

ANALISI DELLA DEGRADAZIONE DELLE PROPRIETÀ MECCANICHE DI LAMINATI SANDWICH ESPOSTI A CONDIZIONI DI ALTO VUOTO.

G. Allegri^(*), E. Cirinei^(*), S. Corradi^(*), M. Marchetti^(*), V. Milinchuk^(**)

^(*)Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale ed Astronautica, Università di Roma "La Sapienza"
Via Eudossiana 18, 00184 Roma
e-mail: marchetti@aerorisc.ing.uniroma1.it

^(**)Obninsk Institute of Nuclear Power Engineering, Obninsk, Russian Federation

Sommario.

Campioni di materiale sandwich con pelli ed honeycomb in fibra di carbonio sono stati esposti a condizioni di alto vuoto mediante il simulatore spaziale SAS, in dotazione al Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale ed Astronautica dell'Università di Roma "La Sapienza". L'integrità strutturale post – esposizione dei campioni è stata verificata mediante prove statiche di trazione frontale, "flatwise tests" ASTM C297, eseguite sui provini: si è riscontrata una notevole variazione del carico di rottura a trazione frontale del materiale, conseguente al processo di desorbimento di sostanze volatili, "outgassing", che caratterizza l'esposizione in vuoto di materiali compositi a base polimerica. Tale scadimento del "flatwise strength" è strettamente correlato al numero di ore di esposizione in vuoto. È stato inoltre evidenziato come il danneggiamento da "outgassing" sia comunque valutabile anche mediante test di ciclatura termica in atmosfera standard, meno onerosi in termini sia di tempi che di costi rispetto all'esposizione a condizioni di alto vuoto.

1. Introduzione.

I laminati sandwich sono frequentemente impiegati nella realizzazione di strutture spaziali, in virtù delle loro elevate caratteristiche meccaniche specifiche: tale tipologia di materiali ha subito delle radicali evoluzioni nel corso degli ultimi dieci anni, legate soprattutto alla sostituzione del convenzionale nido d'ape in alluminio con honeycomb in materiale composito fibro – rinforzato. Ciò ha permesso di uniformare le caratteristiche termo-meccaniche del laminato sandwich, in particolar modo per quanto concerne il coefficiente di dilatazione termica dei materiali impiegati: di conseguenza è stato possibile ridurre notevolmente le deformazioni conseguenti all'azione di carichi termo-elastici agenti sulla struttura. Tale risultato è di particolare rilievo nella realizzazione di elementi quali riflettori d'antenna per applicazioni spaziali, poiché l'uniformità del coefficiente di dilatazione termica del materiale assemblato consente di minimizzare le eventuali distorsioni della geometria del componente citato, ottimizzandone le prestazioni sia in ricezione che in trasmissione.

L'esposizione a condizioni di alto vuoto provoca una sensibile degradazione delle caratteristiche meccaniche dei materiali compositi a base polimerica: tali effetti dipendono essenzialmente dalla sublimazione della matrice, altrimenti detta "outgassing". I materiali compositi per applicazioni spaziali sono certificati in funzione di proprietà di ridotto outgassing, particolarmente stringenti per le resine strutturali: il soddisfacimento di tali requisiti, tuttavia, non garantisce la stabilità dimensionale dei laminati sandwich, in quanto i vari materiali assemblati nel manufatto finale possono risentire in modo differenziato degli effetti dell'esposizione al vuoto.

2. Il materiale sandwich: fabbricazione dei campioni.

Il materiale preso in considerazione nel presente lavoro è costituito dall'accoppiamento di pelli carbon-epossidiche, accoppiate con un honeycomb a base di resina policianata, anch'esso rinforzato mediante fibre di carbonio. Tale sandwich viene realizzato da Alenia Spazio S.p.a., mediante un processo semi-automatizzato, in cui si distinguono due diverse fasi di cura, entrambe necessarie per l'assemblaggio del materiale finale. Una prima fase di pre-reticolazione è infatti necessaria per incollare l'adesivo strutturale sull'honeycomb: tale operazione viene eseguita mediante un processo

semi-automatizzato, mediante una macchina riscaldatrice a getto d'aria calda appositamente sviluppata. La seconda fase del processo consiste in un più tradizionale assemblaggio dell'honeycomb e delle pelli mediante sacco a vuoto in autoclave. La fase di pre-reticolazione del materiale si rende necessaria in quanto consente di ottimizzare le prestazioni dell'adesivo strutturale impiegato per incollare l'honeycomb alle pelli: infatti tale processo permette di creare un menisco di adesivo parzialmente reticolato sul bordo di ciascuna cella del core del materiale, ovvero nelle regioni in cui effettivamente avviene il trasferimento dei carichi dalle pelli all'honeycomb e viceversa. L'automatizzazione della fase di pre-reticolazione garantisce l'ottenimento di una geometria regolare del menisco adesivo, che è condizione necessaria per avere un comportamento meccanico sostanzialmente omogeneo del sandwich: tale risultato è invece difficilmente conseguibile trattando manualmente l'adesivo e, quindi, le proprietà meccaniche finali del materiale sono in tal caso fortemente dipendenti dalla perizia dell'operatore. Una discussione più dettagliata delle metodologie avanzate di manifattura di sandwich per applicazioni aerospaziali è reperibile in [11] e [12].

