

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria aerospaziale

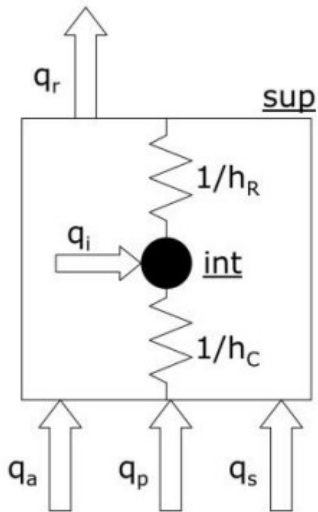
Relazione per la prova finale
**«Scudi termici per il rientro in
atmosfera di veicoli spaziali»**

Tutor universitario: Prof. Bertani Roberta

Laureando: *Sterchele Gianluca*

Padova, 26/09/2023

Possiamo definire «scudo termico» qualsiasi dispositivo che serva a mantenere il range di temperature richiesto per il corretto funzionamento delle apparecchiature del veicolo.



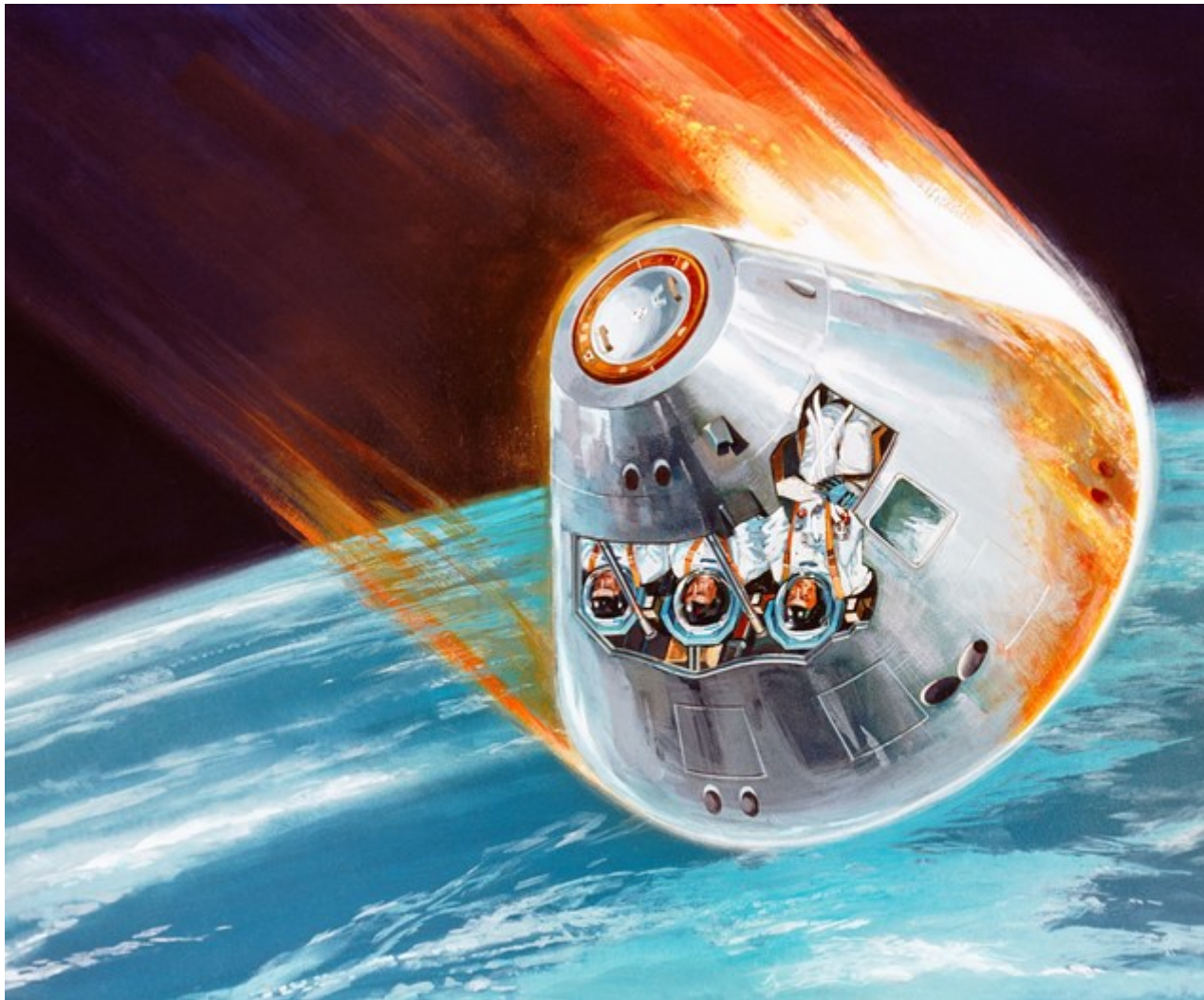
$$\begin{cases} m_{\text{sup}}c_{\text{sup}} \frac{dT_{\text{sup}}}{dt} + m_{\text{int}}c_{\text{int}} \frac{dT_{\text{sup}}}{dt} = q_s + q_p + q_a + q_i - q_r \\ m_{\text{int}}c_{\text{int}} \frac{dT_{\text{int}}}{dt} = h_c(T_{\text{sup}} - T_{\text{int}}) + h_r(T_{\text{sup}}^4 - T_{\text{int}}^4) + q_i \end{cases}$$

