

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale
Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

Scudi ablativi: materiali costituenti e struttura

Tutor universitario: Prof. Roberta
Bertani

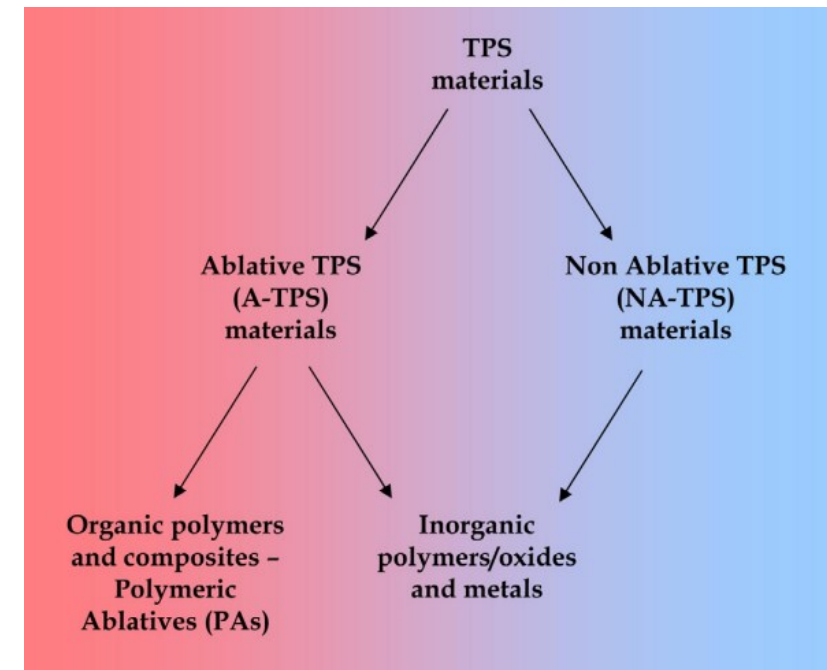
Laureando: *Mattia Sbrugnera*

Padova, 22/03/2024

Gli scudi termici di un veicolo aerospaziale sono i rivestimenti più esterni del veicolo stesso, che hanno l'obiettivo principale di proteggere il carico utile e garantire le prestazioni meccaniche, strutturali e aerodinamiche delle parti che rivestono.

Il range di temperature a cui un veicolo può essere sottoposto è generalmente vasto, varia dallo zero assoluto fuori dall'atmosfera fino a temperature molto elevate raggiungibili subito dopo l'accensione dei motori o addirittura attorno ai 2000K se si parla di rientro in atmosfera.

I dispositivi che fanno da scudo termico al veicolo vengono detti Thermal Protection System (TPS) e i materiali che li compongono si dividono in due macrogruppi: ablativi (A-TPS) e non ablativi (NA-TPS). I primi possono ulteriormente dividersi in ablativi polimerici organici (PAs) e polimeri inorganici o metalli, mentre i secondi sono solamente polimeri inorganici o metalli.



Quando si parla di ambiente ipertermale si parla dei carichi termici cui è sottoposto il veicolo. Il fattore che incide maggiormente su questo aumento di temperatura è la velocità, infatti il riscaldamento è proporzionale al quadrato della velocità, ma dipende anche da altri fattori quali traiettoria e gas attraversato. Nel dimensionamento termico ha grande rilevanza la conducibilità termica del materiale TPS, che si vuole mantenere alta per molti materiali perché così viene incentivato il raffreddamento. Purtroppo però questa conducibilità è direttamente proporzionale alla densità del materiale e, aumentando quest'ultima aumenterebbe il peso con conseguente innalzamento notevole dei costi. Si cerca dunque un compromesso per dei materiali TPS leggeri che permettano di avere un maggiore carico utile in termini di peso.