I campioni oggetto dell'attività di ricerca presentata nell'ambito di questo lavoro sono stati assemblati a partire dai seguenti materiali:

1. Pelli: HEXCEL T300 3K, percentuale volumetrica della fibra 60% , laminazione [0/90/90/0]₄, 0.72 mm di spessore, ;
2. Honeycomb YLA UCF51 3/8" 2.0 Plasma Treated: carbonio-resina policianata, percentuale volumetrica della fibra 60%, laminazione [+45/-45]₂, 0.10 mm di spessore;
3. Adesivo strutturale Skin-Core: resina epossidica 3M AF191U.

Le caratteristiche meccaniche dei materiali appena elencati sono riportate in tab. 1. I provini soggetti alle prove di trazione frontale avevano pianta quadrata, con lato pari a 5 cm.

<i>Materiali</i>	E₁	E₂	G₁₂	ν₁₂	X_t	X_c	Y_t	Y_c	S
<i>Unità</i>	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	-	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
T300 3K Carbon Epoxy	200000	5000	6000	0.35	810	530	75	140	120
YLA UCF51 Carbon Polycyanate	327000	5860	4140	0.36	2192	405	44	205	90
Adhesive 3M AF191U	2600	2600	1000	0.3	30	55.1	30	55.1	10.5

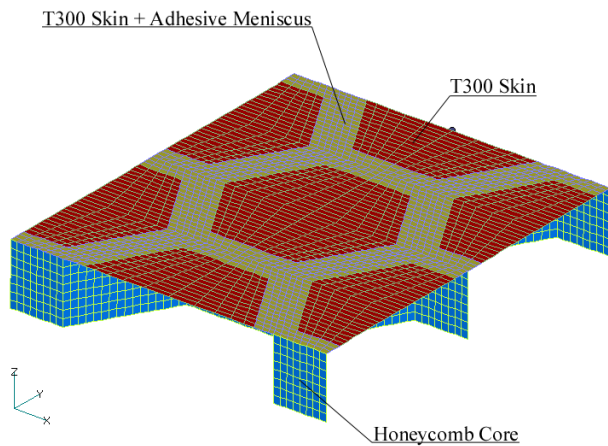
Proprietà meccaniche dei costituenti il sandwich

Tab.1

3. Il “flatwise test”: proprietà meccaniche dei provini vergini.

L'adozione di materiali sandwich è generalmente finalizzata al conseguimento di elevati valori di rigidità flessionale a fronte di pesi contenuti: il materiale oggetto della presente analisi viene correntemente impiegato per la produzione di riflettori d'antenna da impiegare in orbita GEO. Tale “environment” è caratterizzato da carichi meccanici estremamente contenuti, ma da considerevoli shock di tipo termico, conseguenti alla alternanza di condizioni di pieno irraggiamento solare e di ombra completa. Conseguentemente la struttura è soggetta a sollecitazioni termo-elastiche cicliche,

che possono comprometterne nel tempo la stabilità dimensionale. ‘E altresì vero che un riflettore per applicazioni spaziali è usualmente provvisto di dispositivi di controllo termico passivo, quali sunshield e blankets, che consentono di ridurre considerevolmente il range di variazione della



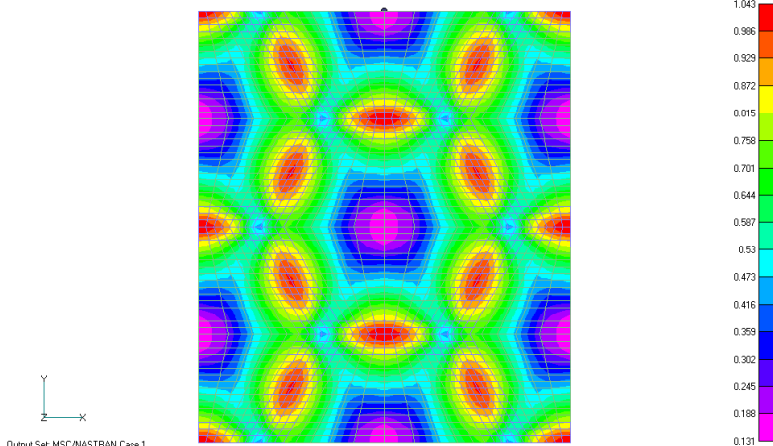
Modello FEM del provino
Fig. 1

temperatura cui la struttura va soggetta. L'impiego del "flatwise test" è finalizzato alla valutazione delle proprietà di adesione fra pelli e core di un qualsivoglia sandwich, che dipendono sia dai materiali impiegati, sia dal processo di manifattura cui si fa ricorso: è quindi del tutto naturale che tale tipologia di caratterizzazione statica del materiale trovi estesa applicazione nella qualifica industriale di processi per la produzione di sandwich, tanto da trovare una precisa standardizzazione ASTM. Più complessa è la valutazione del perché una prova di trazione frontale del materiale possa fornire delle importanti indicazioni nell'ambito delle costruzioni spaziali: la risposta sta nel fatto che buone proprietà di adesione sono generalmente condizioni necessarie per