- $m_s c_s$: capacità termica sup
- $m_i c_i$: capacità termica int
- h_c : conduttanza sup- int
- h_r : fattore di scambio radiativo
- q_s : flusso solare
- q_a : albedo
- q_p : flusso planetario
- q_i : generazione interna
- q_r : flusso irraggiato dalla S/C



Lo Shuttle esploso in volo

Il suo utilizzo è fondamentale per i rientri in atmosfera, specie se con equipaggio: basti pensare alla tragedia dello Space Shuttle Columbia nel 2003.

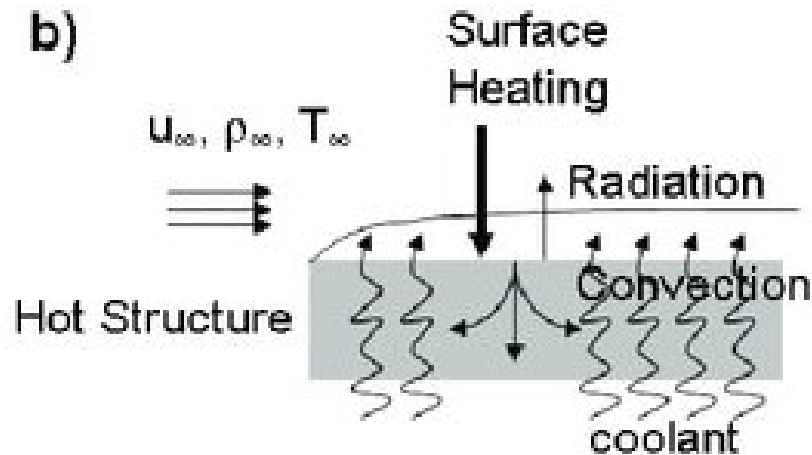
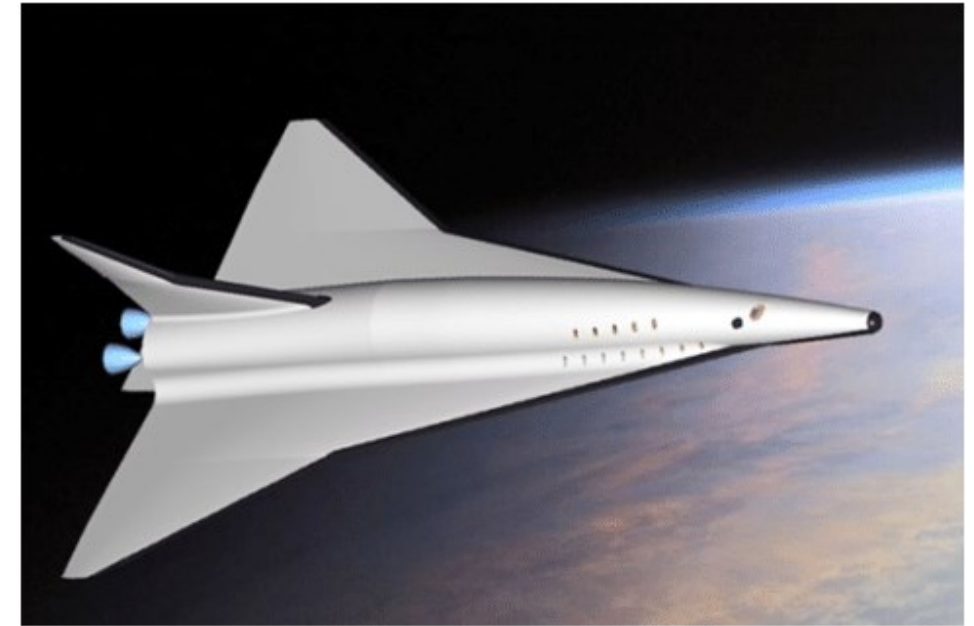


