Carlo Caprile
Vittorio Giavotto
Elisabetta Gariboldi
Giuseppe Sala

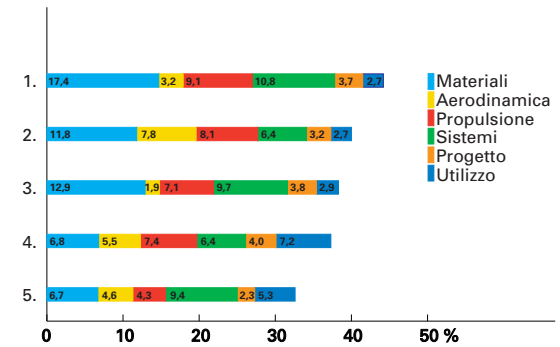
Attività di ricerca nell'ambito dei materiali per applicazioni aerospaziali

Materials for aerospace application
Materials and structures have been largely responsible for major performance improvements in many aerospace systems. The maturation of computational structures technology and the development of advanced composite materials, witnessed during the past 40 years, have improved structural performances, reduced operational risk, and shortened development times in numerous aerospace systems. For future aeronautical and space systems, materials and structures, in addition to being enabling technologies, continue to be key elements in determining the reliability, performance, testability, and cost effectiveness of these systems. For some of the future air vehicles, the development and deployment of new structure technologies can have more impact on reducing the operational cost and the gross weight than any other technology area. Within this scientific and technical framework, Politecnico di Milano is facing some crucial aspects of research in the field of materials for aerospace application. Among them, it is worth mentioning the study of 1) *Materials degradation due to fleet ageing*: fatigue, damage onset and growth, moisture and fluids absorption, barely-visible damage in polymeric and metallic composite materials and bonded joints; fatigue and fracture mechanics in light alloys, riveted and welded joints. 2) *Materials, production and assembling techniques for affordability improvement*: development of FML (fibre metal laminates) and thermoplastic polymeric composites technologies; correlation between microstructure and heat treatments of titanium alloys; deployment of friction stir welding techniques of aluminium alloys, casting technologies of magnesium alloys, hot and cold ▸

