evidenza vantaggi e svantaggi di tale possibile scelta .

Materiali ceramici

DEFINIZIONE

Si definisce materiale ceramico qualsiasi solido inorganico non metallico, caratterizzato da elevata durezza, fragilità e stabilità chimica, ottenuto con processi ad alta temperatura.

È possibile dividere i materiali ceramici in 5 categorie:

- **Ceramici naturali** (minerali, rocce, ghiaccio)
- **Ceramici tradizionali** (laterizi, piastrelle, refrattari ecc.)
- **Vetri**
- **Ceramici cementizi** (Portland, ghiaia, calce ecc.)
- **Ceramici ingegneristici** (per applicazioni strutturali, come utensili, stantuffi per cilindri idraulici, palette per turbine a gas ecc. o per applicazioni funzionali, come dielettrici, semiconduttori ecc.)

Più in generale è possibile classificare i ceramici secondo diversi criteri. I principali criteri di classificazione sono riportati in seguito.

CLASSIFICAZIONE SECONDO LEGAME CHIMICO PREVALENTE

I ceramici si dividono in *ceramici ionici* (più precisamente a legame prevalentemente ionico) e *ceramici covalenti* (più precisamente a legame prevalentemente covalente).

Legame Ionico

Il legame ionico è presente quando un atomo ha n elettroni in più per la stabilità e un altro atomo ha n elettroni in meno; accade che quello con n elettroni in più cede n elettroni (diventando catione) a quello che ne ha n in meno (che diventa anione).

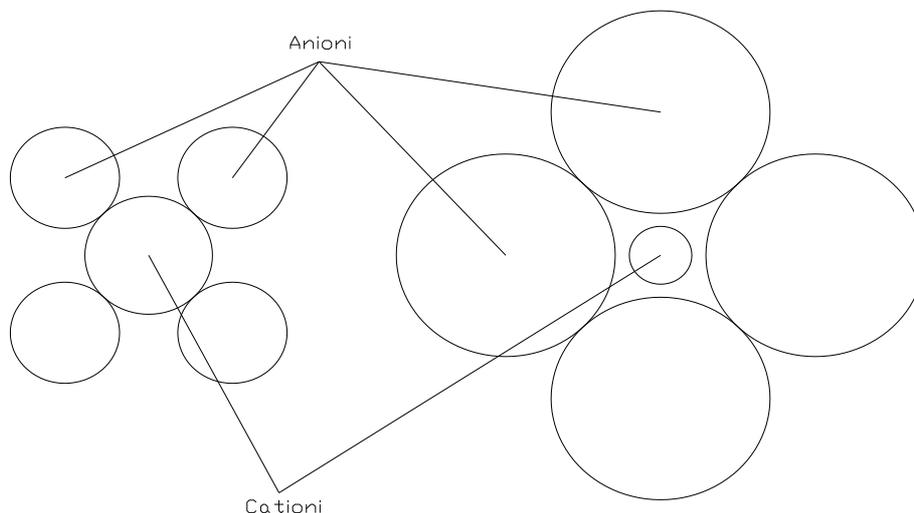
Quando si forma il legame ionico tra gli atomi allo stato solido, le energie degli atomi diminuiscono a causa della formazione degli ioni e del legame tra loro per formare un solido ionico. I solidi ionici tendono ad assumere una disposizione dei loro ioni più compatta possibile per ridurre al minimo l'energia globale del solido. I limiti dell'ottenimento di una struttura densa sono le dimensioni relative degli ioni e la necessità di mantenere la neutralità della carica.

I cationi sono normalmente più piccoli degli anioni con cui si legano, pertanto i cationi tendono a restare al centro.

Il numero di anioni che circondano un catione centrale in un solido ionico viene chiamato numero di coordinazione (NC) e corrisponde al numero di atomi adiacenti che circondano un catione centrale. Per ottenere una struttura stabile, il maggior numero di anioni deve circondare il catione centrale. Tuttavia, gli anioni devono entrare in contatto con il catione centrale e deve essere mantenuta la neutralità di carica.

Se il catione non tocca gli anioni che lo circondano la struttura tende ad essere instabile.

La figura seguente schematizza una configurazione a legame ionico stabile (a sinistra) e una a legame ionico instabile (a destra):



Il rapporto del raggio del catione centrale con quello degli anioni che lo circondano si chiama rapporto tra i raggi ionici = $r_{\text{catione}}/r_{\text{anioni}}$.

Quando gli anioni si toccano l'uno con l'altro ed entrano in contatto con il catione centrale, il rapporto tra i raggi viene chiamato rapporto tra i raggi ionici critico (minimo).

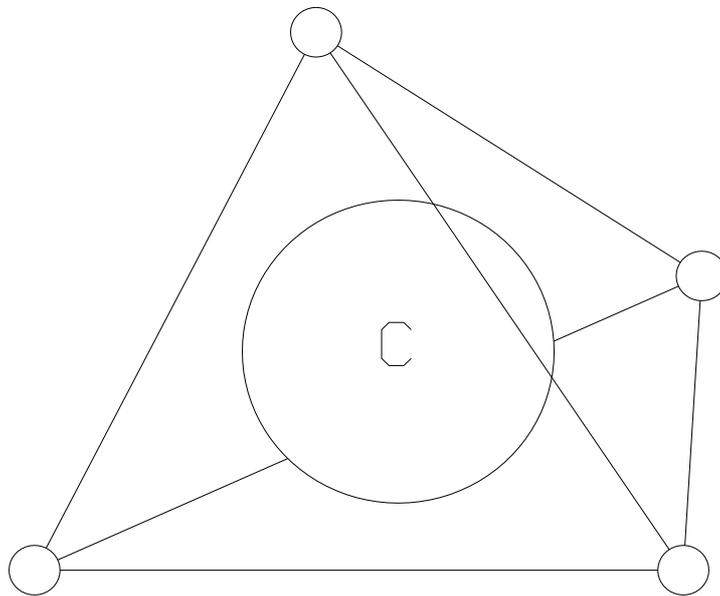
Esempi di legame ionico sono BN (NC=3), CaF₂ e ZrO₂ cubica (NC=4), NaCl (NC=6).

Legame Covalente

Nel caso del legame covalente accade che due atomi mettono in comune n elettroni.

L'esempio più chiaro e conosciuto di legame covalente è il diamante, che dispone di collegamenti di atomi di carbonio in coordinazione tetraedrica con altri atomi uguali.

Gli elettroni di legame del carbonio, nel diamante, si collocano negli spigoli di una piramide a base triangolare, con l'atomo di C al centro della stessa, come in figura:



CLASSIFICAZIONE SECONDO COMPOSIZIONE MOLECOLARE

Secondo questa classificazione è possibile distinguere 5 categorie:

- Ossidi (SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 , MgO , BaTiO_3)
- Nitruri (Si_3N_4)
- Carburi (B_4C , WC , TiC , SiC)
- Fluoruri (CaF_2)
- $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$: idrossiapatite
- Argille ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ caolino)

CLASSIFICAZIONE SECONDO PRESTAZIONI E PUREZZA DEGLI ELEMENTI

Secondo questa classificazione emergono due grandi categorie. I ceramici tradizionali e i ceramici avanzati.

- **Ceramici tradizionali:** Tipicamente sono costituiti da tre componenti: argilla, silice e feldspato. Esempi di materiali ceramici tradizionali sono i mattoni, le tegole e la porcellana .
- **Ceramici avanzati:** Tipicamente formati da composti puri o quasi. Esempi di impiego dei materiali ceramici avanzati sono cuscinetti a sfera in Zirconia o Carburo di silicio oppure miscelatori per liquidi corrosivi in SiAlON

I ceramici tradizionali

I materiali ceramici tradizionali sono i più diffusi e meno costosi e vengono realizzati, come già detto, con l'apporto di tre componenti base: l'argilla, la silice e il feldspato.

L'argilla è costituita principalmente da allumino-silicati idrati ($\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$) con piccole quantità di ossidi come TiO_2 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O e K_2O . Nei materiali ceramici tradizionali la matrice è l'argilla, la quale conferisce lavorabilità al materiale prima che indurisca durante la cottura. La silice (SiO_2), o anche selce o quarzo, ha una elevata temperatura di fusione ed è il componente refrattario dei materiali ceramici tradizionali. Il feldspato di potassio, che ha una composizione di base $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$, ha una bassa temperatura di fusione e, durante la cottura

della miscela ceramica, produce una fase vetrosa che lega i componenti refrattari. I prodotti strutturali di argilla quali mattoni da costruzione, tubazioni fognarie, tegole e piastrelle sono prodotti con argilla naturale che contiene tutti i tre componenti base. Le porcellane bianche, come la porcellana per impieghi elettrici e quella per elementi sanitari, sono ottenute da materie prime di argilla, silice e feldspato di composizione controllata.

I ceramici avanzati

I materiali ceramici avanzati sono tipicamente formati da composti puri o quasi puri quali l'ossido di alluminio (Al_2O_3), il carburo di silicio (SiC) e il nitrato di silicio (Si_3N_4). Necessitano di processi produttivi molto più accurati e pertanto sono di norma molto più costosi.

Vengono impiegati per applicazioni meccaniche (e non solo) di rilievo, soprattutto quando sono richieste elevate proprietà di durezza, resistenza alle alte temperature nonché di resistenza all'usura e allo strisciamento.

Allumina(Al_2O_3)

L'allumina è stata sviluppata originariamente per tubazioni refrattarie e crogioli di elevata purezza per impieghi ad alta temperatura e ora trova molte applicazioni.

Ha ottime proprietà di resistenza meccanica, all'usura e alla corrosione e ha basso coefficiente d'attrito allo strisciamento.

Un classico esempio di applicazione dell'allumina è il materiale isolante delle candele delle automobili; l'ossido di alluminio viene drogato con ossido di magnesio, pressato a caldo e sinterizzato per ottenere la tipica microstruttura della porcellana elettrica. La maggiore uniformità della struttura di allumina, rispetto a quella della porcellana, fa sì che l' Al_2O_3 venga utilizzato in applicazioni elettriche di alta qualità, per le quali sono richieste una bassa perdita dielettrica e un'alta resistività.

L'allumina trova vasta applicazione in campo prettamente meccanico come, ad esempio, per la costruzione di cuscinetti, segmenti per sistemi idraulici e utensili da taglio.

L'allumina monocristallina è trasparente e può essere utilizzata per la produzione di lampade.



Zirconia (ZrO₂)

La zirconia pura è polimorfa e presenta tre strutture cristalline :

- monoclina fino a 1150 °C
- tetragonale da 1150 °C fino a 2200 °C
- cubica da 2200 °C fino a 2715 °C, temperatura di fusione

Il passaggio da tetragonale a monoclina avviene con un'espansione in volume che va dai 3 al 5 %.

Essa rappresenta il migliore materiale ingegneristico a base di ossidi, e ha proprietà molto interessanti in campo meccanico, come ad esempio l'elevata resistenza meccanica ad alte temperature e l'elevato punto di fusione. L'aggiunta di altri ossidi e la conseguente formazione di soluzioni solide permette di ampliare i campi di stabilità termica delle strutture tetragonale e cubica.



Carburo di silicio (SiC)

Il carburo di silicio è un carburo duro e refrattario con una eccellente resistenza all'ossidazione a elevata temperatura. Sebbene non sia un ossido, il SiC a temperatura elevata forma un rivestimento di SiO₂ che protegge la massa interna del materiale. Il SiC può essere sinterizzato a 2100°C con l'aggiunta di 0,5-1% di B per favorire la sinterizzazione. Il SiC è comunemente usato come fibra di rinforzo per materiali compositi a matrice metallica e ceramica.



Nitruro di silicio (Si₃N₄)

Fra tutti i materiali ceramici avanzati, il nitruro di silicio ha probabilmente la migliore combinazione delle proprietà di interesse tecnologico. Questo composto si dissocia significativamente solo a temperature superiori a 1800°C, e quindi non può essere sinterizzato direttamente. Può essere, invece, ottenuto mediante un particolare processo in cui della polvere di silicio compattata viene nitrurata in un flusso gassoso di azoto. Questo processo produce Si₃N₄ microporoso di moderata resistenza. Un Si₃N₄ non poroso di più elevata resistenza viene ottenuto mediante pressatura a caldo con l'aggiunta di 1-5% di MgO. Il nitruro di silicio è in fase di studio per l'impiego in componenti di motori avanzati.