Analisi di caratteristiche e proprietà dei

- Sistemi di protezione riutilizzabili:
 - Sistemi attivi
- Sistemi di protezione non riutilizzabili (Ablativi)
- Altre tipologie di TPS

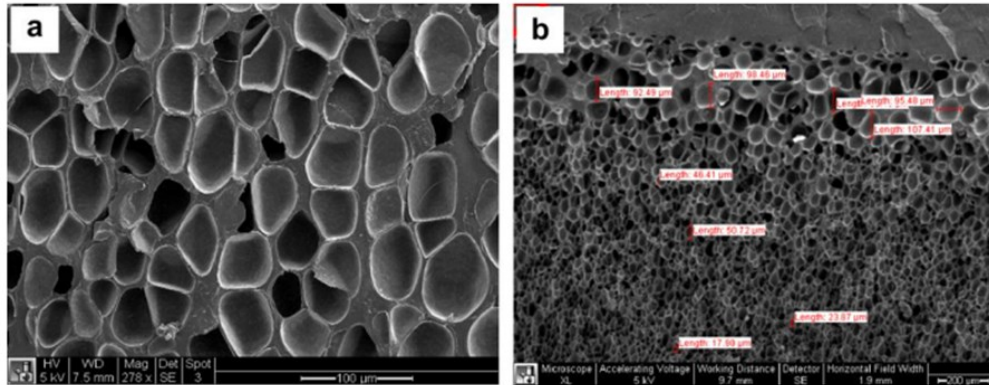
2. Transpiration cooling

A destra: Spaceliner, progetto del DLR, per il cui TPS sono stati svolti degli esperimenti sul transpiration cooling.