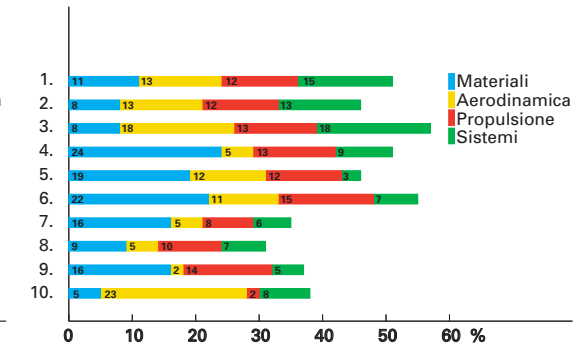
Introduzione

Il ventunesimo secolo sarà testimone di una nuova era per i mezzi e le missioni aerospaziali. I veicoli diventeranno molto più piccoli e molto più grandi di quanto non siano ora. Essi viaggeranno più velocemente e si spingeranno più lontano di quanto non sia possibile oggi.
Nell'aeronautica civile, i futuri sistemi di trasporto consisteranno in aeroplani subsonici di grandi dimensioni (caratterizzati da architetture innovative, dotati di interfaccia uomo-macchina semplici, equipaggiati con sistemi per la visione artificiale e con apparati anti-collisione), come pure in aeroplani ultra-veloci per i voli trans-oceanici: velivoli iperveloci dai bordi d'attacco taglienti, costruiti con materiali capaci di sopportare gli alti riscaldamenti cinetici. Le linee guida del progetto dovranno comprendere la sicurezza, la convenienza economica (costo iniziale e del ciclo-vita), nonché la compatibilità ambientale.
Per quanto riguarda i velivoli militari, l'enfasi si sposterà dalla pura ottimizzazione delle prestazioni ad una riduzione dei costi, compatibile con prestazioni accettabili. Le "parole d'ordine" dei progetti militari saranno ancora convenienza economica, aggiunta però a flessibilità, inter-operabilità, standardizzazione, supporto logistico, sopravvivibilità e "letalità" degli armamenti di bordo.
Numerose sono le architetture non convenzionali in corso di sviluppo, come gli aeroplani "tuttala" privi di impennaggi, gli aeroplani con due coppie di ali unite a rombo, quelli in cui l'ala e la fusoliera sono fusi insieme, i velivoli con capacità "*multistealth*", ovvero impossibili da rilevare con le moderne tecniche radar, termiche, acustiche e sonore, ed infine i velivoli ipersonici in grado di operare sia nell'atmosfera che nello spazio, ed in grado di effettuare la transizione da un ambiente all'altro.
Nello spazio le grandi stazioni spaziali verranno affiancate o sostituite da un gran numero di mini- o micro-stazioni completamente robotizzate, dedicate alle telecomunicazioni globali, osservazioni della terra ed esplorazioni scientifiche dell'universo vicino. Verranno effettuati studi scientifici approfonditi in regioni dello spazio sempre più remote, alla ricerca di tracce di vita nell'universo. Tali attività avranno come obiettivi una presenza vigilante ed "intelligente" nel sistema solare, l'esplorazione dello spazio inter-stellare e la ricerca di pianeti simili alla Terra: a questo scopo si utilizzeranno telescopi in grado di rilevare tracce di vita ad una distanza di

1.
Proiezione al 2020 della percentuale di riduzione dei costi operativi di un velivolo da trasporto, grazie all'implementazione di nuove tecnologie.
Grande autonomia-alta capacità: 1) convenzionale, 2) blended-wing-body; 3) grande autonomia-media capacità, 4) medio-raggio intercontinentale, 5) jet regionale.
[fonte NASA Intercenter System Analysis Team]



2.
Proiezione al 2020 della percentuale di riduzione del peso massimo al decollo, grazie all'implementazione di nuove tecnologie.
Supersonici: 1) grande autonomia, 2) premium service, 3) business jet. Grande autonomia-alta capacità: 4) convenzionale, 5) blended-wing-body. Velivoli cargo: 6) grande autonomia, 7) corto-raggio. Velivoli STOL: 8) medio-raggio intercontinentale, 9) corto-raggio alta capacità, 10) Tiltrotor.
[fonte NASA Intercenter System Analysis Team]