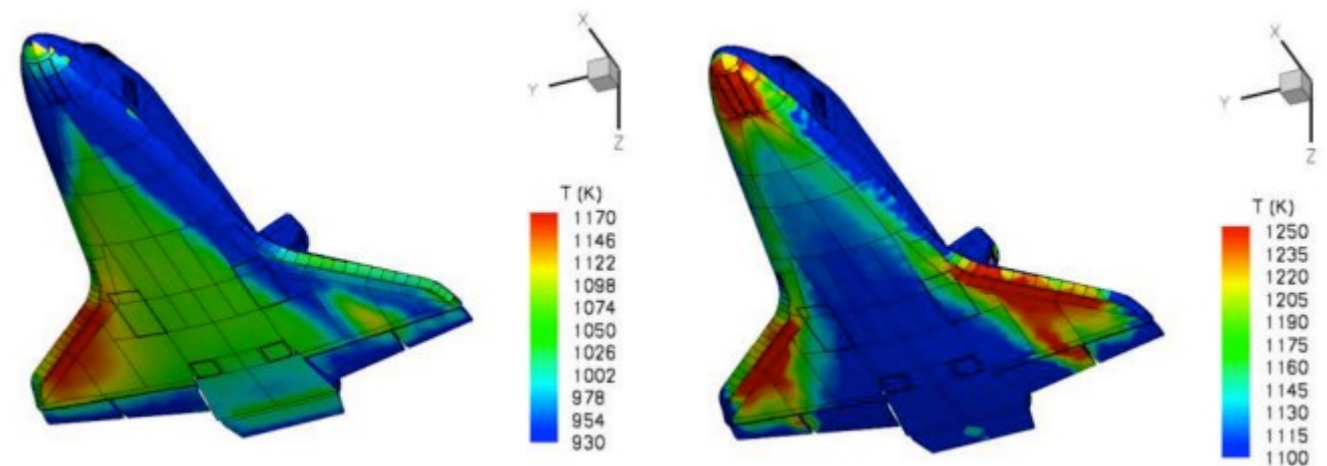


Figure a lato mostra il riscaldamento a cui è sottoposto lo Space Shuttle a mach 8.4 e 18.1

Un materiale non ablativo è un materiale che non subisce variazioni di massa e di proprietà se esposto all'ambiente ipertermico, che comunque deve essere mite per questi materiali, la cui vita utile è garantita per un numero N di missioni.

Ci sono 3 soluzioni principali:

- LRSI/HRSI (Low/High temperature Reusable Surface Insulation)
- FRSI (Felt Reusable Surface Insulation)
- RCC (Reinforced Carbon Carbon)

Le piastrelle RSI di rivestimento dello Space Shuttle sono costituite da LI-900:

- densità 0.144 g/cm³ composto da 10% fibre Si, 90% vuoto, rivestimento in vetro borosilicato (Pyrex®), basse conduttività termica e dilatazione, ottima resistenza ad agenti chimici)

Le piastrelle si dividono in:

- LRSI (bianche) ad alta riflettività (parti superiori veicolo)
l=203mm, T_{max}=649°C, 725 mattonelle, peso tot 1014 kg
- HRSI (nere) ad alta emissività (parti inferiori veicolo)
l=152mm, T_{max}=1260°C, 20548 mattonelle, peso tot 4413 kg



Piastrella HRSI che riveste lo Space Shuttle

I materiali TPS di tipo ablativo vanno a formare scudi termici definiti «semi-passivi» in quanto la rimozione del calore avviene in maniera attiva sfruttando appunto il concetto di ablazione, cioè la capacità del materiale di immagazzinare calore per poi vaporizzarsi o fondersi e separarsi dalla superficie. Ne consegue che il materiale cala in termini di dimensioni e peso alla fine della missione e spesso non è possibile un riutilizzo.

Il vantaggio di questi materiali è la grande leggerezza e le ottime proprietà che garantiscono, abbinato ai costi di produzione non eccessivi.

I materiali ablativi si possono dividere in 3 categorie:

- Metalli e ceramiche
- Grafite e compositi carbonio-carbonio
- Ablativi polimerici carbonizzabili e non carbonizzabili