Motori a combustione interna alternativi

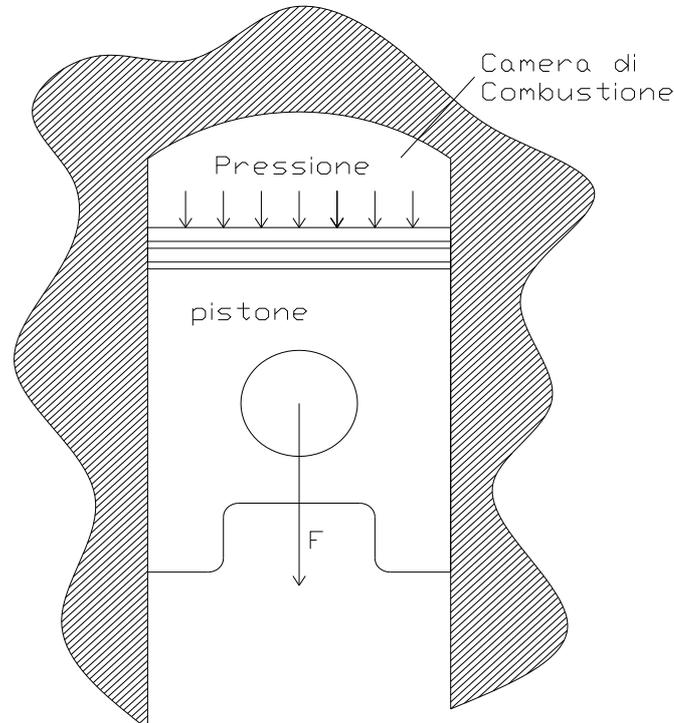
PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

I motori endotermici alternativi sono macchine la cui funzione principale è la trasformazione di energia chimica, contenuta nel carburante, in energia meccanica, grazie a un processo chimico di combustione.

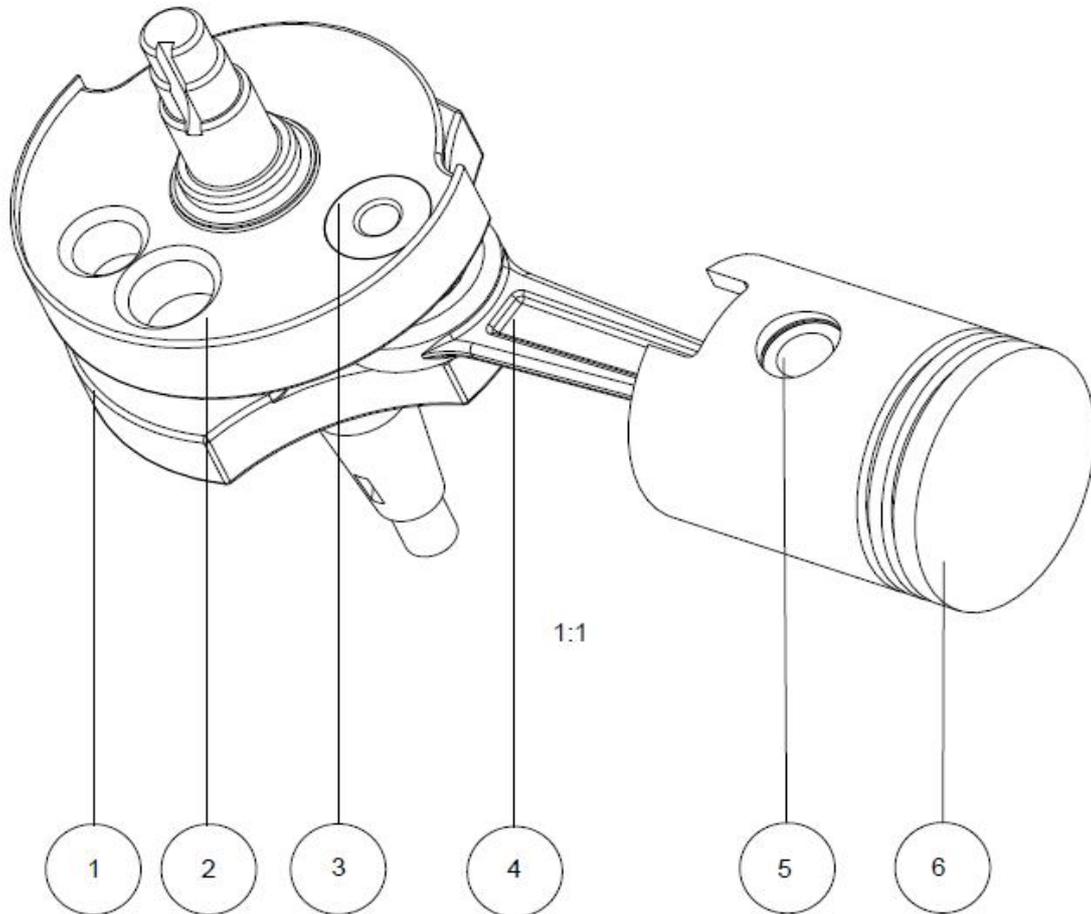
La reazione di ossido riduzione che genera la combustione sviluppa energia sotto forma di luce, calore, e soprattutto espansione volumetrica ($Lavoro = \int Pressione dVolume$).

Nei motori a combustione interna la luce e il calore prodotti sono fenomeni indesiderati, non solo per il fatto che “bruciano” buona parte dell’energia chimica contenuta nel carburante, ma soprattutto perché questa energia deve essere smaltita dal sistema senza causare danni eventuali per effetto di un eccessivo innalzamento della temperatura.

La conversione dell’energia chimica in energia meccanica avviene in una *camera di combustione*, all’interno della quale l’espansione dei gas provoca un aumento di pressione che spinge verso il basso uno *Stantuffo*, anche chiamato *Pistone*, come schematizzato nella figura seguente:

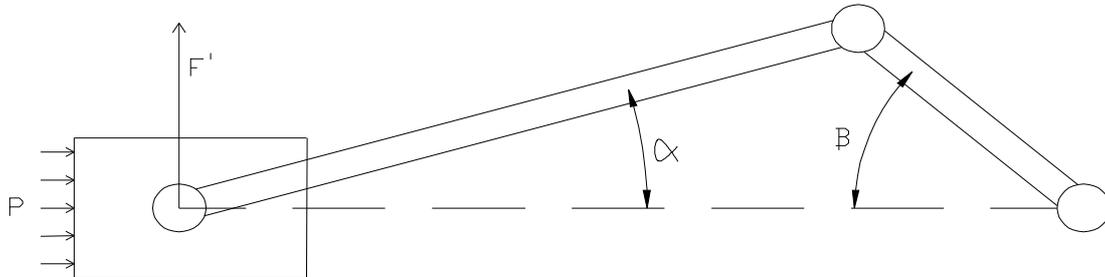


L'energia meccanica ottenuta all'albero motore è sviluppata grazie a un meccanismo denominato biella-manovella, rappresentato in figura (albero-biella-pistone del motore Piaggio Vespa 125 Primavera) :



La pressione esercitata sul pistone (6) genera una forza F sul perno (5), il quale grazie a un accoppiamento rotoidale a cuscinetto ne trasmette la componente efficace alla biella (4).
La biella mette in rotazione l'albero motore trasmettendo componente di F sul perno di banco (3) che, essendo collocato a una certa distanza $C/2$ dall'asse di rotazione dell'albero stesso, genera una coppia che produce potenza meccanica.

In particolare se si indica con P la Pressione istantanea, F la forza, D l'alesaggio, C la corsa, M la coppia istantanea, ω la velocità angolare dell'albero e P_t la potenza istantanea all'albero, con riferimento alla seguente figura si ottiene:



$$F = P \times \frac{D^2 \pi}{4}$$

$$M = \frac{F}{\cos \alpha} \times \cos \beta \times \frac{C}{2}$$

$$P_t = M \times \omega$$

Da notare il fatto che la potenza appena ricavata è teorica, in quanto la presenza di attriti contribuisce a perdite meccaniche.

Un esempio evidente è la componente di F perpendicolare all'asse del pistone, infatti indicativamente si ha che :

$$F' = F \times \operatorname{tg} \alpha$$

$$F_{\text{attrito}} = F' \times \mu_d$$

$$P_t \text{ persa} = F_{\text{attrito}} \times v$$

dove μ_d è il coefficiente di attrito dinamico tra pistone e cilindro e v è la velocità del pistone. In realtà il fenomeno è molto più complesso, considerando il fatto che v non è costante nel tempo (moto alternativo) e il coefficiente d'attrito μ_d è funzione della velocità del pistone e del tipo di lubrificante, nonché della temperatura di esercizio.

Pistoni per motori endotermici

Nei motori a combustione interna l'elemento pistone è un organo meccanico fortemente sollecitato, in quanto soggetto a :

- elevate forze statiche, inerziali e pressioni (fino a 65 bar nei motori a benzina e fino a 150 bar nei motori diesel).
- fatica meccanica (si può arrivare a regimi di rotazione di 15000 / 20000 RPM per motori di media cilindrata e anche 30000 / 35000 giri per motori di piccolissima cindrata, ad esempio nei motori per aereoplani telecomandati con cilindrata 3.5 cm³).
- shock termici elevati (temperatura di combustione teorica di benzina o gasolio = 2420 °C)
- temperature di utilizzo alte

Le funzioni essenziali di un pistone sono tre:

- trasmissione della potenza: il pistone è il primo anello della catena che trasmette la potenza generata dalla combustione, trasformando l'energia termica in energia meccanica attraverso la biella e l'albero motore.
- la tenuta. I segmenti sigillano ermeticamente la parete del cilindro, impedendo anche che l'olio possa giungere fino alla camera di combustione venendo bruciato; al contempo, attraverso il pistone e i segmenti il calore derivante dalla combustione viene trasferito al blocco dei cilindri, e quindi al liquido refrigerante.
- rendere possibile il pompaggio, ovvero l'aspirazione, la compressione e l'espulsione dal cilindro dei gas di scarico combusti.

Da sempre i materiali maggiormente utilizzati per la produzione dei pistoni sono l'alluminio, l'acciaio e la ghisa. I pistoni moderni utilizzati in automotive e per motori da competizione sono prodotti quasi esclusivamente con leghe di alluminio. E' possibile comunque effettuare una classificazione dei pistoni secondo il materiale con il quale sono costruiti:

- Pistoni in acciaio e ghisa, utilizzati solo per motori diesel lenti (trascurati in questa trattazione)
- Pistoni in lega di alluminio
- Pistoni in matrice d'alluminio rinforzati con particelle ceramiche
- Pistoni in lega di alluminio con rivestimento in ceramico
- Pistoni in ceramico

PISTONI IN LEGA DI ALLUMINIO

Le leghe di alluminio, dette anche leghe leggere, sono leghe ottenute principalmente con la combinazione tra alluminio e rame, zinco, manganese, silicio, o magnesio. Le principali caratteristiche di queste leghe sono:

- bassa densità: il loro peso specifico è uno dei più bassi fra tutti i materiali strutturali (2,7 g/cm³ contro i 7,9 g/cm³ dell'acciaio)
- elevata duttilità a causa della loro struttura cristallina cubica a facce centrate; grazie a questa proprietà è possibile realizzare fogli sottilissimi di alluminio. Anche a basse temperature, per la loro struttura cristallina, le leghe di alluminio si mantengono duttili.
- elevata conduttività termica ed elettrica: questa caratteristica rende alcune leghe di alluminio adatte alla realizzazione di pentole da cucina, o materiale elettrico.
- basso punto di fusione (ca. 660 °C): la temperatura di fusione limita le applicazioni strutturali dell'alluminio a temperature d'esercizio massime di 200-300 °C (300 °C per leghe appositamente studiate).
- resistenza a corrosione in ambiente atmosferico: le leghe leggere resistono bene alla corrosione generalizzata, ma soffrono di alcuni altri tipi di corrosione, e per questo vengono trattate con procedimenti come l'anodizzazione o l'applicazione di vernice protettiva (primer). Se non trattata in maniera particolare, la superficie di un oggetto in lega d'alluminio appare lucida, essendo assenti fenomeni di corrosione generalizzata, a differenza degli acciai ferritici. Le leghe di alluminio possono sviluppare rapidi fenomeni di corrosione galvanica se poste a contatto con l'acciaio inossidabile o con il titanio e le sue leghe.