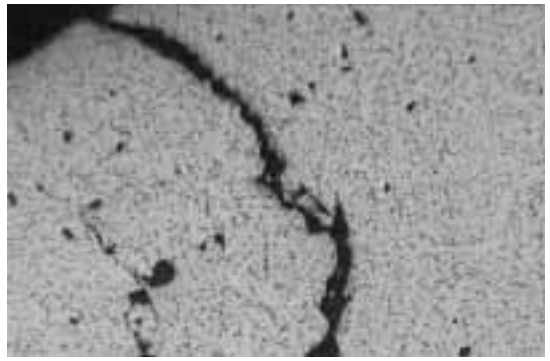
10^{15} chilometri. Si svilupperà così una strategia di esplorazione integrata uomo-robot, di gran lunga più avanzata di quella associata all'utilizzo delle stazioni spaziali. Una tale strategia sarà volta all'aumento della sicurezza, al miglioramento delle prestazioni, all'allargamento degli obiettivi ed alla riduzione del costo del ciclo-vita dei velivoli. Così i futuri sistemi di trasporto spaziale saranno costituiti da navette riutilizzabili per i trasferimenti di routine Terra-orbita. Essi garantiranno la riduzione di un ordine di grandezza dei costi e l'aumento di due ordini di grandezza dell'affidabilità di tali voli. Le sfide da vincere consisteranno nella ri-utilizzabilità, ri-certificabilità e minimizzazione delle strutture operative necessarie. Entro la metà del XXI secolo tali viaggi interplanetari diventeranno di routine.
I materiali e le strutture sono stati fino ad ora tra i maggiori responsabili del miglioramento delle prestazioni dei sistemi di trasporto aerospaziale. La completa maturazione delle tecniche di progettazione computazionale e lo sviluppo dei materiali compositi avanzati, cui abbiamo assistito nel corso degli ultimi 40 anni, hanno comportato il miglioramento delle prestazioni strutturali, la riduzione dei rischi operativi e l'accorciamento dei tempi di sviluppo di numerosi sistemi di trasporto aerospaziale. Nel futuro, i materiali e le strutture, assieme con le tecnologie ad essi collegati, continueranno a costituire gli elementi chiave nel determinare le prestazioni, l'affidabilità e la convenienza economica di tali sistemi. La NASA ha identificato sette aree tecnologiche principali, da privilegiare nello sviluppo dei futuri velivoli civili e militari: una di esse è costituita dalle "strutture e materiali". Per alcuni tra questi futuri veicoli, lo sviluppo e l'applicazione di nuove strutture e materiali avrà un impatto nel ridurre il peso massimo al decollo ed i costi operativi ben maggiore di quelli dovuti a qualsiasi altra aerea tecnologica [Fig.1 ▸, 2 ▸].
Sulla scorta di queste considerazioni, nel campo dei materiali aerospaziali possono essere identificate alcune aree strategiche di importanza cruciale per il raggiungimento degli obiettivi prefissati, entro cui il Politecnico di Milano, autonomamente o in collaborazione con altri centri di ricerca, italiani ed esteri, sta profondendo i propri sforzi:
- invecchiamento della flotta e degrado dei materiali;
- materiali, tecniche di produzione e di assemblaggio per massimizzare l'*affordability*;

- materiali per alte temperature, di impiego sia strutturale che motoristico;
- materiali bio-mimetici, *functionally graded*, smart materials;
- materiali ad alta capacità di assorbimento di energia;
- materiali ad integrazione multifunzionale;
- materiali per condizioni ambientali spaziali.

Invecchiamento della flotta e degrado dei materiali

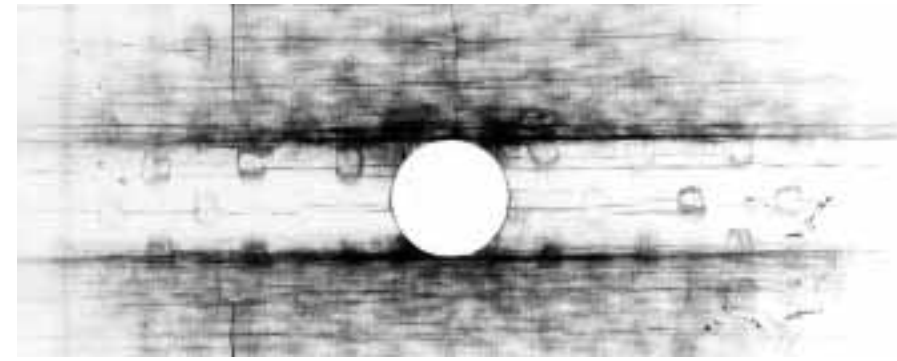
Nel corso degli ultimi anni le compagnie aeree hanno perso più denaro di quanto non ne abbiano guadagnato nel corso di tutta la storia precedente: per questo motivo hanno dovuto ridurre gli investimenti previsti per la sostituzione delle flotte, la cui età media è andata così aumentando. Di conseguenza, gli sforzi della ricerca applicata hanno dovuto essere volti alla comprensione dei fenomeni che possono affliggere i velivoli "anziani": la fatica, la propagazione del danno, la corrosione ed il degrado ambientale in genere. In questi campi presso il Politecnico di Milano sono attive da tempo attività di ricerca, presso il Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale (DIA) e quello di Meccanica. Presso il DIA è da lungo tempo attivo un filone di ricerca sulla fatica e la meccanica della frattura delle leghe leggere d'alluminio e delle loro giunzioni chiodate e saldate. Questo ha portato, per esempio, alla messa a punto di una metodologia integrata numerico/sperimentale per la correlazione tra le dimensioni/tipologie dei difetti presenti entro i cordoni di saldatura e la modalità/velocità di propagazione delle cricche [Fig.3 ▸]. L'approfondimento della problematica ha altresì consentito di definire i cicli di trattamento termico in grado di ottimizzarne le prestazioni a fatica dei giunti saldati. Inoltre, quale rilevante ricaduta tecnologica, tali metodologie sono state applicate con successo alle strutture in lega d'alluminio delle vetture gran turismo e delle motociclette da competizione.
Il comportamento in esercizio dei materiali compositi, in particolare la loro resistenza all'applicazione di carichi, sia statici che dinamici, ma anche la loro rigidezza e caratteristiche fisiche possono essere alterate (senza poter ripristinare le caratteristiche iniziali) dall'insorgere di fenomeni di danno che anticipano la formazione di difetti macroscopici la cui estensione può portare a gravi conseguenze per il componente o per la struttura. Poiché i componenti strutturali in materiale composito hanno fatto