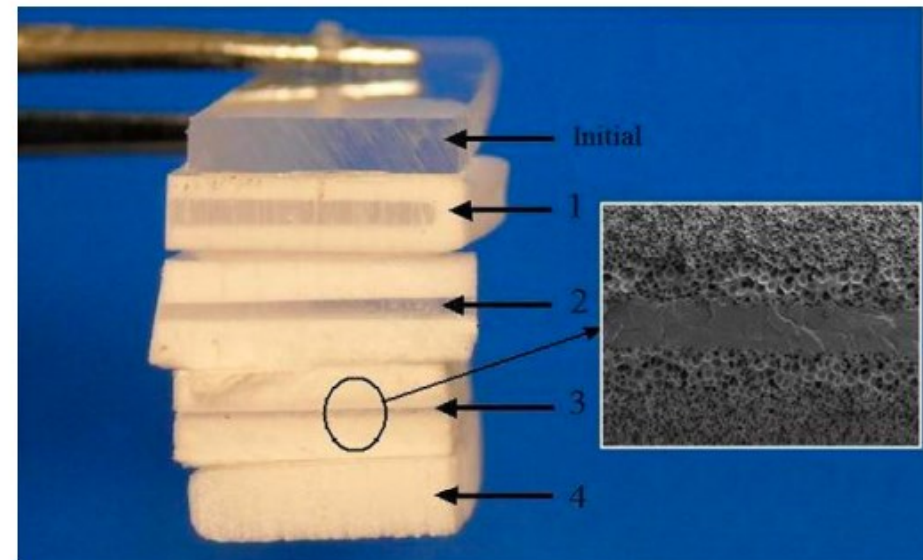
- Sembra essere il più promettente per voli di lunga durata e ad alte temperature (1800K)
- Per **superfici di ampie dimensioni**
- Il liquido refrigerante passa attraverso la **superficie porosa** della struttura e crea un **film esterno**
- Fornisce una protezione esterna dall'ossidazione
- Oltre che per il rientro in atmosfera, è usato in pale di turbine, pareti interne di motori scramjet e bordi d'attacco di alcuni velivoli ipersonici.

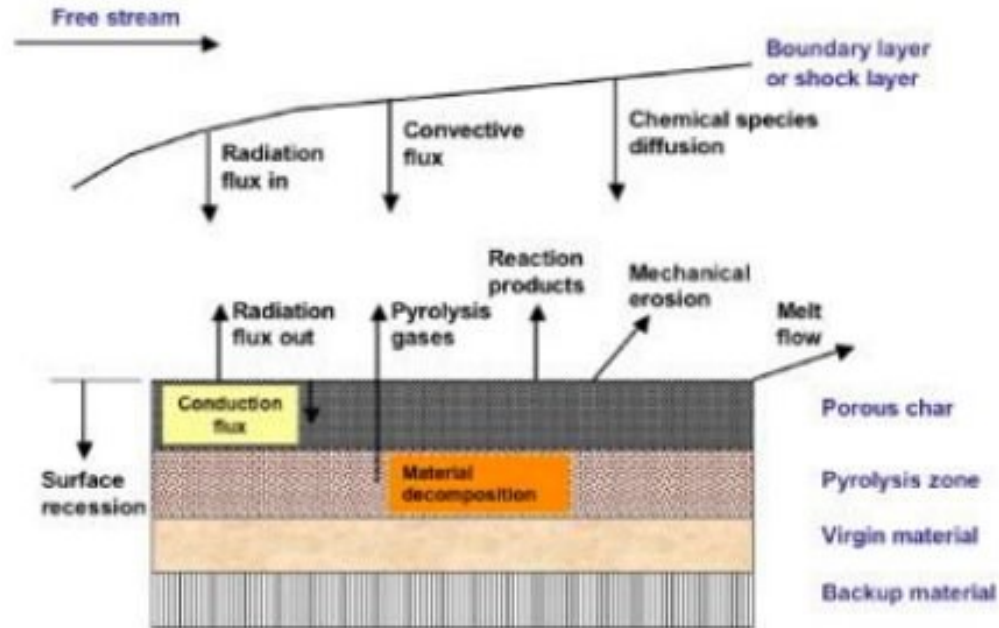
Espansione foam



- Il foam (schiuma polimerica solida) è un materiale utilizzato per l'abbattimento dei costi di sviluppo e di produzione.
- è stata puntata l'attenzione su **materiali polimerici a matrice nanocomposita**.

- l'espansione a foam permette di trasformare un componente in materiale polimerico in una vera e propria schiuma con elevate proprietà e con buone caratteristiche termiche e meccaniche.





Esempio di scudo termico con materiale foam.