In funzione dell'utilizzo sono state sviluppate tre famiglie di leghe di alluminio, che differiscono tra loro principalmente per il contenuto di silicio:

- la Ipoeutettica, dove il silicio in particelle viene mescolato all'alluminio in una percentuale inferiore al 9%
- la Eutettica, (silicio dall'11% al 13%)
- la Ipereutettica (silicio tra il 13% e il 25%), che comporta caratteristiche meccaniche elevate ma difficoltà di fusione e di lavorazione.

Composizione dei pistoni in lega leggera

Per i pistoni in lega di alluminio viene comunemente utilizzata una lega con elementi che possono essere silicio, rame e magnesio.

Le pareti del pistone sono spesso trattate superficialmente, per due motivi:

- migliorare le caratteristiche di adattamento del pistone (in questo caso il trattamento scompare gradualmente dopo il rodaggio)
- accrescere le caratteristiche antifrizione.

Le leghe d'alluminio maggiormente utilizzate per questa applicazione sono la **2618** e la **4032**.

La **2618** è la più usata ed è una lega P-Al Cu 3,5 Fe Mg Ni con i seguenti elementi in percentuale:

Cu	Mg	Si	Fe	Ni	Ti	Al
3.5	1,85	0,2	1,07	1,05	0,07	resto

La **4032** è una lega P-Al Si 12 Mg Cu Ni con il 12 % di silicio e Mg Cu Ni in % minori.

I pistoni ottenuti con questo tipo di leghe, dopo aver subito una serie di lavorazioni, presentano:

- durezza da 120-145 HB per la lega 2618 e 110-135 HB per la lega 4032;
- coefficiente di dilatazione termica lineare di $24 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ per la lega 2618 e $20 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ per la lega 4032.

Produzione

Per la produzione del pistone, il metodo più usato è la fusione per colata, che consente di utilizzare lo stesso stampo per molti cicli di produzione. La pressofusione è comunemente usata per motori diesel e veicoli industriali. Un processo migliorato consiste nella fusione in uno stampo messo in rotazione al fine di ottimizzare il riempimento sfruttando la forza centrifuga.

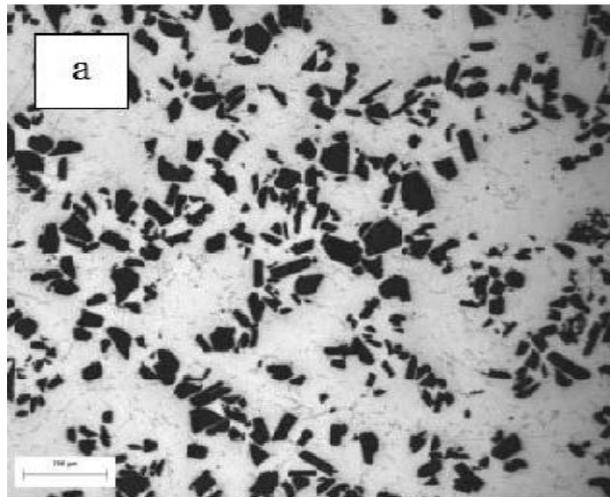
Si passa infine alle lavorazioni meccaniche per ottenere la geometria finita con tolleranze dimensionali necessarie.

Per pistoni di qualità superiore si parte da una barra estrusa circolare, dalla quale vengono tagliate le "billette" (cilindri) del peso uguale a quello del pistone grezzo. Le billette subiscono un processo di forgiatura isoterma ad alta temperatura, mediante presse idrauliche. Si genera così il grezzo da lavorare che sarà sottoposto ad un trattamento termico di tempra.

Due i metodi possibili:

- nel primo i grezzi vengono raffreddati a temperatura ambiente, poi inseriti in un forno a $515 \text{ } ^\circ\text{C}$ per 4 ore e infine immersi in acqua bollente che li raffredda rapidamente.
- Nel secondo metodo, più economico e che riguarda circa l'80% dei pistoni prodotti, il grezzo viene immediatamente sottoposto ad un forte getto d'aria, raffreddandolo abbastanza rapidamente da impedire la formazione di precipitati e consolidare magnesio e rame in una forma stabile. Dopo questa fase i grezzi vengono sottoposti al processo di "invecchiamento" (4 ore a $220 \text{ } ^\circ\text{C}$), che consente la formazione di precipitati di rame e magnesio finemente dispersi nell'alluminio. Essi costituiscono meccanismo di rafforzamento, in quanto rappresentano un ostacolo alla propagazione delle dislocazioni.

Nell'immagine al microscopio si notano i precipitati a bordo grano di una lega P-Al Cu 3,5 Fe Mg Ni (2618).



Il grezzo subirà un processo di pulizia tramite pallinatura, che rafforza la superficie per deformazione plastica.

Il pistone grezzo è pronto per la lavorazione: viene fresato su centri di lavoro dedicati e successivamente tornito per creare le gole che accoglieranno i segmenti (fasce elastiche) . L'ultima operazione meccanica è quella di alesatura del foro spinotto.

Infine, il processo di sbavatura manuale consente di arrotondare tutti gli spigoli resi taglienti dalle lavorazioni meccaniche precedenti.

Al termine di ogni operazione meccanica il pistone è controllato al fine di verificarne l'esattezza delle quote essenziali.

Nell'immagine esempio di pistone in lega leggera con fasce elastiche e spinotto in acciaio:



PISTONI IN MATRICE DI ALLUMINIO RINFORZATI CON PARTICELLE CERAMICHE

I compositi a matrice in lega di alluminio e rinforzo ceramico, essendo caratterizzati da combinazioni particolarmente favorevoli di rigidità e resistenza meccanica, stabilità termica e resistenza ad usura, consentono di ampliare i campi di applicazione delle rispettive leghe non rinforzate.

Numerosi studi hanno dimostrato che tali compositi sono caratterizzati da un sostanziale miglioramento della resistenza ad usura, rispetto alle leghe non rinforzate, per la capacità del rinforzo di supportare i carichi applicati, limitando il danneggiamento della matrice.

La struttura matrice-rinforzo è ottenibile con la dispersione di particelle o fibre di materiale ceramico (fibre di SiC o Si₃N₄ o particelle di Al₂O₃) all'interno dell'alluminio liquido, per poi procedere a una colata per gravità, colata centrifuga o pressofusione.

Per ottenere una distribuzione controllata delle particelle/fibre di rinforzo, che avviene grazie a fenomeni legati alla capillarità e alla chimica del bagnante, si effettua uno stretto controllo dei parametri di solidificazione.

Questi processi hanno il vantaggio di poter ottenere significativi miglioramenti delle prestazioni in termini di resistenza all'usura, all'attrito (per esempio la grafite è un lubrificante solido), con conseguente miglioramento delle prestazioni e della durata del pistone.

PISTONI IN LEGA DI ALLUMINIO CON RIVESTIMENTO CERAMICO

Un ulteriore sviluppo dei pistoni classici in lega o lega rinforzata con materiali ceramici è la variante di un pistone in lega d'alluminio con opportuni rivestimenti in materiale ceramico, nelle zone dove l'esercizio è più gravoso per effetti meccanici o termici.

Le zone del pistone maggiormente sollecitate meccanicamente sono la zona di attacco dello spinotto, il cielo e il mantello, soggetto a usura per effetto della spinta laterale dovuta all'inclinazione della biella (ovvero la forza F' trattata a pag. 13).

Si è cercato quindi di operare con dei rivestimenti in materiale ceramico in quelle zone, al fine di ottenere durate maggiori e efficienze di funzionamento ottimizzate per diminuzione degli attriti.

Incremento della prestazioni per diminuzione dell'attrito Pistone-Cilindro

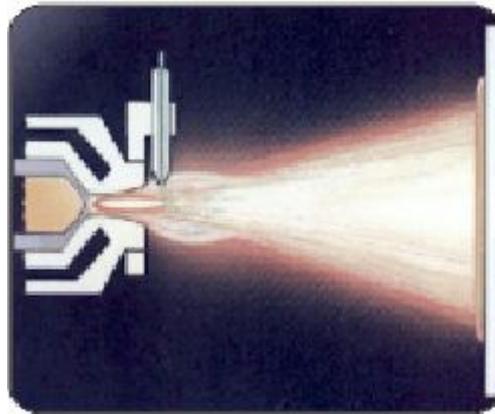
Per minimizzare gli attriti nella zona di strisciamento è possibile realizzare le superfici del mantello del pistone con degli opportuni rivestimenti ceramici, con proprietà di durezza e resistenza allo strisciamento molto più elevate delle leghe d'alluminio. Una tecnica per ottenere una strato superficiale di ceramico (allumina) consiste nell'anodizzazione.

L'anodizzazione (detta anche ossidazione anodica) è un processo elettrochimico irreversibile mediante il quale uno strato protettivo di ossido di alluminio si forma sulla superficie del particolare trattato e lo protegge dalla corrosione. Nel materiale avviene una vera e propria trasformazione superficiale: il metallo reagisce con l'ossigeno che si sviluppa all'anodo durante il processo di elettrodeposizione e forma allumina. Lo strato ceramico formato è variabile (normalmente 10 μm), ed esistono due tipi di ossidazione anodica: quella sottile, che comporta uno strato variabile dagli 8 ai 20 micron, e quella profonda, che trasforma uno strato dai 20 ai 50 micron. Per il trattamento dei pistoni viene utilizzata l'anodizzazione profonda (nell'immagine pistone trattato con anodizzazione profonda sulle superfici del mantello).

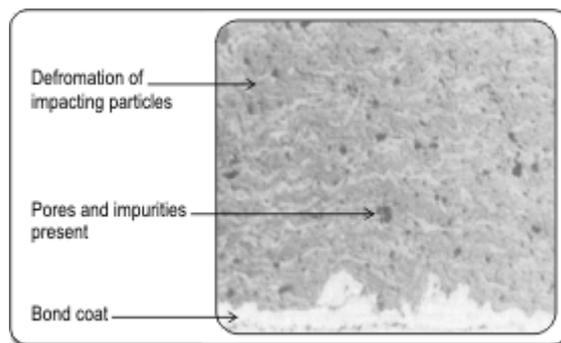


Nonostante l'allumina sia un materiale fragile, il rivestimento ottenuto ha spessore molto inferiore allo spessore totale del mantello e pertanto ricopre un ruolo meccanico esclusivamente di indurimento superficiale, pertanto antiusura e antifrizione.

Un'altra tecnica per ottenere uno strato superficiale ceramico è la *Thermal spraying*, che consiste nel sparare particelle ceramiche sulla superficie del pezzo tramite una fiamma, solitamente ossiacetilenica, che riscalda il metallo base per facilitare il legame tra rivestimento e metallo sottostante, come schematizzato in figura.



Il risultato ottenuto è un materiale base metallico con rivestimento antiusura ceramico. La seguente immagine mostra lo strato superficiale di un pezzo che ha subito il trattamento Thermal spraying.