3.
Cricche originate da difetti in una saldatura in lega leggera d'alluminio.



▸ plastic deformation technologies of MMC (metal matrix composites).
3) *Materials for high temperature application*: in the field of structures, heat-resistant graphite composites with butadiene-toughened bismaleimidic matrix; in the field of aircraft engines, high-performance silicon carbide/aluminium alloy MMC and TiAl intermetallics.
4) Bio-mimetic, functionally-graded and smart materials: special composites with glass fibres and doped matrix, able to exploit fluorescence mechanisms for stress, moisture absorption or environmental pH monitoring; functionally graded ceramics, having variable and tuneable degrees of porosity and cristallinity; embedding of micro-actuators or transducers (shape memory alloys wires, piezo-ceramic plates and fibres, piezo-polymeric films, optical fibres) into host materials (composite laminates) for structures monitoring and control, as well as gossamer space antennae deployment.
5) *Highly energy-absorbing materials*: special polymers, elastomers and composites, cellular plastics, metallic foams and honeycombs for aircraft and space vehicles crashworthiness.
6) *Multifunctional integration*: materials which join structural performance to acoustic damping capability (micro-perforated honeycomb for engine nacelles) and energy-absorbing capability (cellular cores for shock absorbers).
7) *Materials for space application*: ▸

4.
Stereo-radiografia con liquidi penetranti radio-opachi del danno a fatica attorno ad un foro di un laminato in composito.