garantire la sostanziale integrità sul lungo periodo del sandwich stesso, a prescindere dalle particolari finalità applicative cui il materiale è destinato. In secondo luogo, l'esperienza maturata da Alenia Spazio S.p.a. in merito alla realizzazione di riflettori spaziali ha consentito di individuare delle precise correlazioni fra i valori di flatwise strength del sandwich e la durata della vita operativa del componente finale in ambiente orbitale: tali considerazioni di carattere prettamente

empirico consentono comunque di indirizzare la procedura di qualifica industriale in modo da ottenere materiali compatibili con l'impiego nelle condizioni caratteristiche dell'environment spaziale.

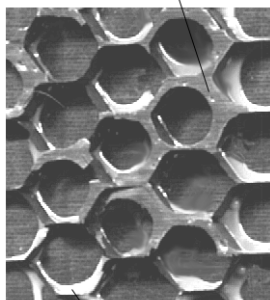
La massimizzazione della resistenza a trazione frontale del sandwich in esame è stata ottenuta agendo sui parametri caratteristici del processo di pre-reticolazione dell'adesivo strutturale epossidico: tale procedura di ottimizzazione è stata supportata sia dall'attività sperimentale diretta, sia dall'esecuzione di simulazioni agli elementi finiti del "flatwise" test. Un



Analisi FEM: andamento dell'indice di rottura
Fig. 2

particolare del modello impiegato per le simulazioni numeriche e riportato in fig. 1. ‘E stato riscontrato che la massimizzazione della resistenza a trazione frontale corrisponde alla condizione in cui il menisco adesivo e l'honeycomb non sono interessati da rottura, ma il cedimento avviene nelle pelli per delaminazione degli strati. Tale conclusione si giustifica alla luce del fatto che la rigidità a trazione sia dell'honeycomb che dell'adesivo è notevolmente inferiore a quella caratteristica delle pelli, che quindi, a parità di deformazione imposta, sono interessate da sforzi molto più consistenti, in particolar modo fra lamina e lamina. In fig. 2 è riportato l'andamento dell'indice di rottura del laminato costituente le pelli, calcolato impiegando il criterio di Hoffman per un valore del carico di trazione frontale di 1.4489 N/mm^2 , pari al valore medio del flatwise strength per provini vergini. I massimi valori di tale indice corrispondono a sforzi di taglio

delaminated skin



bonding meniscus

Provino dopo la rottura

Fig. 3

interlaminare fra gli strati a 0° e quelli a 90° : pertanto si può concludere che il modo di rottura del provino è dominato dalla resistenza a taglio della matrice costituente le pelli. Tale conclusione è suffragata anche dall'esame visivo della fig. 3, in cui è riportata la foto di un campione rotto a trazione frontale: tale immagine mostra una evidente delaminazione delle pelli, localizzata peraltro nelle aree in cui, secondo i risultati FEM in fig. 2, si raggiungono i valori massimi dell'indice di rottura stesso.

Si può inoltre osservare che né il menisco adesivo, né l'honeycomb sono interessati da cedimenti, come peraltro riscontrabile da ulteriori risultati dell'analisi FEM che vengono omessi per brevità: per una più approfondita discussione si rimanda comunque ai riferimenti [11] e [12]. In conclusione è opportuno notare che il modo di cedimento dei provini è strettamente correlato alla

massimizzazione della resistenza a trazione frontale del sandwich: pertanto qualsiasi alterazione di tale modalità qualitativo di cedimento corrisponderà necessariamente ad una sensibile riduzione del "flatwise strength" del materiale, come verrà in seguito evidenziato.

4. Il simulatore SAS.

Il simulatore di ambiente spaziale SAS, concepito per la "ground simulation" dell'ambiente spaziale e quindi per riprodurre e studiare i fattori che lo caratterizzano, è costituito da un impianto base, ovvero dalla camera per alto vuoto e dal relativo sistema di pompaggio, e da un insieme di accessori finalizzati alla riproduzione delle componenti caratteristiche dell'ambiente spaziale. Questi ultimi consistono in un simulatore solare, basato sull'impiego di lampade allo Xenon, e da una sorgente ionica a radiofrequenza, che produce un flusso stabile di ossigeno monoatomico con spettro energetico comparabile a quello caratteristico delle orbite LEO.



Il simulatore dell'ambiente spaziale SAS

Fig. 4

Il corpo centrale della camera (in ferro) è di forma cilindrica, di lunghezza 250 cm e diametro interno 150 cm, con una parte terminale di forma troncoconica lunga circa 40 cm, che a sua volta termina con una flangia, che è chiusa all'estremità da un disco metallico imbullonato alla flangia stessa. Il volume complessivo è di circa 4.7 m^3 . La fotografia del corpo della camera è riportata in fig.4. Sul lato destro sono presenti due oblò del diametro di circa 40 cm in materiale plastico trasparente (plexiglas), al di sotto dei quali si trova una flangia chiusa sulla quale attualmente si trova una delle due teste di misurazione, che forniscono la misura del livello di vuoto nella camera.