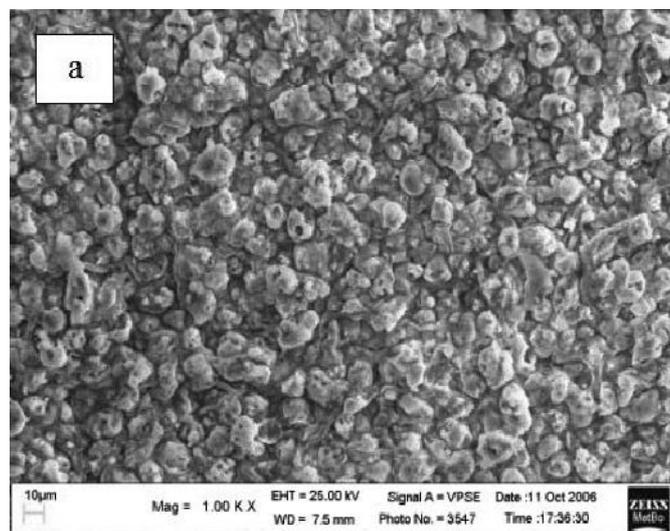
Un altro metodo molto efficace è *l'ossidazione elettrolitica al plasma*.

Con questo processo si ottiene una struttura a strati con proprietà differenti:

- strato esterno, pari al 20÷30% dello spessore trattato, caratterizzato da un'elevata rugosità e di natura porosa, tale da poter eventualmente svolgere funzione di trattenimento del lubrificante;
- strato funzionale, sostanzialmente composto da allumina, che mostra i valori più elevati di durezza, grazie alla sua struttura densa e compatta.

L'effettuazione di un trattamento di ossidazione elettrolitica al plasma consente di ottenere strati ossidati con spessori (fino a circa 100 μm).

L'immagine seguente mostra la struttura del composito ottenuto con questo processo:



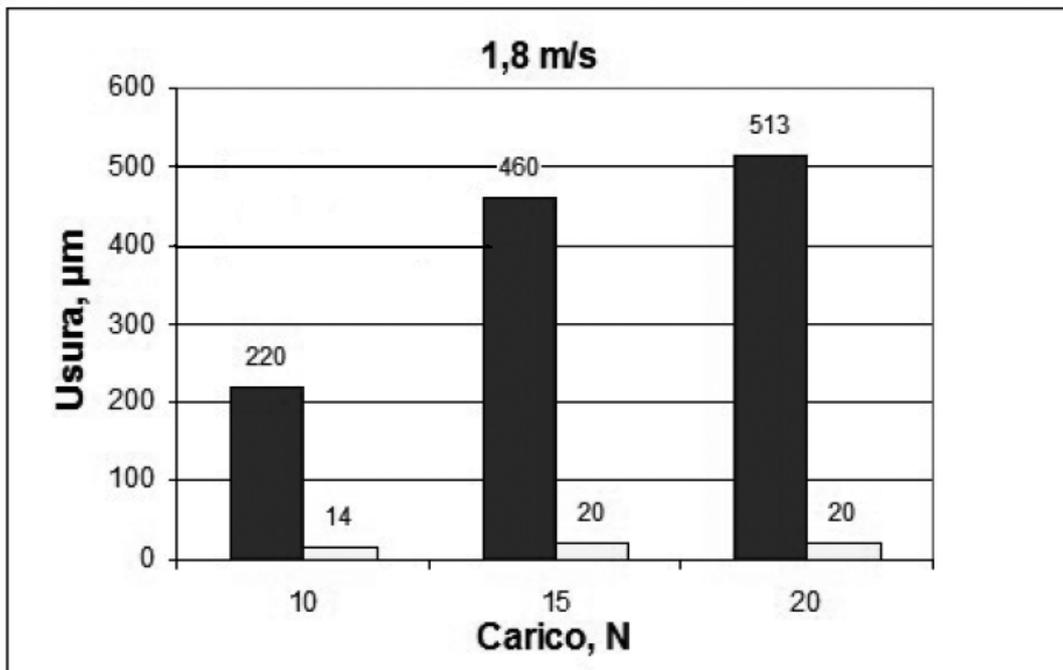
I risultati ottenuti per i pistoni rivestiti sono soddisfacenti, come mostrano i seguenti test sperimentali, che confrontano usura e coefficiente d'attrito di un pistone in lega con uno rivestito con allumina.

Le prove sono state fatte a velocità di strisciamento costante (1.8 m/sec) in atmosfera di laboratorio (18÷24 °C con umidità relativa 40÷60%), per una distanza di strisciamento di 10 km sotto un carico di 10, 15 e 20 N. Sono stati realizzati due pattini per ogni prova, uno non rivestito e uno rivestito.

Il cilindro utilizzato è stato realizzato in acciaio C 55 temprato a induzione con spessore di indurimento pari a circa 400 μm , durezza 650 HV1 e rugosità $R_a=0.15 \mu\text{m}$, con dimensioni diametro = 40mm.

Caso 1 : Pattino in lega di alluminio P-Al Cu 3,5 Fe Mg Ni (2618), nel grafico barre nere.

Caso 2 : Pattino in lega di alluminio P-Al Cu 3,5 Fe Mg Ni (2618) rivestito con strato in Al_2O_3 , nel grafico barre bianche.



Usura

Il grafico riporta la profondità delle piste d'usura al termine del test.

È evidente di come i pattini rivestiti con materiale ceramico (barre bianche) presentino un considerevole miglioramento della resistenza ad usura, soprattutto all'aumentare di carico e velocità di strisciamento. Tale risultato è da attribuire alla maggiore durezza superficiale dovuta alla presenza di allumina.

Il pattino non rivestito ha presentato un regime di usura moderata delle superfici solo a carichi bassi (10 N) e a velocità di strisciamento contenute (0,6 m/s), e aumentando sia di carico che la velocità si è giunti a un regime di usura severa, di entità crescente con la severità delle condizioni di prova.

Attrito

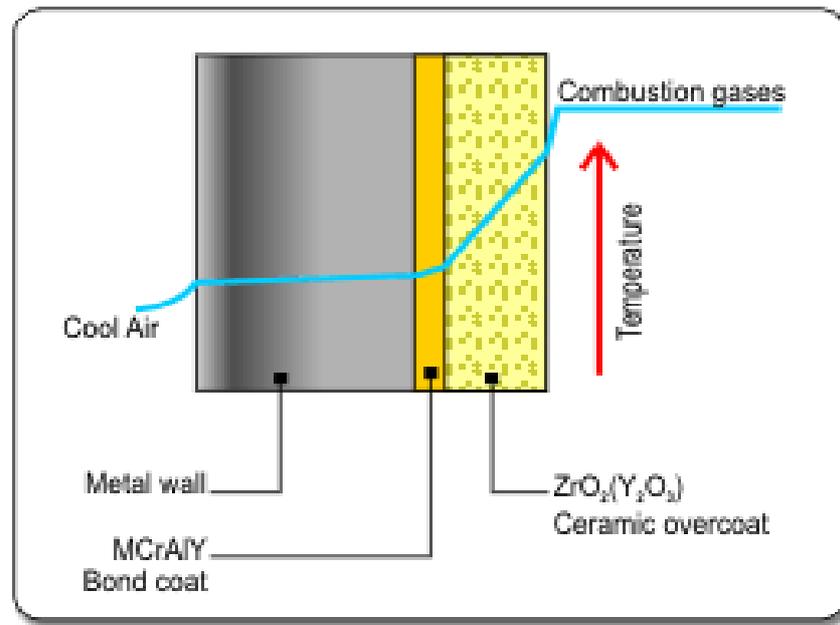
I coefficienti d'attrito son risultati abbastanza costanti nel tempo nel caso del pattino in lega con valori compresi tra $\mu=0.4$ e $\mu=0.6$

Nel caso del pattino rivestito si è verificato un coefficiente d'attrito più alto in fase iniziale, fino a circa 4000m, con punte di circa $\mu=0.9$, il quale però si è successivamente portato a valori molto più bassi superata la fase di rodaggio, di circa $\mu= 0.56$, con dispersione molto contenuta (0.56 ± 0.04).

Funzione di barriera termica protettiva del substrato

La copertura ceramica sulle pareti di un pistone può svolgere un'importante funzione di barriera termica. Nel cielo del pistone, durante la combustione della miscela aria-benzina, si possono raggiungere temperature critiche per una lega d'alluminio.

Nell'immagine seguente è rappresentato il profilo di temperatura qualitativo in un cielo pistone rivestito (con metodo ceramic sprayig) in zirconia parzialmente stabilizzata con ittrio.



È evidente di come la temperatura del metallo base resti a valori molto più contenuti, evitando così problemi dovuti alla temperatura, come ad esempio il fenomeno del creep.

Lo scudo termico però potrebbe creare un altro tipo di problemi, principalmente due:

Problema 1:

Il mantenimento di una temperatura più elevata sul cielo del pistone potrebbe portare a un eccessivo riscaldamento della testata (solitamente in alluminio) e quindi spostare il problema su di essa. È comunque da ricordare che lo stantuffo è meccanicamente molto più sollecitato della testata, in quanto mentre quest'ultima subisce carichi esclusivamente dovuti all'innalzamento della pressione durante la compressione e combustione, il pistone subisce, oltre al medesimo carico, anche carichi inerziali ed è, soprattutto, soggetto ad usura.

Problema 2 :

Il mantenimento di una temperatura più elevata sul cielo del pistone potrebbe far raggiungere, in alcune zone, la temperatura di autoaccensione del carburante. Questo problema potrebbe soprattutto riguardare i motori a ciclo otto, e quindi a benzina, nei quali l'accensione del carburante è generata da un arco elettrico scoccato dalla candela. In caso di autoaccensione nei motori a ciclo otto i danni derivanti potrebbero essere tali da compromettere in buon funzionamento dello stesso.

Se l'autoaccensione avviene molto prima dell'accensione pilotata, potrebbe verificarsi il problema del contraccolpo a regimi di rotazione bassi.

Il contraccolpo avviene quando la combustione dei gas si verifica molto prima del raggiungimento del punto morto superiore da parte del pistone. La combustione genera una pressione sul cielo dello stesso, che sta ancora salendo, spinto dall'inerzia di massa di tutti gli organi in movimento e in particolare dal volano. L'azione delle due forze contrapposte potrebbero danneggiare cuscinetti e superfici di carico (come il foro dello spinotto), e nei casi più gravi si può arrivare a sbiellaggio.

Se l'autoaccensione avviene appena prima dell'accensione della candela invece, il fronte di fiamma generato dal fenomeno di autoaccensione incontra il fronte di fiamma generato dal fenomeno dell'accensione pilotata. Quando i due fronti si incontrano si possono generare onde di pressione piuttosto elevate (detonazione), le quali possono essere in grado di danneggiare le superfici del cilindro, pistone e testa, nonché, in casi estremi, di perforare il cielo del pistone.

L'immagine mostra il cielo di un pistone perforato per detonazione.



Nei motori benzina, per ovviare a questo problema, bisognerebbe diminuire il rapporto di compressione, di conseguenza la miscela di gas freschi, durante la compressione, raggiungerebbe temperature più basse. In alternativa si potrebbero usare benzine con numero di ottano più alto, ovvero con minore tendenza all'autoaccensione.

In realtà entrambe le soluzioni sono poco convenienti. Nel primo caso, una diminuzione del rapporto di compressione porterebbe a un'eccessiva diminuzione della potenza meccanica e del rendimento (il rendimento del ciclo otto ideale η_{id} dipende dal rapporto dei volumi), nel secondo caso è evidente che il motore deve essere in grado di funzionare con benzine standard, che hanno numero di ottano di circa 90.

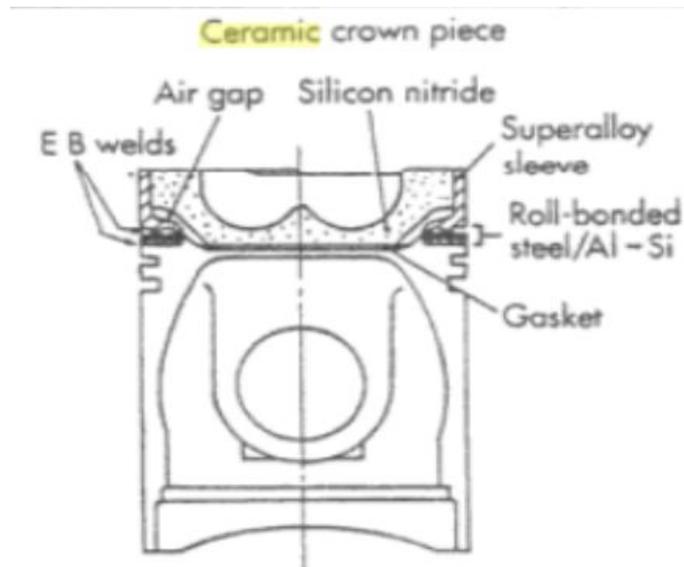
Pertanto si può concludere che questa particolare soluzione è applicabile a pistoni per motori a ciclo otto e diesel in caso di rivestimenti antiusura nei mantelli, e a motori a ciclo diesel per rivestimenti al fine di creare una barriera termica. Nell'immagine un esempio di questa applicazione (rivestimento del mantello in Zirconia).