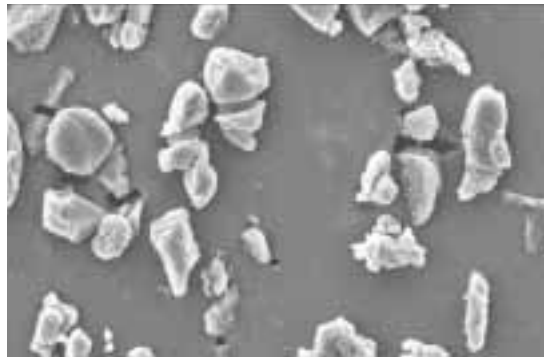
la loro prima comparsa sui velivoli di linea a partire dai primi anni '80, il problema dell'invecchiamento ambientale comincia a farsi sentire anche per tale classe di materiali. L'intervento di fenomeni di danno può essere legato a errata scelta del materiale, o a errata conduzione del ciclo di fabbricazione del componente (ad esempio errata scelta della temperatura o dell'entità e velocità di deformazione plastica) o dal superamento in esercizio di condizioni critiche, relative ad esempio agli sforzi applicati o alle temperature. Tra i diversi materiali, quelli compositi mostrano fenomeni di danneggiamento particolarmente importanti perché notevolmente anticipati rispetto alla formazione di difetti macroscopici individuabili mediante controlli non distruttivi convenzionali. In essi risultano particolarmente critiche le interazioni tra la matrice e le fibre lunghe, corte o le particelle di rinforzo. Al Politecnico di Milano da oltre 20 anni sono in corso ricerche di base sulla meccanica del danno e sul comportamento a fatica dei compositi, ricerche che hanno contribuito a chiarire i comportamenti peculiari di tali materiali, e ne hanno consentito l'utilizzo affidabile nelle strutture primarie dei velivoli ad ala fissa e rotante. In questo momento Presso il DIA viene studiato il meccanismo di interazione tra i diversi tipi di danno, e la sua influenza sulla velocità di propagazione e sulle prestazioni a fatica. Vengono sviluppati concetti originali di meccanica del danno, applicati alle zone critiche dei laminati in materiale composito, come quelle di giunzione e di bordo. A questo scopo, particolari tecniche di controllo non distruttivo hanno dovuto essere sviluppate, e sono in corso di messa a punto, come la stereo-radiografia con liquidi penetranti radio-opachi [Fig.4 ▸], la ultrasonoscopia per riflessione in immersione e la termografia con luce pulsata.
L'importante aspetto dell'evoluzione del danneggiamento microstrutturale è stato studiato approfonditamente al Dipartimento di Meccanica in compositi a matrice metallica rinforzati con particelle o fibre corte ceramiche, in cui le alterazioni microstrutturali assumono generalmente la forma di rotture delle particelle di rinforzo o di distacchi tra queste e la matrice. A tal fine sono state riprodotte per diverse combinazioni di matrice/rinforzo e in diverse condizioni riscontrabili in componenti in esercizio anche a temperature elevate, rilevando il danneggiamento sia con osservazioni dirette sul materiale sia mediante una serie di tecniche non distruttive di

monitoraggio basate sugli effetti provocati dalle alterazioni microstrutturali, ad esempio sul valore del modulo elastico o della resistenza elettrica, o su segnali acustici legati alla rottura delle particelle [Fig.5].
Inoltre, l'interazione tra la meccanica del danno e l'invecchiamento ambientale dovuto all'assorbimento di umidità costituisce uno dei filoni di ricerca attualmente più stimolanti: diversi tipi di compositi (con fibre aramidiche, di grafite e di vetro in matrici epossidiche e poliestere) vengono sottoposti a cicli di condizionamento accelerato [Fig.6]. Le modalità di assorbimento e di saturazione, nonché le conseguenze sulle caratteristiche termo-chimiche e visco-elastiche del materiale vengono approfondite mediante tecniche microscopiche e di *dynamical-mechanical-analysis*. In collaborazione con le industrie costruttrici ed i reparti di manutenzione delle compagnie aeree sono in corso anche studi sugli effetti di degrado prodotti dal contatto dei materiali compositi con fluidi tipici dell'impiantistica aeronautica, come gli anti-ghiaccio, i lubrificanti ed i carburanti. Infine, il problema dei *barely visible impact damages* (danni prodotti nei materiali compositi da impatti a bassa energia, ma non rilevabili con i normali metodi di ispezione visiva) sono oggetto di approfonditi studi sperimentali e numerici, volti ad indagarne le sinergie con altri meccanismi di degrado ambientale, ed a definirne l'influenza sulle prestazioni meccaniche residue, quali la tenacità, la resistenza a compressione e la rigidezza residua [Fig.7].