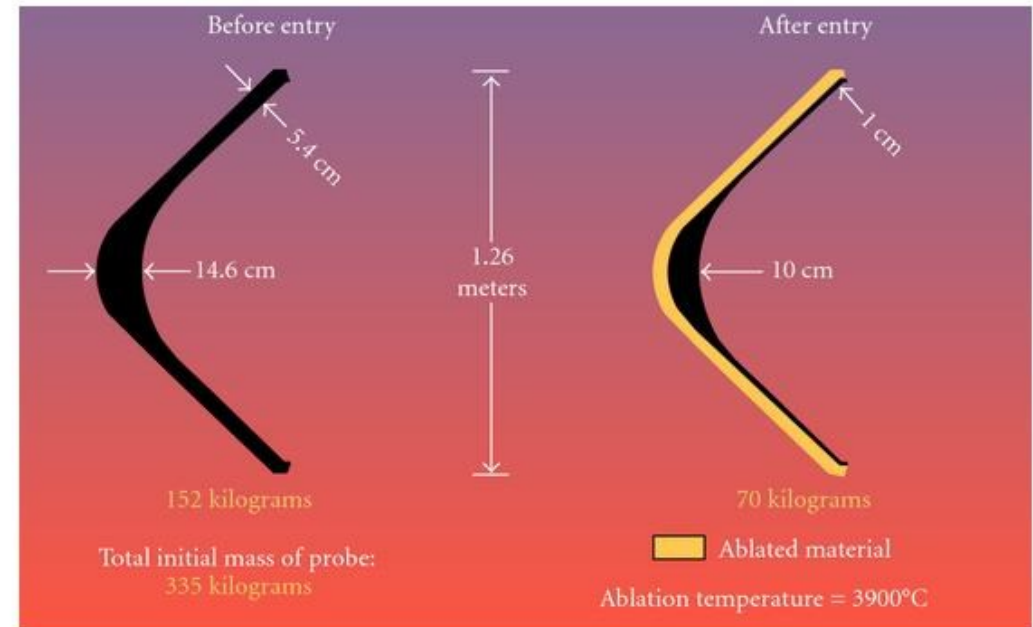


Fig. Ablazione dello scudo termico della sonda Galileo

Derivano direttamente dagli sviluppi sui non ablativi. Si sono testati vari metalli e i migliori risultati sono stati dati da renio e tungsteno usati nelle gole dei motori a razzo dove presentavano erosione quasi nulla. Per gli elevati costi e peso dei metalli si è poi optato per rivestire con la tecnica della deposizione chimica da fase vapore (CVD) con questi metalli dei materiali più leggeri ed economici (compositi C/C).

Interessante poi il caso degli ablatori ceramici leggeri (LCA), formati da un feltro poroso in ceramica o fibra di carbonio come substrato e supporto strutturale, immerso in una matrice organica che fa da legante. Un esempio notevole è il PICA (Phenolic Impregnated Carbon Ablator), sviluppato all'inizio degli anni '90, formato da un feltro in carbonio, un isolante Fiberform® e una resina fenolica:

- Densità $0.22 - 0.27 \text{ g/cm}^3$
- Ottimi risultati oltre i 1350 W/cm^2 e più efficace di altri ablativi anche sopra i 2050 W/cm^2

Aumentando la densità del PICA tra 0.29 e 0.37 g/cm^3 (PICA densificato) si è riscontrato:

- Tasso di recessione inferiore
- Maggiore raffreddamento della superficie

Con pressioni fino a 10 atm e flussi fino a 1800 W/cm^2 .

Allo stato dell'arte è interessante il progetto, finanziato dall'UE, C³HARME (Ceramic Composites for Combustion Harsh Environments and Space) che sta sviluppando compositi a matrice ceramica a temperatura ultra elevate per i razzi di nuova generazione (oltre 3000°C) e piastrelle TPS (15 MW/m^2).

Il carbonio e i suoi derivati sono ablativi ad alte prestazioni. Grafite:

- A pressione atmosferica non ha punto di fusione e sublima a 3620°C (razzo tedesco V-2, Fig. a lato)
- migliore è la grafite pirolitica
 - Produzione tramite decomposizione di gas idrocarburo ad alta temperatura in forno CVD
 - Migliori proprietà della grafite convenzionale anche all'aumentare della temperatura



Ancora migliori prestazioni le presentano i compositi carbonio – carbonio, formati appunto da fibre di carbonio immerse in una matrice di carbonio:

- Le fibre di carbonio garantiscono buone proprietà meccaniche
- La matrice carboniosa resiste molto bene all'ablazione
- Varie soluzioni sulla disposizione delle fibre in base a proprietà meccaniche e costi attesi

Grazie a queste proprietà i compositi di questo tipo sono usati negli ugelli dei motori a razzo

Gli ablativi polimerici sono una classe molto ampia di materiali TPS, che si adattano a vari ambienti.

I polimeri si differenziano principalmente per il tipo di matrice polimerica utilizzata:

- non carbonizzabili (termoplastiche) sviluppano composti volatili senza strato di «char» (es politetrafluoroetilene: si decompone oltre 500°C, usato per rivestimenti su sonde in entrata su Venere)
- Carbonizzabili (termoindurenti) si forma «char» sulla parte esterna (resine epossidiche, sostituite poi dalle fenoliche per le buone proprietà meccaniche mantenute dopo formazione strato carbonioso, la grande traspirazione e la formazione di un ulteriore strato di gas che blocca la corrosione chimica)