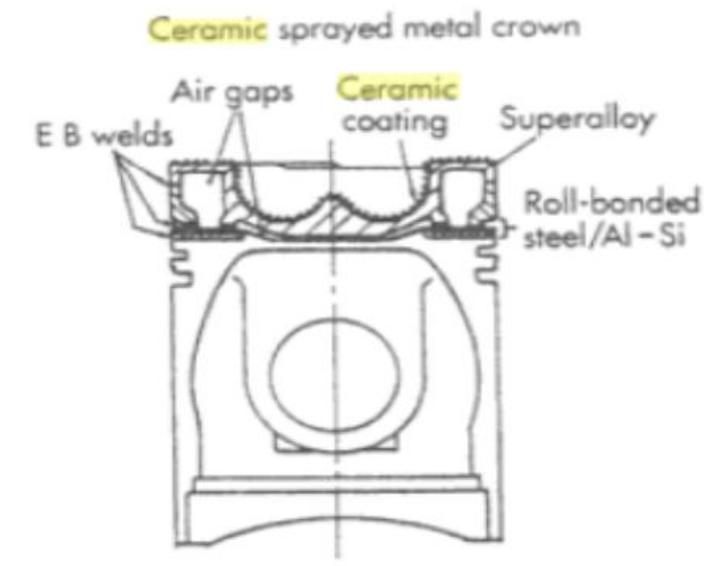
Nei pistoni per motori a ciclo diesel, infatti, questa soluzione offre vantaggi apprezzabili per quanto riguarda i rivestimenti termici.

Nelle immagini seguenti due tipi di rivestimenti del cielo dello stesso pistone.

Rivestimento massiccio del cielo del pistone in nitruro di silicio



Rivestimento in Zirconia con tecnica Ceramic spraying



Uno studio effettuato dalla *Swain Tech Coatings* su pistoni rivetiti con tecnologia TBC™ (Ceramic Thermal Barrier) ha dimostrato che, montando questi pistoni nei motori diesel CAT® per autotrasporti, si verifica un aumento della potenza e diminuzione dell'usura. Ma il dato più interessante riguarda il fattore economico.

Infatti, considerato un mezzo che percorre 100'000 Km/anno e l'attuale costo del carburante, l'incremento del rendimento e la conseguente diminuzione del fuel economy (km percorsi / litri di carburante consumati) permettono di ammortizzare la spesa iniziale di produzione dei pistoni (maggiore di quella per produrre pistoni in lega) in circa 2 mesi, con conseguente risparmio di carburante nel resto della vita dei componenti.

Nell'immagine i pistoni utilizzati per questo tipo di prove.

Si nota il rivestimento di allumina nel cielo, che svolge funzione di barriera termica, e il rivestimento di zirconia nel mantello, con funzione di indurimento superficiale, aumento della resistenza a rottura e diminuzione dell'usura.



Pistoni in materiale ceramico

I pistoni in materiale ceramico massiccio rappresentano una categoria a parte, in quanto ad oggi poco usati (tranne casi di applicazioni “prototipo”), ma tuttavia oggetto di ricerca per le proprietà interessanti che tali materiali sono in grado di garantire. In questa sede si cercheranno di riassumere i punti salienti necessari per lo sviluppo di componenti di questo tipo, con trattazione analitica e scelta dei materiali indicativa.

VANTAGGI DI UN PISTONE IN MATERIALE CERAMICO

Parametri che influenzano le prestazioni di un motore

I pistoni in materiale ceramico presentano numerosi vantaggi, dovuti quasi esclusivamente alle caratteristiche prestazionali del materiale stesso.

Per meglio comprendere quali sono i parametri che influenzano l'efficienza di una macchina termica a ciclo otto o diesel, si prenda in considerazione l'espressione analitica della potenza meccanica sviluppata all'albero di un motore a τ tempi:

$$P_m = V_c * \frac{2n}{60\tau} * \rho_{ae} * \frac{H_u}{\Delta} * \eta_v * \eta_{id} * \eta_i * \eta_{mecc} \quad \text{dove:}$$

P_m = potenza meccanica all'albero

V_c = cilindrata

n = numero di giri del motore

ρ_{ae} = densità dell'aria esterna al cilindro (a press atmosferica circa 1.2 Kg/m³)

H_u = potere calorifico combustibile (benzina o gasolio $H_u = 42000$ KJ/Kg circa)

Δ = rapporto delle portate di massa aria/combustibile aspirate in un ciclo (14.7 nel ciclo otto - sempre in eccesso d'aria, quindi >14.7, nel ciclo diesel)

η_v = rendimento volumetrico dell'aspirazione (0.8 - 1 nei motori aspirati, fino a 1.4 - 1.5 nei motori sovralimentati)

η_{id} = rendimento ideale del ciclo otto o diesel (aumenta all'aumentare del rapporto di compressione e vale circa 0.63 nel ciclo otto con $r_c = 11.5$, leggermente più alto nel diesel)

η_i = indice di bontà (indice di scostamento dal ciclo ideale)

η_{mecc} = rendimento meccanico

Vantaggi

Un pistone in materiale ceramico può offrire, in funzione dei parametri sopra citati, i seguenti principali vantaggi, teorici e rilevati sperimentalmente:

- Alcuni ceramici hanno *peso specifico simile all'alluminio* (es. nitrato di silicio), ma date le elevate prestazioni ad alte temperature si possono realizzare pistoni con meno materiale. In alcuni casi si può arrivare a ridurre la massa del pezzo del 15 %. Da questa proprietà derivano i due punti seguenti.
- Ad ogni accelerazione subita dal pistone nel moto alternato si produce una forza d'inerzia $F_i = -ma$, proporzionale alla massa. Se la massa è minore la F_i sarà minore, pertanto, a parità di carichi meccanici inerziali, si potranno *incrementare i regimi massimi di rotazione n* . Si osservi che n è linearmente proporzionale alla P_m .
- Diminuendo la F_i prodotta dal pistone, quest'ultimo genererà una forzante armonica di intensità minore, pertanto le vibrazioni prodotte (forze d'inerzia del primo e secondo ordine) saranno ridotte, con considerevole aumento dell'affidabilità e confort. Inoltre le pressioni tra le superfici di contatto che generano attrito sono inferiori, con conseguente aumento del η_{mecc} .
- Avendo i materiali ceramici *modulo di young molto maggiore* dell'alluminio, la costante di elasticità K è maggiore, con conseguente spostamento delle frequenze di risonanza del pistone a pulsazioni molto più alte.
- *Le proprietà antifrizione* di alcuni materiali ceramici (considerando anche la possibilità di ottenere superfici con porosità ottimizzata per il trattenimento del lubrificante) comporta una diminuzione dell'attrito di strisciamento nella canna, soprattutto a temperature di utilizzo alte, con conseguente aumento del η_{mecc} .
- *Il basso coefficiente di dilatazione termica* permette di realizzare pistoni con giochi molto contenuti tra stantuffo e cilindro. Da questa proprietà derivano i due punti seguenti.
- In alcuni casi è possibile realizzare pistoni senza fasce elastiche, con conseguente diminuzione dell'attrito e aumento del η_{mecc} .
- La maggior precisione diminuisce i trafiletti di olio motore nella camera di combustione, con conseguente diminuzione delle emissioni. Inoltre, i carichi dinamici provenienti dai moti secondari (come urti, vibrazioni, sovratensioni locali ecc.), derivanti dai giochi di funzionamento, sono notevolmente più contenuti.
- *Le proprietà antiusura* dei ceramici conferiscono al pistone aspettative di vita molto maggiori rispetto a pistoni in lega d'alluminio.

È evidente quindi che, più in generale, avendo la possibilità di ottimizzare il η_{mecc} e di aumentare i regimi di rotazione, un pistone in ceramico può garantire maggiori potenze e/o maggiori rendimenti, ovvero minori consumi di carburante ed emissioni inquinanti più contenute. Inoltre, con un'attenta progettazione al fine di evitare rotture fragili, il materiale ceramico può aumentare la durata in vita del componente.

ASPETTI TERMICI E MECCANICI

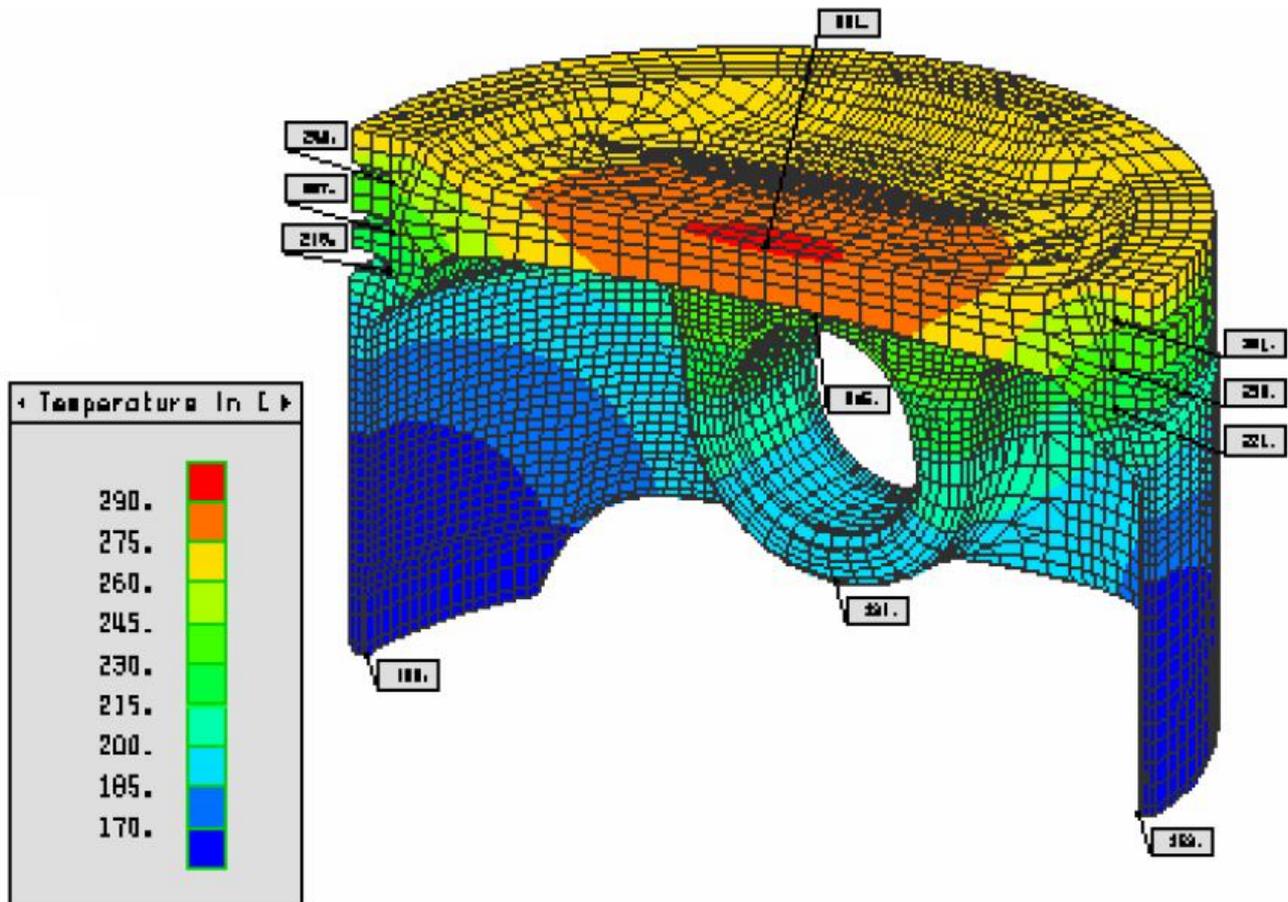
Come già accennato in precedenza, il pistone è un organo meccanico fortemente sollecitato sia dal punto di vista termico che meccanico. Infatti il pistone non è solamente sottoposto a pressioni elevate, ma permette il trasferimento di consistente parte del calore generato.