Materiali, tecniche di produzione e di assemblaggio per massimizzare l'affordability

In conseguenza della contrazione delle spese militari e della momentanea recessione che ha colpito l'aviazione civile, le industrie costruttrici stanno operando scelte strategiche *market oriented* piuttosto che *performance oriented*, ovvero sono volte a coadiuvare le compagnie aeree, riducendo i costi e migliorando la manutenibilità/affidabilità dei velivoli, allo scopo di ridurre gli oneri di acquisizione e di gestione delle flotte. Emblematica a questo riguardo è la politica di Airbus Industries, che è sul punto di scegliere i FML (*Fiber Metal Laminates*), ovvero pannelli costituiti dalla stratificazione alternata di lamine in composito e sottili lamiere in lega d'alluminio [Fig.8], per realizzare gran parte della struttura del suo prossimo A 380, velivolo ad alta capienza (660 passeggeri) e lungo raggio (14.200

5.
Microstruttura di un materiale composito rinforzato con particelle danneggiato sia per rottura di particelle che per distacchi all'interfaccia matrice/particella.
20 μm

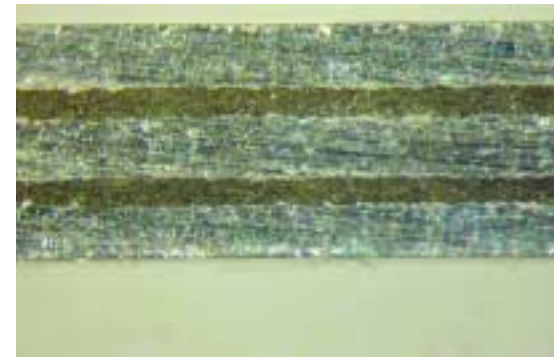


Km). L'adozione di tali materiali, di cui dovrebbe essere costituita l'intera parte superiore della fusoliera, promette di ridurre i costi di produzione/assemblaggio del 15%. Inoltre le eccellenti caratteristiche di resistenza alla fatica, alla corrosione, alla fiamma, all'assorbimento di umidità e al danno da impatto fanno prevedere una riduzione ancora maggiore dei costi di gestione/manutenzione. La decisione finale è però subordinata al completamento del programma di caratterizzazione del materiale.
Il DIA, nell'ambito di un finanziamento MIUR, sta svolgendo una estesa campagna sperimentale, che spazia dagli aspetti tecnologici di produzione dei FML fino alle loro tecniche di modellazione FEM. In particolare sono in corso studi per valutare la meccanica della frattura ed il comportamento a fatica, nonché la sensibilità al degrado ambientale, eventualmente in concomitanza con danni prodotti da impatti a bassa energia, di questi laminati ibridi. Inoltre l'analisi sperimentale sta prendendo in considerazione anche le prestazioni in condizioni termiche estreme (da –100 a +100 °C), e le problematiche relative alla fatica termo-meccanica. Tutto ciò non limitandosi ai laminati ibridi monolitici, ma

6.
Danno da impatto in un composito per impieghi ad alta temperatura.

7.
Cedimento per instabilità delle fibre poli-aramidiche in un laminato in composito dopo assorbimento di umidità.

8.
Sezione del GLARE: stratificazione alternata di lamine in composito e lamiere in lega d'alluminio.



anche alle loro modalità tipiche di giunzione per rivettatura ed incollaggio.
Pure nell'ambito delle giunzioni, un'ulteriore attività di ricerca sperimentale è in corso da tempo, in collaborazione con diverse industrie nazionali, volta alla caratterizzazione delle giunzioni saldate delle leghe d'alluminio, ed all'ottimizzazione dei parametri tecnologici delle tecniche MIG (Metallic Inert Gas) e FSW (Friction Stir Welding). Una tale scelta di ricerca si è dimostrata lungimirante: infatti l'Airbus A 380, che di fatto costituirà il *challenge* tecnologico europeo per i prossimi anni, avrà la parte inferiore della fusoliera costituita da una struttura *semimonocoque* in lega d'alluminio, interamente saldata.
Infine il DIA, assieme con alcuni tra i principali produttori mondiali di materiali compositi avanzati, da molti anni sta conducendo ricerche sui compositi strutturali a matrice polimerica termoplastica. Tali materiali consentono grandi risparmi nei costi di costruzione, grazie alla facilità di produzione ed assemblaggio. Gli studi in corso hanno inoltre permesso di mettere a punto le tecniche di stampaggio e di giunzione, nonché di indagare la meccanica del danneggiamento e le capacità di assorbi-

low-temperature and high-vacuum behaviour of polymers, polymeric composites and bonded joints; out-gassing of resins; atomic oxygen erosion of composites.