1. Una prima fase dell'espansione caratterizzata dalla saturazione del materiale con uno o più *blowing agents*.
2. Con il termine *blowing agent* si intende una sostanza che è capace di produrre una struttura cellulare in un materiale plastico o in una massa gommosa. Ad esempio Ar, N e CO₂

Nel caso di un veicolo per il quale è previsto il rientro in atmosfera, il dimensionamento del sistema di protezione termica viene fatto basandosi sulle condizioni previste per la fase d'ingresso, senza particolari accorgimenti per la fase di ascesa. Durante questa fase, infatti, i carichi sia meccanici che termici sono molto meno gravosi rispetto a quelli presenti in fase di rientro.

Materiale ablativo



Nella parte inferiore dello space shuttle in foto si possono osservare le mattonelle.

- In fisica dello spazio si parla di **ablazione** quando, a causa dell'attrito atmosferico, *un corpo durante il rientro in atmosfera subisce un processo di vaporizzazione ed erosione della superficie.*
- L'evaporazione e la continua rimozione del materiale surriscaldato permettono al corpo di non subire forti variazioni di temperatura nelle zone interne o non raggiunte dall'ablazione: il calore prodotto dall'attrito con l'aria viene rimosso e allontanato insieme al materiale vaporizzato.
- Raggiunta la temperatura di ablazione lo scudo termico va incontro ad un processo di pirolisi durante il quale si forma, sulla superficie, un rivestimento carbonioso (char) attraverso il quale percolano i gas (principalmente idrocarburi) formati in seguito alla degradazione termica della matrice polimerica.



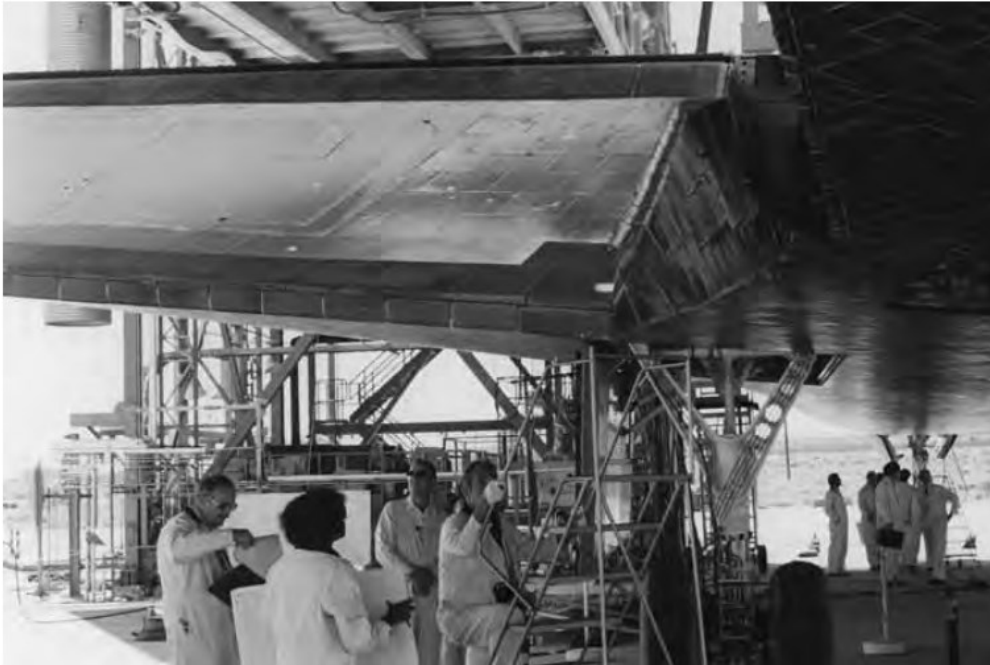
Hot Structure



Struttura per ridurre o eliminare la necessità di un TPS isolato e di un sistema di raffreddamento attivo.



- Costituite con materiali che **assorbono calore e poi lo riemettono tramite irraggiamento** e dunque ad alta emissività come ceramiche o materiali a matrice metallica.
- Riducono la massa del veicolo e migliorano le capacità della missione.
- Usati sia in ambito **spaziale** (come per il caso dello Space Shuttle), che in campo **aeronautico** (come per il Blackbird SR71).