Indicativamente circa il 50% del calore sviluppato dopo la combustione viene trasferito al cilindro per convezione/irraggiamento → conduzione tramite cielo e fasce elastiche, il 30% tramite le valvole e il restante 20% tramite il mantello a contatto con il cilindro, verso il liquido di raffreddamento.

In più i carichi termici a regime transitorio generano sovratensioni dovute a forti gradienti di temperatura, le quali possono provocare decadimento delle proprietà meccaniche delle leghe leggere, con conseguenti distorsioni circonferenziali e assiali.

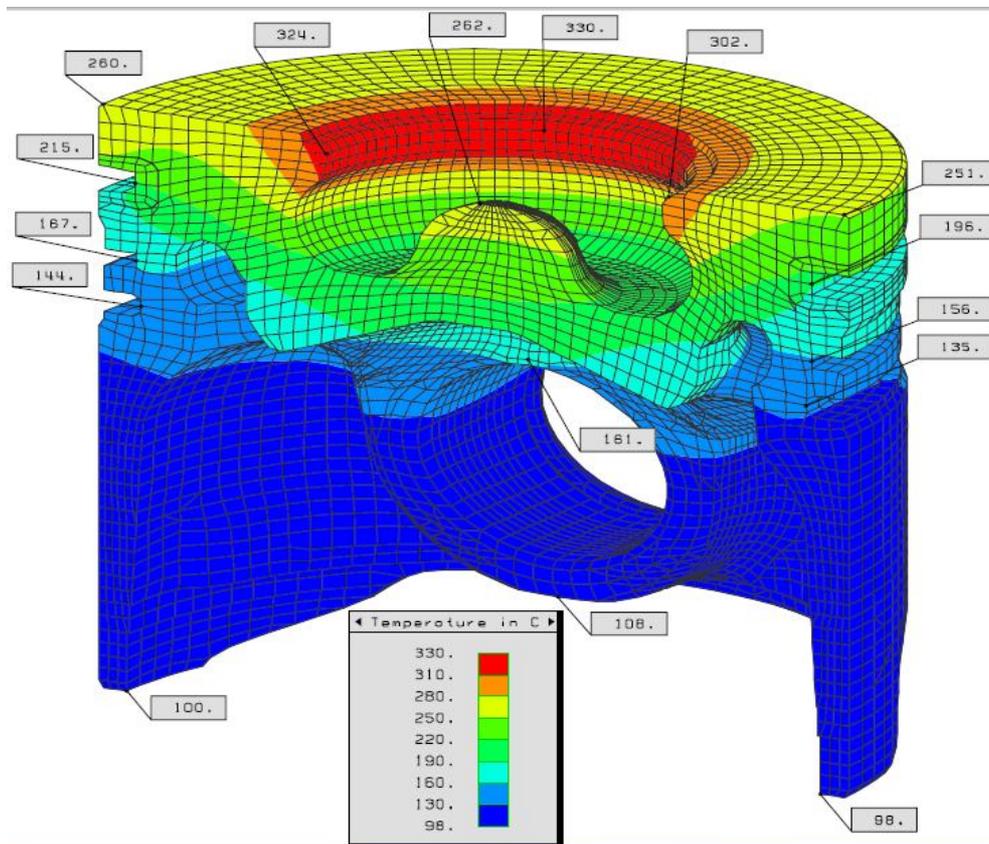
Vengono riportate in seguito alcune analisi con metodo FEM, che danno un'indicazione sull'entità dei carichi termici e meccanici subiti da un pistone. L'analisi è stata effettuata su pistoni in lega d'alluminio, per motori diesel, con condizioni di temperatura a regime (fonte: Corso di Progettazione meccanica di motori, Politecnico di Milano).

Aree di temperatura di un pistone per motore diesel 1400 cm³ a quattro cilindri.



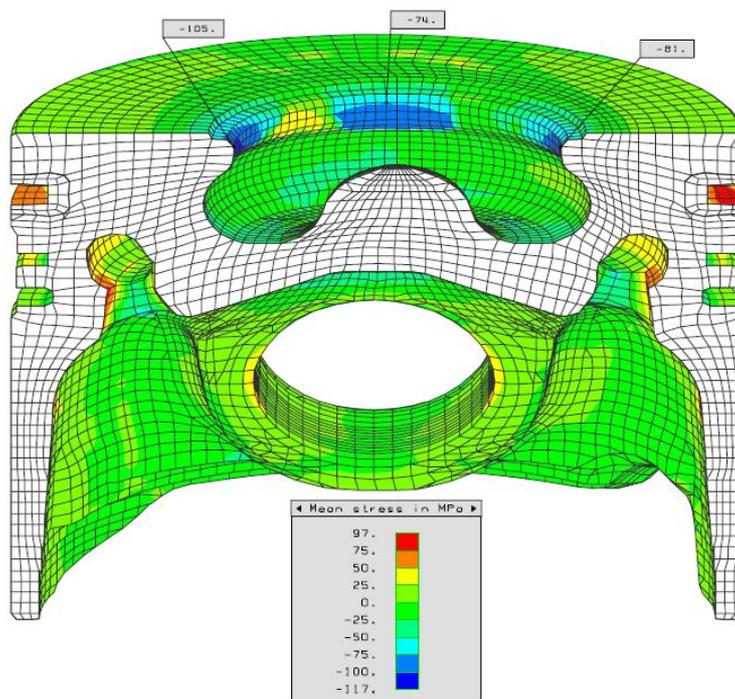
Si nota che al centro del cielo si possono raggiungere temperature che arrivano a 290 °C, e negli alloggiamenti delle fasce elastiche circa 230 °C.

Aree di temperatura di un pistone per motore diesel 2000 cm³, diametro 85mm, con cielo incavato per aumentare la turbolenza e galleria di raffreddamento.



La galleria di raffreddamento permette di abbassare le temperature, soprattutto nei pressi degli alloggiamenti delle fasce elastiche. In alcuni punti del cielo si raggiungono tuttavia temperature piuttosto elevate, che possono arrivare anche a 330 °C.

Stress meccanico di un pistone per motore diesel 2000 cm³, diametro 85mm, con cielo incavato per aumentare la turbolenza e galleria di raffreddamento, pressione sul cielo 75 bar.



Come si può notare dalle immagini le pressioni possono raggiungere valori di circa 100 N/mm² sugli alloggiamenti delle fasce elastiche e 50 N/mm² nell'allungamento spinotto.

In alcuni punti del cielo invece, sul pistone in esame, nascono delle tensioni di trazione di circa 105 N/mm².

Il problema principale sta nel fatto che le zone dove le sollecitazioni sono elevate corrispondono a zone ad alta temperatura. Si osservi la seguente tabella:

	Cielo	Alloggiamento fasce	Alloggiamento spinotto
Tensione di trazione	105 MPa	-100 MPa	-50 MPa
Temperatura	324 °C	196 °C	161 °C

In questo caso la zona più critica è il cielo del pistone, sottoposto a trazione ad alte temperature. E' evidente che un normale pistone in lega d'alluminio possa andare in crisi e criccare, considerando il fatto che le temperature di esercizio limite per questi materiali non vanno oltre i 300 °C e hanno punto di fusione intorno ai 660 °C.

Nell'immagine seguente si nota la cricca propagata nel cielo di un pistone in lega d'alluminio dopo un funzionamento di 1000 ore a banco prova. Da notare che il punto di innesco della cricca coincide con la zona di massima sollecitazione termica/meccanica calcolata analiticamente con metodo FEM



La scelta della sostituzione di questo componente con un pistone in materiale ceramico potrebbe risolvere il problema.

Infatti mentre la lega di alluminio a 250 °C ha carico di rottura piuttosto penalizzato rispetto i 350 MPa a temperatura ambiente, opportuni materiali ceramici mantengono inalterata questa proprietà anche per valori di temperatura molto maggiori (come vedremo in seguito carburo di silicio e nitruro di silicio non alterano la loro resistenza a trazione anche a temperature di 600 °C).

CARATTERISTICHE RICHIESTE DAL MATERIALE PER PISTONI

La scelta del materiale per la produzione dei pistoni in ceramico non è un'operazione semplice, in quanto le caratteristiche richieste son diverse e tutte di fondamentale importanza, ovvero contribuiscono tutte in modo pesante per il miglioramento delle prestazioni.

Le principali caratteristiche meccaniche e tribologiche richieste sono le seguenti:

- *Elevata resistenza statica e a fatica*, in particolare ad elevate temperature. Il pistone è un organo fortemente sollecitato a shock termici e fatica meccanica.
- *Bassa densità*, per minimizzare le inerzie e i carichi meccanici ad esse collegate.
- *Basso coefficiente di dilatazione termica*. Con coefficienti di dilatazione termica bassi si possono minimizzare i giochi tra pistone e cilindro senza correre rischi di grippaggio.
- *Elevata conducibilità termica*. Lo smaltimento del calore verso il cilindro, e quindi all'impianto di raffreddamento, è un fattore fondamentale per evitare di raggiungere temperature eccessivamente elevate nella camera di combustione e nella testata.
- *Elevate caratteristiche reologiche*, in particolare in accoppiamento con il materiale della canna cilindri. L'eventuale eccessiva deformazione dovuta a shock termici o carichi meccanici potrebbe provocare il grippaggio.
- *Elevate caratteristiche tribologiche*, soprattutto per quanto riguarda la resistenza all'usura.

SCelta DEL MATERIALE

Individuazione delle categorie di ceramici più adatti

Con riferimento alle caratteristiche appena descritte, si confrontino i principali materiali ceramici ingegneristici, al fine di restringere il campo di scelta.

La tabella che segue riassume le principali caratteristiche meccaniche e termiche di materiali ceramici avanzati a confronto con acciai comuni e alluminio:

Materiale	Modulo di Young [Gpa]	Coeff di Poisson	Conduktività termica [W / m°C]		Dilatazione termica [µm/m °C]	Densità [g/cm³]	Resistenza a rottura [MPa]		Modulo di Weibull [m]	Temperatura massima di utilizzo [°C]
			20°C	600°C			20°C	600°C		
Si₃N₄										
HPSN	290	0.3	29	22	2.7	3.3	830	805	7	1400
SSN	290	0.28	33	18	3.1	3.3	800	725	13	1400
RBSN	200	0.22	10	10	3.1	2.7	350	350	10	1400
SiC										
α	430	0.17	80	51	4.6	3.2	550	520	10	1500
β	390	0.16	71	48	5.5	3.2	490	490	9	1500
RBSC	413	0.24	160	70	4.3	3.1	390	390	10	1300
ZrO ₂ Parz stab	205	0.30	2.9	2.9	10	5.9	1000	580	14	950
Allumina	330		0.29		8.8	4	100	95	9	1500
Acciaio	206	0.3	38		14	7.8	1500	140	95	500
Al 2618	70	0.33	160		22.4	2.7	420	0	60	300

Se si confronta il miglioramento/peggioramento delle prestazioni, normalizzando i valori rispetto alla lega Al 2618, si ottiene, indicativamente:

	Densità	Resistenza meccanica	Conduktività termica	Dilatazione termica
Al 2618	1	1	1	1
Al ₂ O ₃	1.48	0.25	0.002	0.39
ZrO ₂	2.19	2.5	0.02	0.45
Si ₃ N ₄	1.15	0.9 - 2	0.16 - 0.07	0.14
SiC	1.17	0.9 - 1.38	0.34 - 1	0.21

Tutti i ceramici in esame hanno resistenza a carichi di compressione decisamente più elevati della lega di alluminio.