mento di energia di tali materiali, per svariate combinazioni matrice/rinforzo.
L'intero processo di fabbricazione di un componente, dalle fasi iniziali e intermedie di realizzazione di semilavorati al conferimento della forma finale, mediante operazioni di deformazione plastica, taglio, all'esecuzione in diversi momenti di cicli di trattamento termico massivo o superficiale gioca, accanto al tipo di materiale utilizzato, un ruolo fondamentale nella definizione delle caratteristiche fisiche/meccaniche agendo significativamente sulla microstruttura. Questi aspetti sono stati oggetto di numerose indagini condotte o in corso presso il Dipartimento di Meccanica, anche su materiali che rivestono notevole interesse in campo aerospaziale. Per le leghe di titanio ad esempio la combinazione della ridotta densità e della possibilità di modificare le caratteristiche meccaniche in termini di variazioni microstrutturali del materiale come risposta alle diverse operazioni termiche/meccaniche ne fa uno dei materiali fondamentali per la realizzazione di componenti strutturali impiegati in ambito aerospaziale. D'altro canto la notevole tendenza del titanio ad interagire con l'ambiente circostante durante le fasi produttive richiede attenzioni particolari sia nel caso in cui si desiderino introdurre modificazioni deliberate nelle condizioni superficiali, sia nel caso in cui esse siano da evitare. In questo ambito, la lega di titanio Ti-6Al-4V già ampiamente utilizzata grazie all'ottimale combinazione di resistenza meccanica, tenacità e resistenza a corrosione è attualmente oggetto di indagini volte a valutare gli effetti combinati di parametri di processo ed ambiente in operazioni sia massive, come la deformazione plastica o trattamenti termici massivi, sia localizzate come in lavorazioni finali quali il taglio plasma ad alta definizione o trattamenti termochimici superficiali finalizzati al miglioramento delle condizioni di esercizio [Fig.9].
Anche i compositi a matrice in lega di alluminio sono stati oggetto di studi sperimentali per la definizione delle condizioni ottimali per l'esecuzione di lavorazioni tradizionali quali laminazione a caldo e freddo, estrusione, saldatura.
Lo studio del comportamento meccanico-metallurgico dei vari materiali può portare alla definizione di mappe di processo indicanti le condizioni ottimali di deformazione plastica a caldo. Esse vengono ricavate considerando che il materiale in lavorazione 'utilizza' l'energia trasmessa dalle attrezzature in modo più o meno efficace a seconda delle condizioni di lavorabilità e che condizioni favorevoli di temperatura e velocità di deformazione sono quelle che consentono di ottenere un valore elevato di efficienza (definita tramite un parametro h). Un esempio di mappa di processo per un materiale composito a matrice in lega di alluminio 6061 rinforzato con particelle di allumina è riportata in Fig.10, dove le linee di iso-efficienza consentono di individuare facilmente i campi ottimali di processo.
Laddove la riduzione di peso è unita alla necessità di realizzare componenti a spessore sottile e di notevole complessità geometrica pur dotati di una certa rigidezza e resistenza meccanica discreta possono essere utilizzate, anche in campo aerospaziale, leghe di magnesio. Le moderne leghe ad elevata purezza garantiscono resistenza a corrosione notevolmente migliorata, con una resistenza meccanica e alla deformazione a caldo che si può mantenere a livelli discreti fino a temperature anche di 150°C.
Le attuali linee di sviluppo delle leghe di magnesio mirano, mediante l'introduzione di nuove composizioni chimiche/cicli di fabbricazione, a migliorare ulteriormente aspetti 'critici' per le applicazioni, quali la resistenza a corrosione, la resistenza e la stabilità microstrutturale a "caldo", la presenza di difetti in particolari complessi realizzabili per pressocolata, processo produttivo molto diffuso per le leghe di magnesio. Ricerche su queste tematiche sono attualmente svolte presso il Politecnico di Milano su leghe di utilizzo ormai relativamente esteso e su leghe innovative, per le quali prove sperimentali hanno consentito di modellizzare il comportamento a caldo e di valutarne la tenacità in diverse condizioni microstrutturali.