- Quando un veicolo tornava da una missione, i tecnici ispezionavano attentamente e sostituivano le piastrelle del sistema termico di protezione che avevano perso le proprietà meccaniche durante il rientro.

- Un'altra tipologia di hot structures sono le **(HRSI)**, delle mattonelle isolanti riutilizzabili. Vengono realizzate con fibre di silice amorfa al 99,8% a bassa densità ed elevata purezza. Poi vengono rivestite con una miscela di tetrasilicidi in polvere e vetro borosilicato sinterizzato. Infine sono impermeabilizzate utilizzando metiltrimetossisilano riscaldato.
- Nel 1993 è stato sviluppato da NASA Ames un nuovo pannello per resistere ad alte temperature, noto come toughened unipiece fibrous insulation (TUFPI). Questo è il primo materiale composito a gradiente funzionale, nel quale la densità è relativamente alta sulla superficie esterna e diventa sempre più bassa all'interno dell'isolamento. È un materiale molto resistente al danneggiamento ma tende ad ammaccarsi e frantumarsi quando viene colpito.

RCC (Reinforced Carbon Carbon)

Punti di forza:

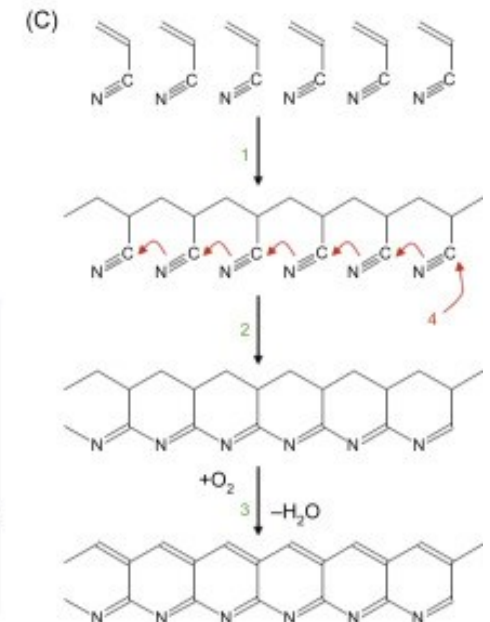
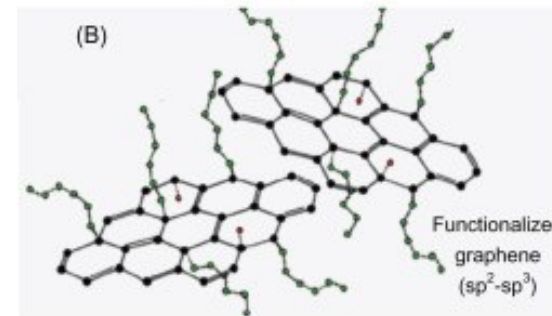
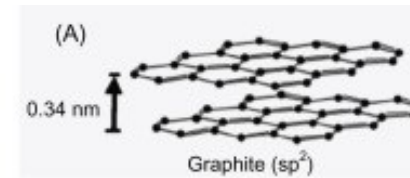
- Adatto ad applicazioni ad alte temperature
 - resistenza a shock termici
 - Basso coefficiente di dilatazione termica
- I materiali carbonio-carbonio mantengono le loro proprietà anche sopra i 2000°C
- Resistono fino a 700MPa

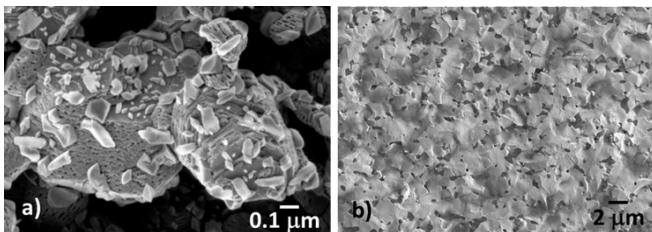
Punti deboli:

Manca di una adeguata resistenza agli urti nonostante sia più resistente di molte altre ceramiche-

**Ampiamente noto per il suo utilizzo sul cono del muso e i bordi d'attacco dello Space Shuttle Columbia.*

Materiale composito costituito da un **rinforzo in fibra di carbonio** in una **matrice di grafite**, spesso con un rivestimento in **carburo di silicio** per prevenire l'ossidazione. La fabbricazione del RCC, viene processato in autoclave, polimerizzato e pirolizzato per convertire la resina in carbonio.