Analizzando la tabella di cui sopra, in riferimento alla lega più comune per pistoni (2618), si può affermare che:

- Al_2O_3 → ha densità elevata, quasi 1.5 volte maggiore, resistenza meccanica decisamente inferiore, dovuta principalmente alla fragilità, e conduttività termica piuttosto bassa.
- ZrO_2 → ha densità più di 2 volte superiore all'alluminio e conduttività termica bassa, e nonostante le proprietà meccaniche siano elevate (grazie a meccanismo di tenacizzazione per trasformazione), i primi due aspetti incidono molto sul rendimento di un motore a combustione interna.
- Si_3N_4 → ha densità comparabile con quella dell'Al 2618, resistenza meccanica alle alte temperature decisamente più elevata e dilatazione termica 7 volte più bassa. Bisogna valutare le eventuali problematiche dovute alla minore conduttività termica.
- SiC → Ha caratteristiche simili a quelle del nitrato di silicio.

Alla luce di quanto detto è possibile scartare a priori l'utilizzo di allumina e zirconia per la produzione di pistoni in materiale ceramico massiccio. La zirconia offrirebbe elevate proprietà di resistenza meccanica grazie a meccanismi di tenacizzazione, nella zirconia parzialmente stabilizzata, ossia con presenza di fase cristallina tetragonale a temperatura ambiente (sotto l'azione di sforzi meccanici la fase tetragonale si trasforma in monoclina, con espansione volumetrica e conseguente compressione della cricca, la quale "fatica" a propagare), ma essendo un ceramico ionico l'elevata densità costituisce un limite troppo grande per questa applicazione.

Anche l'allumina ha densità elevata, alla quale si aggiunge un'elevata fragilità, e nonostante le ottime proprietà di resistenza all'usura e alla corrosione non è conveniente per questa applicazione.

La scelta va quindi effettuata sul dominio dei ceramici SiC e Si_3N_4 .

Scelta del materiale con metodo Digital Logic

Il metodo Digital logic consente di mettere a confronto diversi materiali sulla base di alcune caratteristiche arbitrarie.

Materiali e caratteristiche sulle quali eseguire il confronto:

Nel caso in esame vengono confrontati i seguenti materiali:

- HPSN
- SSN
- RBSN
- SiC α
- SiC β
- RBSN
- Al 2618

Si è scelto di inserire nel confronto anche la principale lega d'alluminio usata per pistoni, al fine di ottenere un'indicazione di quanto verrebbero eventualmente migliorate le prestazioni del componente rispetto alle applicazioni comuni.

Le caratteristiche scelte come base di confronto sono le principali caratteristiche richieste per l'applicazione di pistoni per motori endotermici, e sono le seguenti:

- Densità ρ
- Dilatazione termica Δ
- Tensione massima di rottura σ_R
- Conduttività termica λ
- Temperatura massima di utilizzo T_{max}

Nel seguente confronto si è scelto di non considerare la variabile Costo, per vari motivi. Innanzitutto, non essendo diffusa la produzione di pistoni interamente in materiale ceramico, è difficile trovare dati precisi sull'eventuale prezzo di mercato. I produttori di componenti ceramici offrono solamente delle stime dell'eventuale costo, dato che, a concorrere in quest'ultimo, sono diverse variabili, come la forma, le dimensioni e l'accuratezza dimensionale del componente, nonché la composizione e la purezza del materiale.

Definizione della funzione di prestazione

Si definisca una funzione di prestazione Z come segue:

$$Z = \sum \alpha_i * \frac{P_i}{P_{imax}}$$

Dove:

Z → rappresenta un indice di prestazione globale di un materiale in esame

P_i → rappresenta la proprietà i -esima del materiale in esame

P_{imax} → rappresenta il valore massimo della proprietà P_i , ovvero il valore della i -esima proprietà del materiale che ce l'ha più alta.

α_i → Rappresenta il peso i -esimo da assegnare alla proprietà i -esima richiesta dall'applicazione in esame

Per ogni materiale viene quindi calcolata la funzione di prestazione Z . L'intenzione è quella di ottenere un indice di prestazione che sia tanto più alto quanto più il materiale in esame è performante. Appare da subito evidente che, essendo Z una somma di funzioni lineari, essa sarà tanto maggiore quanto maggiori sono le funzioni nella sommatoria. Non è affatto vero però che una proprietà sia ottimale se il suo valore è alto. Si consideri ad esempio la proprietà densità; essa sarà, nel caso in esame, tanto migliore quanto più bassa è la densità del materiale considerato.

Occorre pertanto invertire opportunamente il valore di talune proprietà, in modo tale da far risultare sempre che più alto è il valore della proprietà in esame, più il materiale è performante. Così facendo si ottiene globalmente che, per ogni materiale, più alto è il valore di Z , e più il materiale è "buono" per l'applicazione. Alla fine il materiale con Z più alto sarà preferibile rispetto agli altri.

Un'altra osservazione importante è che le singole proprietà P_i sono normalizzate rispetto al valore massimo in assoluto presente nella lista, in modo tale da ottenere valori percentuali riferiti al valore più alto.

Proprietà P

Per quanto detto nel paragrafo precedente, le proprietà considerate sono le seguenti:

- $P_1 = 1/\rho \rightarrow$ leggerezza
- $P_2 = 1/\Delta \rightarrow$ resistenza alla dilatazione termica
- $P_3 = \sigma_R \rightarrow$ Tensione massima di rottura
- $P_4 = T_{max} \rightarrow$ Temperatura massima di utilizzo
- $P_5 = \lambda \rightarrow$ Conduttività termica

Materiale	Modulo di Young [Gpa]	Coeff di Poisson	Conduttività termica [W / m°C]		Dilatazione termica [$\mu\text{m}/\text{m} \text{ } ^\circ\text{C}$]	Densità [g/cm ³]	Resistenza a rottura [MPa]		Modulo di Weidbull [m]	Temperatura massima di utilizzo [°C]
			20°C	600°C			20°C	600°C		
Si ₃ N ₄										
HPSN	290	0.3	29	22	2.7	3.3	830	805	7	1400
SSN	290	0.28	33	18	3.1	3.3	800	725	13	1400
RBSN	200	0.22	10	10	3.1	2.7	350	350	10	1400
SiC										
α	430	0.17	80	51	4.6	3.2	550	520	10	1500
β	390	0.16	71	48	5.5	3.2	490	490	9	1500
RBSC	413	0.24	160	70	4.3	3.1	390	390	10	1300
Al 2618	70	0.33	160		22.4	2.7	420	0	60	300

I valori di normalizzazione, $P_{i\max}$, sono i seguenti:

- $P_{1\max} = 0.3704$ (Al 2618 e RBSN) [cm³/g]
- $P_{2\max} = 0.3704$ (HPSN) [°C m/μm]
- $P_{3\max} = 830$ (HPSN) [MPa]
- $P_{4\max} = 1500$ (SiCα e SiCβ) [°C]
- $P_{5\max} = 160$ (Al 2618) [W/m°C]

Assegnazione dei pesi α_i

Il metodo Digital Logic prevede l'assegnazione dei pesi alle varie proprietà come segue:

- 1 vs 0 se la proprietà i è più importante della proprietà j
- 0 vs 1 se la proprietà j è più importante della proprietà i

Una soluzione più efficace è quella di assegnare i pesi con valori graduali, ovvero non solo 0 o 1 ma per esempio 4 3 2 1.

In questa sede si è scelto di assegnare i pesi alle proprietà P_i con il procedimento illustrato in seguito:

- $x_{P_i}=4$ e $x_{P_j}=1$ se la proprietà i è molto più importante della proprietà j
- $x_{P_i}=3$ e $x_{P_j}=1$ se la proprietà i è mediamente più importante della proprietà j
- $x_{P_i}=2$ e $x_{P_j}=1$ se la proprietà i è poco più importante della proprietà j
- $x_{P_i}=1$ e $x_{P_j}=1$ se la proprietà i ha la stessa importanza della proprietà j

L'ordine di importanza decrescente, assegnato in questa sede, alle proprietà, è il seguente (si ricordi che è stata trascurata la variabile Costo) :

- 1) $P_1 = 1/\rho \rightarrow$ leggerezza
- 2) $P_2 = 1/\Delta \rightarrow$ resistenza alla dilatazione termica
- 3) $P_3 = \sigma_R \rightarrow$ Tensione massima di rottura
- 4) $P_4 = T_{max} \rightarrow$ Temperatura massima di utilizzo
- 5) $P_5 = \lambda \rightarrow$ Conduttività termica

Si costruisce una tabella assegnando i valori x e facendo le somme finali come segue:

Proprietà	Assegnazione dei valori x					Somme		α				
$1/\rho$	2	3	3	4		→	12	→	12/34			
$1/\Delta$	1				2	2	3	→	8	→	8/34	
σ_R		1			1		2	→	5	→	5/34	
T_{max}			1			1		2	→	5	→	5/34
λ				1			1	1	→	4	→	4/34

Tot=34

Nel primo quadrante, a titolo di esempio,

- $x_{P_1}=2$ e $x_{P_2}=1$ (la leggerezza è poco più importante dell'inverso della dilatazione termica)
- $x_{P_1}=3$ e $x_{P_3}=1$ (la leggerezza è mediamente più importante della tensione di rottura)
- $x_{P_1}=3$ e $x_{P_4}=1$ (la leggerezza è mediamente più importante della temperatura massima di utilizzo)
- $x_{P_1}=4$ e $x_{P_5}=1$ (la leggerezza è molto più importante della conduttività termica)

Per gli altri quadranti si esegue lo stesso procedimento.

I pesi α_i calcolati risultano pertanto:

- $\alpha_1 = 12/34 = 0.353$
- $\alpha_2 = 8/34 = 0.235$
- $\alpha_3 = 5/34 = 0.147$
- $\alpha_4 = 5/34 = 0.147$
- $\alpha_5 = 4/34 = 0.118$

Calcolo finale della funzione Z

A questo punto si conoscono le incognite P_i , P_{imax} e α_i . Si possono quindi calcolare le funzioni di prestazioni Z per ognuno de materiali considerati, come segue:

$$\begin{aligned}
 Z_{HPSN} &= \sum \alpha_i * \frac{P_i}{P_{imax}} = \\
 &= 0.353 \frac{0.303}{0.3704} + 0.235 \frac{0.3704}{0.3704} + 0.147 \frac{830}{830} + 0.147 \frac{1400}{1500} + 0.118 \frac{29}{160} = 0.8294 \\
 Z_{SSN} &= 0.353 \frac{0.303}{0.3704} + 0.235 \frac{0.3225}{0.3704} + 0.147 \frac{800}{830} + 0.147 \frac{1400}{1500} + 0.118 \frac{33}{160} = 0.7966 \\
 Z_{RBSN} &= 0.353 \frac{0.3704}{0.3704} + 0.235 \frac{0.3225}{0.3704} + 0.147 \frac{350}{830} + 0.147 \frac{1400}{1500} + 0.118 \frac{10}{160} = 0.7642 \\
 Z_{SiC\alpha} &= 0.353 \frac{0.3125}{0.3704} + 0.235 \frac{0.2174}{0.3704} + 0.147 \frac{550}{830} + 0.147 \frac{1500}{1500} + 0.118 \frac{80}{160} = 0.7392 \\
 Z_{SiC\beta} &= 0.353 \frac{0.3125}{0.3704} + 0.235 \frac{0.1818}{0.3704} + 0.147 \frac{490}{830} + 0.147 \frac{1500}{1500} + 0.118 \frac{71}{160} = 0.6993 \\
 Z_{RBSC} &= 0.353 \frac{0.3226}{0.3704} + 0.235 \frac{0.2326}{0.3704} + 0.147 \frac{390}{830} + 0.147 \frac{1300}{1500} + 0.118 \frac{160}{160} = 0.7695 \\
 Z_{Al2618} &= 0.353 \frac{0.3704}{0.3704} + 0.235 \frac{0.0446}{0.3704} + 0.147 \frac{420}{830} + 0.147 \frac{300}{1500} + 0.118 \frac{160}{160} = 0.6030
 \end{aligned}$$

Ordinando i risultati e riportandoli in una tabella:

Z materiale	Valore
Z _{HPSN}	0.8294
Z _{SSN}	0.7966
Z _{RBSC}	0.7695
Z _{RBSN}	0.7642
Z _{SiCα}	0.7392
Z _{SiCβ}	0.6993
Z _{Al2618}	0.6030

Dall'analisi effettuata il materiale che risulta globalmente più performante è il nitruro di silicio HPSN. Il risultato è giustificato dall'elevata resistenza meccanica, dalla bassa dilatazione termica, dalla densità contenuta e dall'elevata resistenza alle alte temperature.