Sul lato sinistro, vicino al portellone è presente un altro oblò, necessario per l'osservazione delle operazioni all'interno della camera. Nella parte posteriore ad un'altezza medio-alta si trova la flangia di collegamento al condotto del sistema di pompaggio.

Il portellone, situato nella parte anteriore, è di diametro leggermente più grande a quello della camera, va a chiudere a battuta su di essa e può essere bloccato attraverso opportune grosse viti su cui vengono strette delle manopole a farfalla. E' importante notare che il ruolo svolto dal serraggio si ha unicamente nella parte iniziale della procedura di creazione del vuoto. Subito dopo, infatti, le manopole vengono allentate in quanto la tenuta è assicurata dalla pressione esterna stessa; questo per evitare un eventuale blocco del portellone nel momento in cui per errore le manopole di serraggio vengano strette quando è già presente all'interno un buon livello di vuoto. Infatti in tal

caso facendo risalire la pressione in camera si avrebbe il blocco del sistema di serraggio e di conseguenza l'impossibilità di riaprire la camera, a meno di un nuovo processo di depressurizzazione ad un livello più basso del precedente.

L'intera struttura della camera è sostenuta da un sistema di travature metalliche cave, ma molto resistenti dato il peso notevole che devono sopportare.



Impianto di pompaggio del SAS

Fig. 5

Il SAS è dotato di un sistema di pompaggio, la cui fotografia è riportata in fig. 5, costituito dalla disposizione in serie di una pompa rotativa di prevuoto e di una pompa Roots che ci permette di arrivare a livelli di medio-alto vuoto.

La pompa rotativa è una V-2LA delle Officine Galileo a rotore eccentrico, detto pure a pistone rotante, del tipo bistadio, perché le camere lavorano in serie formando due stadi di compressione. E' dotata di zavorratore d'aria, una valvola che permette l'immissione nella camera della pompa, prima che inizi la fase di compressione, di una quantità d'aria opportunamente dosata in modo tale da ridurre sensibilmente il rapporto di compressione. In tal modo i vapori eventualmente aspirati non potranno più condensare, purché la pressione

parziale di questi vapori non superi un certo valore che rappresenta la massima tensione di vapore ammissibile per l'impianto in questione.

Questa pompa può operare in un campo di pressioni che va da quella atmosferica fino a $10 \div 0.1$ Pa. In condizioni ottimali la velocità di pompaggio rimane circa costante dalla pressione atmosferica fino a circa $10 \div 1$ Pa e quindi subisce un rapido calo fino al valore della pressione limite che è di circa $5 \cdot 10^{-1}$ Pa. La pressione limite ottenibile dipende essenzialmente dalla necessità di avere elevatissimi rapporti di compressione (fino anche a $10^5 \div 10^6$) per scaricare il gas nell'atmosfera esterna, dai problemi di tenuta tra pistone e parete della camera in cui avviene la compressione, dalla tensione di vapore dell'olio usato per la lubrificazione, dalla condensazione di vapori (dal momento che la pompa opera in compressione) con conseguente impossibilità o grande difficoltà ad eliminarli dal sistema da vuoto. Proprio per questi motivi si ricorre al dispositivo a zavorra d'aria.

La pompa Roots è una V-22-CA delle Officine Galileo. Questo tipo di pompa meccanica ha una più che apprezzabile applicazione nel campo dei medi vuoti soprattutto quando si tratta di trasferire grandi quantità di gas, come nel caso del SAS date le dimensioni della camera. A causa l'impossibilità per la pompa in questione, di operare a partire dalla pressione atmosferica, è necessario l'utilizzo della pompa preliminare descritta in precedenza: l'adozione combinata dei due dispositivi permette di raggiungere pressioni limite dell'ordine di 10^{-2} Pa. La messa in funzione della pompa Roots si ha quando la pressione del sistema è già stata diminuita intorno ai 100 Pa. La pompa stessa è costituita essenzialmente da due rotori a forma approssimativamente di otto, rotanti in senso opposto in una camera, che è connessa da una parte al sistema di vuoto e dall'altra alla pompa preliminare. I rotori non si toccano tra loro, ne toccano le pareti della camera; il gioco tra i rotori e la parete e tra rotore e rotore è di alcuni decimi di millimetro o meno, in tale modo il movimento dei rotori avvenga senza attrito e senza necessità di lubrificazione. Il gas da pompare viene aspirato attraverso l'imboccatura della pompa, intrappolato e compresso nel volume operativo compreso tra un rotore e la semicamera ed, infine, scaricato verso la pompa preliminare attraverso il condotto che le collega.

Il rapporto di compressione ottenibile dipende dal gioco tra i rotori e tra rotori e parete della camera ed anche dalla pressione prodotta dalla pompa preliminare. La velocità di pompaggio effettiva e la

pressione limite della Roots dipendono sensibilmente dalle caratteristiche della pompa preliminare usata.