UHTC (Ultra-High Temperature Ceramics)

- Esse sono in grado di resistere a temperature elevate, oltre i 2000 °C e temperatura di fusione oltre i 3000 °C
- Sono dotate di buona conducibilità termica
- Però sono vulnerabili all'ossidazione e poco resistenti a frattura.

UHTCMC (Ultra-High Temperature Ceramic Matrix Composites)

- elevato contenuto di fase ultra-refrattaria UHTC (fino a 60%) e perfetta omogeneizzazione della fibra con la fase ceramica
- consolidamento per sinterizzazione veloce, il che comporta notevole riduzione dei tempi di produzione
- assenza di porosità, necessaria per ottenere un'eccezionale resistenza ad usura
- assenza di rivestimenti protettivi (non necessari per le caratteristiche del materiale)
- miglioramento delle proprietà meccaniche e stabilità all'aumentare della temperatura
- ottima lavorabilità per ottenere forme complesse.

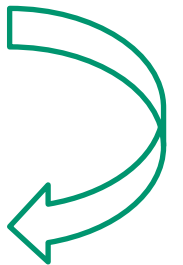
Insulated Structure

- Solitamente composti da più strati:
Interno: funge da isolante
Esterno: di materiale riflettente
- I materiali usati sono ceramici e compositi o il vuoto.

Utilizzo di materiali a bassa conducibilità termica. Questi vengono usati come rivestimento per isolare la struttura sottostante

Uno sviluppo della NASA: il **TUFROC**
(Toughened Uni-piece Fibrous Reinforced Oxidation-resistant Composite)

- Sistema di protezione termica riutilizzabile e resistente all'ossidazione
- Resistente alle sollecitazioni meccaniche in salita e al riscaldamento estremo e allo stress del rientro
- Applicabile al bordo d'attacco per usi con riscaldamento estremo (può sopportare anche temperature fino a 2300 K, anche se per brevi periodi di tempo).





Il focus sulle protezioni termiche e sugli atterraggi non è di certo di secondaria importanza.

Come riportato da un recente studio: «l'ambiziosa visione esplorativa della NASA richiede continue innovazioni dei TPS.»

Molte missioni future richiedono nuovi materiali o nuove versioni di materiali già esistenti.

Oltre a nuove tecnologie sono richieste anche nuove strutture e nuovi modelli di analisi. TPS sempre più avanzati e migliorati porteranno beneficio ad una vasta gamma di missioni.

- [1] <https://aerospacecue.it/scudo-termico-veicoli-spaziali-atmosfera/29452/>
- [2] http://www.antonio.licciulli.unisalento.it/Corso_Ceramici/relazioni/Scudi%20termici.pdf
- [3] <https://www.astropace.it/2022/05/02/la-guida-completa-al-sistema-di-protezione-termica-di-un-mezzo-spaziale/>
- [4] <https://textechindustries.com/blog/thermal-protection-systems-materials/>
- [5] <http://wwwdisc.chimica.unipd.it/grsp/pubblica/ricerca%20nanocompositi.htm>
- [6] http://www.castfvg.it/articoli/tesi/tesi_04.pdf
- [7] <https://www.retealtatecnologia.it/pdf/21829>
- [8] <https://www.esa.int/esapub/bulletin/bullet87/paroli87.htm>
- [9] “Space materials handbook”
- [10] https://www.chemeurope.com/en/encyclopedia/Reinforced_carbon-carbon.html
- [11] <https://www.addere.com/inconel-in-aerospace-applications>
- [12] Coming Home, Reentry and Recovery from Space. NASA.