Considerazioni finali

Dall'analisi effettuata, con le variabili considerate, la lega di alluminio risulta il materiale meno performante per pistoni. Questo è dovuto al fatto che non si sono considerate proprietà economiche (costo) ma solo meccaniche e termiche. Inoltre l'alta conduttività termica dell'alluminio (alla quale è stato assegnato un peso basso) comporta la notevole riduzione di alcuni rischi (vedi limiti della trattazione di seguito).

I risultati ottenuti sono strettamente legati alle caratteristiche alla base del confronto, nonché all'assegnazione dei pesi α_i . Essendo questi ultimi arbitrari è difficile stabilire con precisione quale sia effettivamente il materiale migliore per questa applicazione, ma la trattazione fornisce un'indicazione di massima dei possibili materiali utilizzabili. Inoltre alcune proprietà considerate sono estremamente variabili.

Limiti della trattazione:

- Si consideri la proprietà P_3 , ovvero la resistenza meccanica a rottura. Nei materiali metallici (come la lega Al 2618) essa è ben definita ed ha un valore preciso, ottenuto da prove sperimentali. Nei materiali ceramici invece la dispersione dei dati di resistenza è un fattore piuttosto rilevante per quanto riguarda la determinazione di un valore da inserire nel calcolo. Basti osservare i moduli di Weibull. Essi forniscono un'indicazione della dispersione dei dati sperimentali, e , mentre per i metalli la dispersione è quasi nulla ($m = 60-100$) nei ceramici considerati sono nell'ordine di $m = 10-15$. Nella trattazione vengono considerati i valori di resistenza nominali forniti dal produttore, senza considerare la dispersione dei dati.

- Si consideri la proprietà P_5 , ovvero la conduttività termica. In questa sede, a questa proprietà, viene associato un peso α basso. Il che non è un problema per il pistone in sé, in quanto il materiale ceramico può lavorare a temperature di utilizzo molto alte. Le problematiche nascono perché, con conduttività bassa, lo smaltimento del calore è più difficoltoso e possono nascere problemi di surriscaldamento o autoaccensione della miscela di gas freschi, come già descritto in precedenza (vedi pagg. 24 - 25). Si noti che il materiale RBSC per esempio ha conduttività termica molto elevata, anche se nella scala di scelta occupa il 3° posto. Tuttavia se si confrontano i valori di Z si nota che Z_{RBSC} non è molto distante da Z_{HPSN} . Bisogna quindi valutare se i problemi nascenti, legati a una proprietà specifica del materiale, sono tali da compromettere l'applicabilità del materiale. In questo caso conviene "sacrificare" alcuni aspetti vantaggiosi (come ad esempio la dilatazione termica estremamente contenuta) a favore di una maggiore applicabilità. Altrimenti, se queste problematiche si verificano, bisogna prendere in considerazione il fatto di poter realizzare altri componenti in ceramico (ad esempio la testata e la canna del cilindro) e di aumentare la capacità dell'impianto di raffreddamento.

PRODUZIONE

La produzione di pistoni in materiale ceramico, in particolare in Si_3N_4 , non può che avvenire per sinterizzazione di polveri. Questo materiale è sintetico e può essere prodotto per nitrurazione del silicio, per riduzione e nitrurazione di silice con carbone oppure per reazione tra gas. Il nitruro di silicio ottenuto viene successivamente macinato per ottenere polveri, e viene eventualmente miscelato con additivi che favoriscono la sinterizzazione (es Al_2O_3 oppure Y_2O_3), i quali contribuiscono alla formazione di una fase intergranulare vetrosa. Successivamente si procede alla formatura del componente con appositi stampi spinti da presse, o con processi di iniezione. Si procede quindi alla sinterizzazione, che per queste applicazioni avviene sempre in presenza di fase liquida. Durante la sinterizzazione del nitruro di silicio i grani di fase α si sciolgono nella fase intergranulare, dalla quale precipitano grani di fase β , che presentano una geometria allungata. Questa geometria della struttura cristallina conferisce al Si_3N_4 l'elevata resistenza di cui dispone, in quando le cricche faticano a propagare, rallentate dalle protrusioni di cristalli di fase β che ne allungano il percorso. Il componente ottenuto è successivamente sottoposto a processi di rettifica e lappatura, con mole ad azione leggera, con abrasivo polvere di diamante.

Nell'immagine pistoni in Si_3N_4 massiccio:



ASPETTI ECONOMICI

L'unico aspetto importante non considerato in questa sede è il fattore economico. In realtà questo aspetto è tutt'altro che trascurabile, dato che nelle applicazioni industriali è determinante.

In questa trattazione si è scelto di mettere in evidenza i vantaggi prestazionali derivanti dalla sostituzione dei normali pistoni in lega con pistoni in ceramico, dando per scontato fin da subito che i costi per la produzione di componenti ceramici sono molto più elevati di quelli per gli stessi componenti in materiale metallico. La grande quantità di energia richiesta per la sinterizzazione (si necessita di temperature nell'ordine dei 2000 °C) e l'onerosità del processo tecnologico (si pensi per esempio al fatto di dover macinare, per ottenere polveri, materiali ceramici con durezza elevate nonchè abrasivi), contribuiscono a far lievitare i costi in modo considerevole.

È difficile effettuare una stima del costo, in quanto esso dipende dalle forme richieste, dalla purezza delle polveri (non solo per il valore del materiale in sè, ma anche per il fatto che se non ci sono additivi non si sviluppa la fase vetrosa e la sinterizzazione è più onerosa, necessita di temperature più alte). I produttori di componenti in ceramico forniscono solamente un'indicazione di massima: per i componenti in acciaio o alluminio, che necessitano di lavorazioni tecnologiche alle macchine utensili, lo stesso componente in materiale ceramico potrebbe costare dalle 5 alle 10 volte di più (fonte www.yenra.com).

Bisogna però fare una valutazione anche in termini di miglioramento delle prestazioni, con notevole riduzione del fattore ammortamento. Questi materiali hanno, come descritto in precedenza, caratteristiche anti usura notevolmente più efficaci delle leghe di alluminio, e quindi a lungo termine la scelta di montare pistoni in ceramico potrebbe risultare addirittura vantaggiosa (si ricordi lo studio, accennato in precedenza, effettuato da *Swain Tech* su pistoni rivestiti, vedi pag. 28).

Inoltre il miglioramento delle prestazioni comporta la diminuzione dei consumi, e considerato il prezzo attuale del carburante, questo potrebbe essere un aspetto decisamente a favore dell'applicazione.

Conclusioni

Alcuni materiali ceramici, che appartengono alla categoria dei ceramici covalenti, hanno caratteristiche meccaniche, termiche, tribologiche e reologiche che si prestano molto per l'applicazione di pistoni per motori endotermici.

I ceramici indicativamente più adatti per questo tipo di applicazioni sono:

- Nitruro di silicio (HPSN, SSN, RBSN)
- Carburo di silicio (RBSC, SiC α , SiC β)

La scelta di questi materiali è giustificata dalle ottime proprietà, compatibili con le caratteristiche richieste. Essi infatti si distinguono per:

- Elevata resistenza meccanica (fino a 2 volte superiore alla lega Al 2618 a temperatura ambiente, fino a 4-5 volte superiore a temperatura di utilizzo)
- Bassissimo coefficiente di dilatazione termica (anche 8 volte inferiore a quello di Al 2618)
- Densità contenuta, confrontabile con quella di Al 2618
- Elevata resistenza all'usura per strisciamento
- Elevate temperature massime di utilizzo (anche fino a 1500 °C)

Il basso coefficiente di dilatazione termica consente la realizzazione di pistoni con giochi di accoppiamento decisamente contenuti, a tutto vantaggio di una maggiore efficienza per quanto riguarda le perdite delle tenute, e quindi minore inquinamento, e di una considerevole diminuzione delle sollecitazioni meccaniche derivanti da moti secondari (scampanamento del pistone nel cilindro, vibrazioni). In alcuni casi (per grandi alesaggi) la precisione dell'accoppiamento consente di montare pistoni in ceramico senza fasce elastiche, senza risentire di perdite per trafileamento.

L'elevata resistenza all'usura (dalle prove sperimentali riportate in questa trattazione è emerso che un pattino con rivestimento ceramico, sottoposto a strisciamento non lubrificato su una pista di acciaio, dopo 10000 m presentava profondità delle piste di usura fino a 25 volte inferiori a quelle riscontrate sullo stesso pattino in lega d'alluminio) consente un notevole aumento dell'aspettativa di vita del componente, tanto da poterla considerare infinita rispetto all'usura dell'automezzo in generale.

La densità contenuta, che concorre con un'elevata resistenza meccanica, permette la realizzazione di componenti con minor volume di materiale rispetto alla lega di alluminio, con conseguente possibilità di realizzare un pistone avente la stessa massa o, in alcuni casi, più leggero, rispetto a un pistone in lega Al 2618. Questo comporta l'aumento del rendimento del motore, dovuto all'aumento del rendimento meccanico.

Un problema potrebbe derivare dalla bassa conduttività termica rispetto all'alluminio. Questa proprietà contribuisce alla formazione di una "barriera termica", che protegge il componente ma ostacola lo smaltimento del calore. Potrebbero così sopraggiungere problemi di natura termica su altri componenti, quali il cilindro, la testata, le valvole, nonché si potrebbe raggiungere la temperatura di autoaccensione del carburante nei motori a ciclo otto. Per i motori a ciclo diesel invece, l'elevata temperatura nella camera di combustione è un enorme vantaggio, in quanto favorisce l'autoaccensione della miscela di gas freschi al momento dell'iniezione e l'ottimizzazione della combustione, anche se temperature di combustione troppo elevate favoriscono la produzione di agenti inquinanti quali NO e NO₂.

Su alcuni prototipi di motore diesel a combustione interna sono stati realizzati non solo il pistone in ceramico massiccio, ma anche il rivestimento del cilindro, la testata e le valvole. Con questa soluzione è possibile il funzionamento del gruppo termico senza impianto di raffreddamento, o comunque con un impianto molto contenuto.

Infine la valutazione della convenienza economica è un aspetto piuttosto complesso. I produttori di ceramici quantificano il costo iniziale del componente dalle 5 alle 10 volte superiore al costo dell'equivalente in lega d'alluminio. Bisogna tuttavia valutare se l'assenza di spese di manutenzione, la quasi assenza di ammortamento e i vantaggi in termini di consumi di carburante, possano coprire la spesa iniziale durante la vita del motore, e in tal caso, a tutto vantaggio di un minor inquinamento nonché di un risparmio economico.

Bibliografia

- Mahmoud M. Farag – “Material and Process Selection for Engineering design” – ed. CRC Press.
- Alessandro Piccone – “approfondimento-Struttura motore e pistone” - Corso di Progettazione meccanica di motori, Politecnico di Milano 2008/2009 .
- Enrico Bernardo – “Materiali ceramici avanzati” – Corso di scienze dei materiali, Università degli studi di Padova 2009/2010.
- L. Ceschini, C. Martini, G. Sambogna, F. Tarterini – “modificazione superficiale mediante peo (plasma electrolytic oxidation) del composito 2618/20 % Al₂O₃: comportamento tribologico in condizioni di strisciamento non lubrificato”.
- Idemat - “ Design for Sustainability” - Delft University of Technology, 2003.
- <http://www.reissercycle.com>
- <http://www.wikipedia.org>
- <http://www.syalons.com>
- <http://www.swaintech.com>