Il sistema di misurazione del SAS è composto da due tipi di vacuometri. Il primo è un vacuometro del tipo Bourdon la cui testa di misurazione è situata sul condotto di collegamento tra la pompa Roots e la camera. E' possibile effettuare la lettura diretta sul manometro per seguire le variazioni di pressione tra 760 e 0 torr, ma si ha anche una uscita digitale che permette di rilevare con adeguata precisione misurazioni fino ad 1 millibar (100 Pa, 10^{-3} atm., 0.75 torr). Il secondo è un vacuometro del tipo Pirani che da misure di pressioni per un intervallo compreso tra $10^3 \div 10^{-2}$ Pa ($10^1 \div 10^{-4}$ millibar). Questo tipo di vacuometro permette la determinazione della pressione, in modo indiretto, utilizzando la relazione esistente tra pressione e conducibilità termica del gas al di sotto di certe pressioni. Complessivamente il SAS dispone di tre teste di misurazione Pirani in punti differenti del sistema da vuoto per poter valutare in queste posizioni il livello di vuoto locale. La prima è situata tra la pompa rotativa e la pompa Roots ed è necessaria per rilevare la pressione del prevuoto ottenuta con la rotativa per poter, ad un livello di pressione adeguato, azionare la pompa Roots. Le altre due invece sono quelle adibite alla misurazione vera e propria della pressione in camera. Una è situata subito sopra la pompa Roots e fornisce il valore della pressione subito prima dell'uscita dell'aria dalla camera e dell'ingresso nella pompa Roots. L'altra invece si trova nel punto in cui teoricamente si hanno i valori più alti della pressione in camera, e cioè dal lato opposto della camera vicino al portellone.

5. Metodologia di esposizione e test dei provini di materiale sandwich.

Da un pannello di materiale sandwich sono stati ottenuti 45 provini così suddivisi in base al tipo di caratterizzazione a cui sono stati sottoposti:

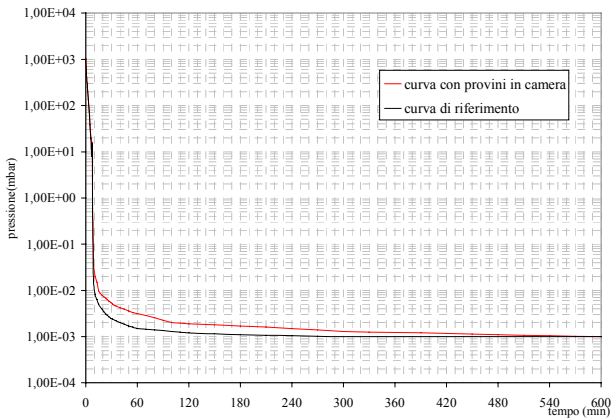
- 15 provini sono stati sottoposti direttamente a prova di qualifica secondo il "flatwise test" in accordo con la normativa ASTM C 297 (quindi vengono testati senza aver subito alcun trattamento supplementare), per verificarne il carico di resistenza a rottura nella direzione normale al piano del provino, il modo di rottura che interviene e la validità o meno dell'incollaggio;
- 15 provini vengono prima sottoposti a ciclatura termica e successivamente alla prova "flatwise" per verificare la variazione delle proprietà sopra elencate in seguito a questo trattamento e per poter avere una serie di dati di confronto con l'esposizione al vuoto;
- 15 provini infine sono esposti al vuoto in camera, essendo a loro volta suddivisi in tre gruppi in base al tempo di esposizione, e successivamente testati mediante la prova "flatwise", per verificare la degradazione della resistenza a trazione frontale.

E' stata utilizzata una curva di vuoto empirica di riferimento per il SAS, determinata nell'arco di una lunga fase di sperimentazione e sviluppo, per poter confrontare questa situazione base con l'esposizione a vuoto di campioni di materiale. Si è inoltre proceduto a rilevare l'andamento della pressione durante le prove di vuoto con campioni di materiale in camera. Le rilevazioni delle pressioni sono riportate in fig. 6.

Come precedentemente evidenziato si è anche operata un'ulteriore suddivisione e catalogazione dei provini in base al tempo di esposizione in camera:

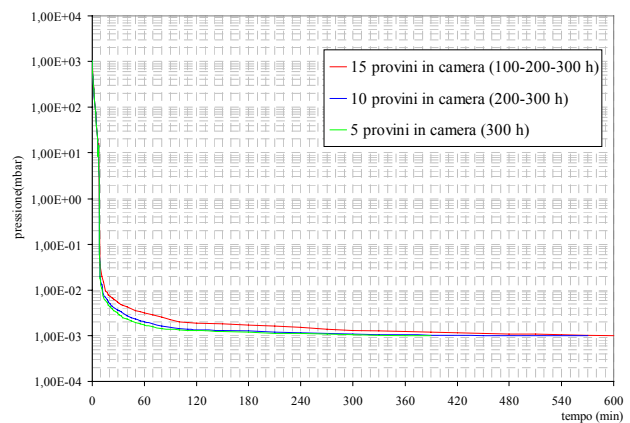
- **5** provini sottoposti per **100 h** al livello di vuoto massimo ottenibile dall'attuale configurazione del SAS;
- **5** provini sottoposti per **200 h** nelle stesse condizioni;
- **5** provini sottoposti per **300 h** nelle stesse condizioni;

Il tempo complessivo di esposizione è stato valutato sommando i singoli tempi giornalieri durante i quali il sistema da vuoto operava in pieno funzionamento, mantenendo la pressione limite



Curva di riferimento del SAS

Fig. 6



Outgassing: effetto numero campioni

Fig. 7

costantemente al di sotto di 10^{-3} mbar (e quindi nel campo dei 10^{-4} mbar). Giornalmente è stato possibile far lavorare la macchina tra le 10 e le 14 ore, per cui nell'arco di circa cinque settimane è stata ultimata l'esposizione di tutti i provini.