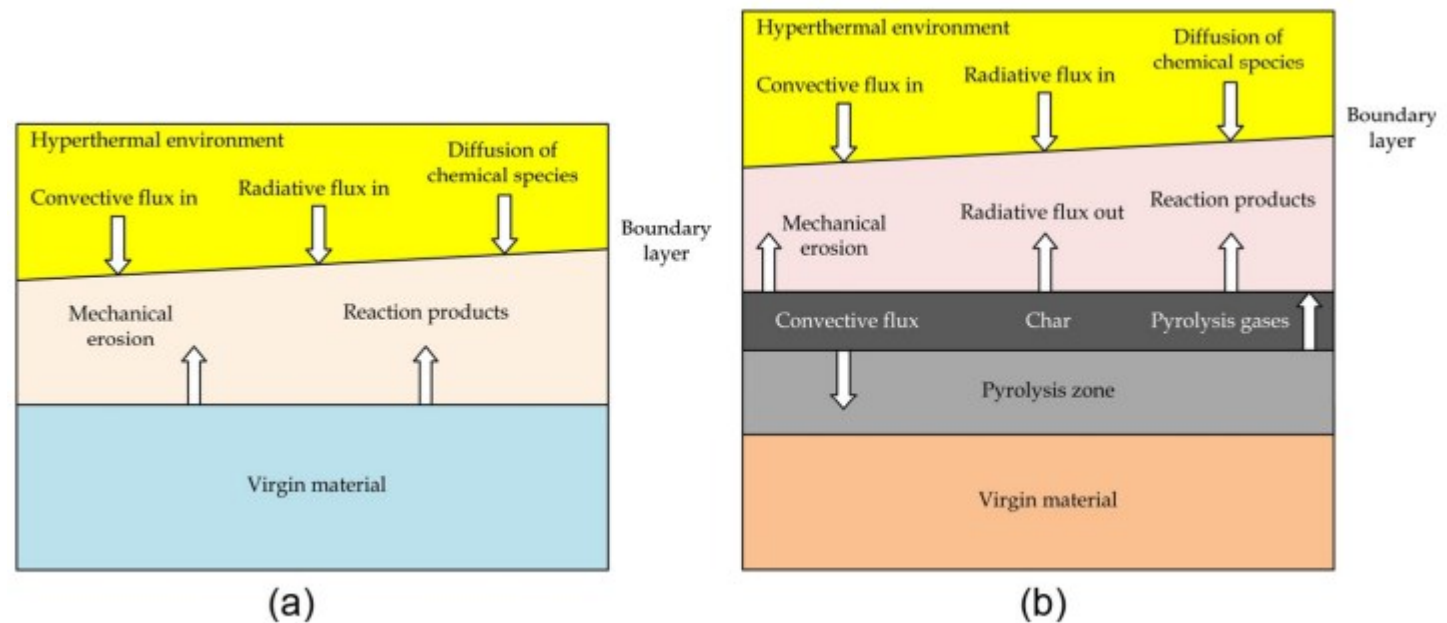


Fig. ablazione per PA senza
formazione di «char» (a) e con (b)

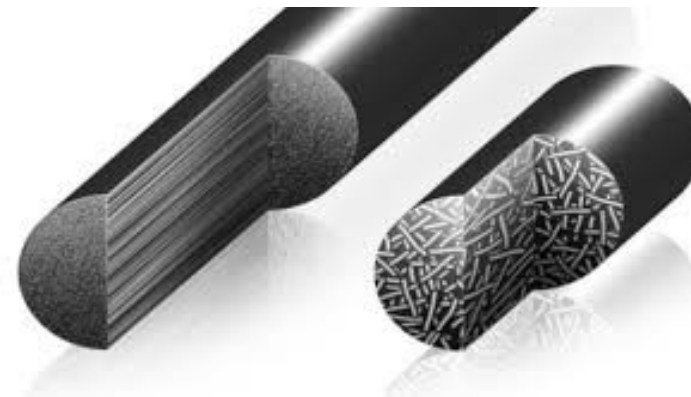
Lo sviluppo maggiore è stato ottenuto aggiungendo delle fibre alla matrice polimerica in quanto possono:

- Aumentare la dissipazione del calore (fibre ad altissima viscosità, ottime le SiO_2)
- Evitare la perdita di materiale (non devono essere posizionate parallele al flusso) dello strato carbonioso perché innalzano le proprietà meccaniche e se molto conduttive termicamente aumentano lo spessore del «char»

Unico svantaggio è l'aumento del peso, generalmente le fibre sono tra il 60 e 75% del peso totale.

I FRPA sono molto vantaggiosi anche in ambienti dove l'erosione è notevole come le gole dei motori a razzo, dove permettono di abbassare i costi e il peso permettendo un ottimo raffreddamento passivo, rendendo inutili i corrispettivi sistemi attivi. Anche nelle gole dei motori però è importante l'orientamento delle fibre rispetto al flusso, infatti con fibre parallele al flusso ho «char» sottile e alta probabilità di sfaldamento, mentre a 60° ho la minore erosione e il maggior spessore di «char».

Fig. fibre disposte parallele all'asse (sx) e disposte casualmente (dx)



Maurizio Natali, Jose Maria Kenny, Luigi Torre, in Progress in material science, vol 84 (2016) p. 192-246

<http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.08.003>

https://it.wikipedia.org/wiki/Sistema_di_protezione_termica_dello_Space_Shuttle

<https://cordis.europa.eu/article/id/429161-hybrid-ceramic-materials-that-take-the-heat-could-enable-hypersonic-flight/it>

<https://c3harme.eu/>

IMAST, Technological District on Engineering of polymeric and composite Materials and Structures,
Napoli

<https://www.imast.biz/images/report.pdf>