La procedura di inserimento ed estrazione dei provini è stata realizzata secondo questo ordine di operazioni:

- inserimento di tutti e quindici i provini in camera suddivisi in base alle ore di esposizione a cui dovevano essere sottoposti;
- creazione del livello di vuoto minimo e inizio conteggio del tempo di esposizione;
- dopo le prime 100 h, calcolate come spiegato in precedenza, estrazione del primo gruppo di provini;
- dopo 200 h, estrazione del secondo gruppo di provini;
- dopo 300 h, estrazione dell'ultimo gruppo di provini e termine della prova.

Allo scopo di dimostrare la notevole influenza sull'andamento della pressione che si ha proprio a causa dell'outgassing dei provini si è proceduto alla rilevazione della curva di vuoto relativa al primo giorno di esposizione in camera. Questa risulta infatti la più significativa, rispetto a quelle ottenute nei due giorni in cui si è ripartito dalla pressione atmosferica, per il fatto che nei due casi successivi i provini lasciati all'interno della camera avevano parzialmente desorbito le componenti volatili in essi inizialmente contenute.

Quindi, dal confronto tra tale curva e quella di riferimento per il SAS, è possibile individuare qualitativamente l'influenza dell'outgassing, poiché si ha in più il flusso di degasamento dei campioni di materiale, che comporta un notevole innalzamento della curva di vuoto. Nel grafico in fig. 7, invece, sono state rappresentate e confrontate le tre curve di vuoto ottenute rispettivamente:

- all'inizio effettivo delle prove di vuoto con tutti e 15 i provini in camera;
- all'inizio della seconda fase dopo l'estrazione dei primi 5 provini (100 h), ricreando nuovamente il vuoto in camera per quelli esposti a 200 h e 300 h (10 provini);
- all'inizio della terza fase dopo l'estrazione di ulteriori 5 provini (200 h), ricreando nuovamente il vuoto in camera per gli ultimi 5 esposti a 300 h.

La prima curva ci permette effettivamente di determinare qualitativamente l'outgassing generato da 15 provini a partire dalla pressione atmosferica, fino a quella limite, mentre negli altri due casi la situazione è leggermente differente. Si ha, infatti, un abbassamento delle due curve successive rispetto a quella iniziale e deve essere valutato considerando più fattori. Innanzi tutto, il numero dei

provini in camera diminuisce prima a 10 e poi a 5 unità, di conseguenza, a parità di condizioni, l'outgassing ad essi correlato dovrebbe subire un decremento prima del 33% e poi del 66%, che automaticamente comporta un abbassamento delle curve. In realtà, poi, la reale misura di questo decremento dipende dall'ulteriore fatto che le due prove successive ripartono da una situazione in cui i provini rimanenti hanno già subito un notevole degasamento iniziale nei primi periodi di esposizione. Questi due fattori dimostrano il notevole avvicinamento delle curve a quella di riferimento e, di conseguenza, il fatto che l'outgassing decresce notevolmente all'aumentare del tempo di esposizione tendendo ad una situazione di equilibrio. In una situazione limite, infatti, in cui si supponga che i provini vengano esposti per un determinato tempo (che possiamo anche chiamare tempo di equilibrio) e successivamente venga di nuovo effettuata una prova di vuoto a partire dalla pressione atmosferica, la curva determinata in seguito a quest'ultima prova ricalcherebbe in pratica quella di riferimento.

6. Effetto dell'esposizione al vuoto e della ciclatura termica sul flatwise strength.

Tutti e 45 i provini sono stati sottoposti alla prova "flatwise". I primi 15 non sono stati sottoposti ad alcun trattamento, mentre il secondo gruppo è stato appositamente sottoposto ad una ciclatura termica con queste caratteristiche:

N° cicli:	20
Durata stasi delle T estreme:	60 min
Temperature estreme:	$T_{\min} = -180^{\circ}\text{C}$; $T_{\max} = +150^{\circ}\text{C}$
Gradiente di riscaldamento/raffreddamento:	2 °C/minuto

Il tipo di ciclo effettuato su questo gruppo di provini risulta essere sufficientemente rappresentativo degli attuali carichi termici a cui sono sottoposti i materiali e le strutture nell'ambiente spaziale. Inoltre fornisce un utile strumento di confronto tra la degradazione delle proprietà meccaniche dei campioni di materiale sandwich considerati che si ha appunto in seguito a ciclatura termica e quella che deriva invece dall'esposizione degli stessi al vuoto.

Nella tabella sottostante sono riportati i valori medi e la deviazione standard del carico di rottura per il test "flatwise" per i cinque casi considerati:

Tipo di prova	σ_3 Medio		Deviazione standard	
	Kgf/mm ²	N/mm ²	Kgf/mm ²	N/mm ²
A) Non trattati	0.1477	1.4489	0.0142	0.1393
B) Cycl. Term	0.0906	0.8888	0.0160	0.1570
C) Vuoto 100 h	0.1008	0.9888	0.0077	0.0755
D) Vuoto 200 h	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
E) Vuoto 300 h	0.0862	0.8456	0.0086	0.0844

Risultati riassuntivi delle prove "flatwise"

Tab. 2

Come si può notare da questa tabella e dalle successive, il test relativo ai provini esposti al vuoto per 200 h, non è riuscito a causa di una cattiva esecuzione della procedura di incollaggio agli afferraggi della macchina per prove statiche. In tutti i casi considerati, comunque, si è rilevato che il modo di rottura dei provini rimane sostanzialmente invariato. Come si può anche notare dalla fig. 8, il distacco finale delle pelli dal "core" avviene a causa della delaminazione degli strati adiacenti al core, come già riscontrato per i campioni pre-esposizione: in particolare il cedimento avviene tra il primo ed il secondo strato delle pelli. Parti residue della "skin" delaminata sono ancora incollate al menisco adesivo dopo la rottura completa del provino.

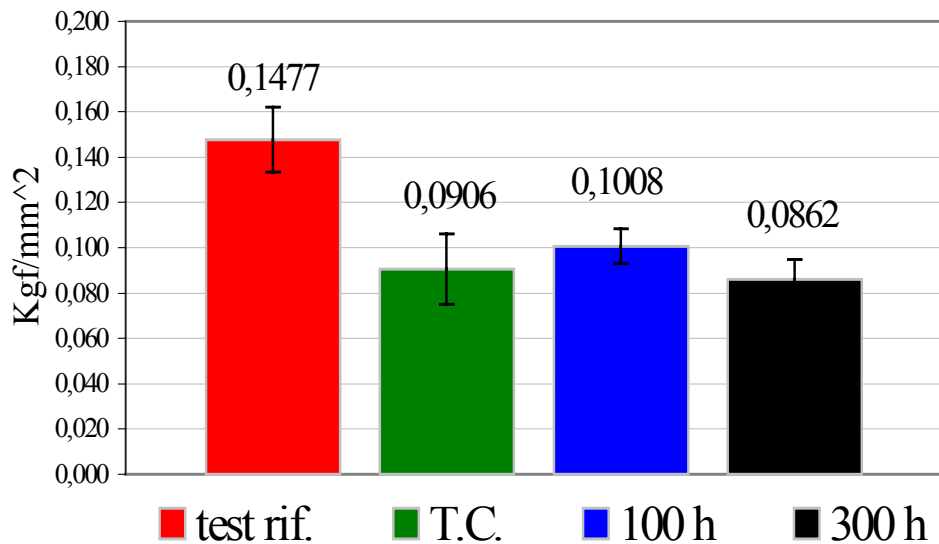


Modo di rottura a 300 h
Fig. 8

Per quanto riguarda il primo gruppo di provini, caso A, questo tipo di rottura conferma l'elevata resistenza dell'incollaggio dato che questo sopporta la prova di trazione a differenza delle pelli. Il valore medio del carico di rottura (0.1489 N/mm^2), in questo caso, ci fornisce il valore di riferimento sulla base del quale verificare la degradazione che si ha nei casi successivi. La ciclatura termica (caso B) comporta una diminuzione del 38.66% del σ_3 , con un valore medio di 0.8888 N/mm^2 . Quello determinato nel caso C, tab. 2, in cui sono analizzati i provini esposti al vuoto per la durata di 100 h, denota una diminuzione del 31.75% per un valore di 0.9888 N/mm^2 . E' interessante invece notare l'ulteriore diminuzione del carico di rottura che

risulta dai provini esposti a 300 h di vuoto, come evidenziato in tab. 2.

In queste condizioni si ottiene un valore medio di 0.8456 N/mm^2 , che corrisponde ad una diminuzione del flatwise strength, rispetto al caso di riferimento, del 41.64% .



Flatwise strength in funzione delle condizioni di esposizione
Fig. 9

Dai valori ottenuti è possibile rilevare che il vuoto determina una notevole degradazione nella matrice costituente le pelli, poiché è questa che è principalmente interessata dagli sforzi di taglio causati dal carico dovuto alla trazione nella direzione ortogonale al piano della lamina. L'outgassing interviene sulla variazione della concentrazione di umidità inizialmente presente e sul contenuto di specie volatili adsorbite all'interno della matrice, provocando delle microdeformazioni permanenti, conseguenti a variazioni dimensionali localizzate, che quindi determinano una degradazione definitiva delle proprietà meccaniche del materiale assemblato.

Come si può notare anche dai grafici successivi, la degradazione del carico di rottura a trazione frontale è più marcata per ridotti tempi di esposizione (vuoto 100 h). All'aumentare della durata dell'esposizione stessa (300 h) non si ha una proporzionale diminuzione del carico di rottura, che, pur subendo un decremento, tende a livellarsi verso un ipotetico valore asintotico di equilibrio.

E' opportuno osservare che il vuoto rappresenta soltanto una delle componenti interagenti nell'ambiente spaziale, che possono causare la degradazione delle proprietà meccaniche dei materiali esposti: tuttavia l'outgassing può essere ritenuto il principale fattore di danneggiamento per componenti strutturali protetti da rivestimenti esterni termo-isolanti, come avviene effettivamente per i riflettori di antenna per impieghi spaziali.

7. Riassunto e conclusioni.

Una particolare metodologia di assemblaggio di sandwich con pelli ed honeycomb in fibra di carbonio è stata presentata e discussa: la qualifica industriale di tale tipologia di materiale richiede l'esecuzione di prove statiche di trazione frontale, altrimenti dette "flatwise tests", per verificare la tenuta dell'incollaggio tra le pelli ed il nido d'ape. I risultati di tali prove risultano di estremo interesse anche per materiali sandwich destinati ad applicazioni spaziali, come quelli impiegati per la produzione di riflettori d'antenna con elevate caratteristiche di stabilità dimensionale. L'ambiente spaziale causa profonde alterazioni delle proprietà meccaniche dei componenti strutturali in esso operanti: tali processi di degradazione dipendono dall'interazione sinergica delle varie componenti dell'environment orbitale stesso. La struttura di un riflettore d'antenna è generalmente esposta al solo vuoto, poiché generalmente essa è rivestita con materiali aventi opportune caratteristiche elettromagnetiche e protetta da coperte per il controllo termico passivo. Mediante il simulatore SAS, campioni di materiale sandwich sono stati esposti al vuoto per tempi variabili fra le 100h e le 300h: gli effetti di degradazione sono stati rilevati confrontando i valori di "flatwise strength" pre e post-esposizione. Si osserva un marcato decremento della proprietà menzionata, pari a circa il 32% dopo 100h di esposizione: tale degradazione sembra però tendere ad un valore asintotico di equilibrio, in quanto si attesta su 42% dopo 300h di permanenza in vuoto. Si è inoltre rilevato che gli effetti della ciclatura termica standard eseguita sui campioni ai fini della loro qualifica industriale produce effetti comparabili a quelli dovuti a 100h di esposizione in vuoto.

Ringraziamenti.

Gli autori desiderano esprimere i più vivi ringraziamenti ad Alenia Spazio S.p.a., Stabilimento dell'Aquila, Divisione Materiali Compositi, per il supporto fornito.

Bibliografia.

- [1] Marchetti M., Morganti F. "Prediction of thermal expansion of thermal coefficients of sandwiches using finite elements methods validated by experimental test results", *Acta Astronautica*, Vol. 10, No. 5-6, pp.409, 1983
- [2] Marchetti M., Cutolo D. "Tecnologia dei materiali compositi" Edizioni ESA, Milano, 1991.
- [3] Allix O., Ladevèze P., Corigliano A. "Damage analysis of interlaminar fractured specimens", *Composite Structures*, No. 31, pp. 61-74, 1995.
- [4] Noor A.K., Burton W.S., Bert C.W. "Computational model for sandwich panels and shells", *Appl. Mech. Rev.*, No. 49, pp. 155-99, 1996.
- [5] MSC/NASTRAN Encyclopedia "Knowledge Solutions for MCAE Professionals", Third Edition, Ken Peterson Editor, 1996.
- [6] Kinloch A.J., Lau C.C., Williams J.C. "Modelling the fracture behaviour of adhesive joints", *J. Adhesion.*, Vol. 59, pp. 217-224, 1996.
- [7] Shang J.K. "Interface crack growth in layered materials", *Proc. Fatigue 96 Conference, Berlin, Germany*, pp. 43-54, 1996.
- [8] "Annual Book of ASTM Standard", 1998, Section 15: "Space simulation and aircraft high modulus composite".
- [9] Guo E., Gibson L.J. "Behaviour of intact and damaged honeycombs: a finite element study", *Int. J. Mech. Sci.*, No.41, pp.85-105, 1999.
- [10] Goswani S., Becker W. "Analysis of debonding fracture in a sandwich with hexagonal core", *Composite Structures 2000*, No. 49, pp. 385-392, 2000.
- [11] G. Allegri, U. Lecci, M. Marchetti, F. Poscente "FEM Simulation of the Mechanical Behaviour of Sandwich Materials for Aerospace Structures", *Key Engineering Materials*, Vols. 221-22, pp. 209-220, *Trans Tech Publication, Switzerland*, 2002.
- [12] G. Allegri, M. Marchetti, U. Lecci, F. Poscente, "On the Reliability of Honeycomb Core Bonding Joint in Sandwich Composite Materials for Space Applications", *Paper IAF-01-I.6.05*, 52nd IAF International Conference, *Toulouse*, 2001.