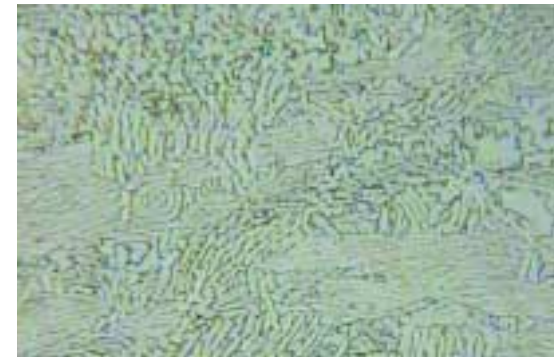
Materiali per alte temperature, di impiego sia strutturale che motoristico

Nonostante le temporanee difficoltà incontrate dai programmi europei e statunitensi HSCT (*High Speed Civil Transport*) e HSR (*High Speed Research*), è indubbio che entro il 2020 dovrà essere sviluppato un velivolo civile in grado di collegare - ad esempio - New York con Londra o Tokyo in 3 ore volando a Mach 2-2.4. Il conseguente riscaldamento cinetico indurrà sui bordi d'attacco temperature di 150-180°C continuativi: livelli eccessivi sia per le leghe d'alluminio convenzionali che per i compositi. Per questo motivo presso il DIA ha da tempo preso avvio, già nell'ambito del progetto EFA (*European Fighter Aircraft*) un'attività di ricerca sui compositi con fibra di grafite in matrice bismaleimidica tenacizzata con elastomerici butadienici. Tali materiali hanno dimostrato di poter contemperare un'elevata resistenza ad alte temperature (fino a 200°C) con una buona tenacità e resistenza a fatica.
Dal punto di vista motoristico, l'attività è rivolta principalmente allo sviluppo di MMC (Metal Matrix Composites) ad alte prestazioni, costituiti da fibre continue di SiC (carburo di silicio) in matrice di lega d'alluminio [Fig.11]. Tramite una tecnica di infiltrazione ad alta pressione, con questi materiali sono state realizzate bielle per motori a ciclo Otto, che attualmente girano al banco.
Il DIA ha altresì collaborato allo sviluppo di valvole per motori alternativi in intermetallico TiAl, anch'esse in prova al banco. Tali componenti, a parità di prestazioni, consentono un risparmio delle masse in moto alterno di oltre il 20%, che si ripercuote positivamente sulla massa totale del motore, sul suo rapporto potenza/peso, e –in ultima analisi– sull'economia operativa dei velivoli.

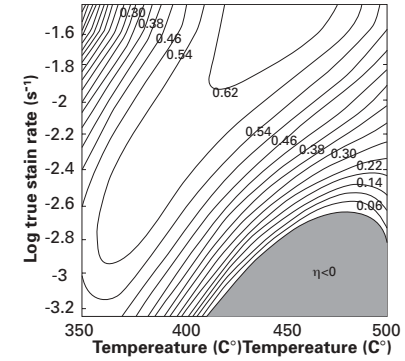
Materiali bio-mimetici, functionally graded e smart materials

L'ottimizzazione ponderale, requisito irrinunciabile delle efficienti costruzioni aerospaziali, passa attraverso l'integrazione del materiale, della forma e della funzione. Da questo punto di vista, i materiali di origine biologica possono essere portati ad esempio. Per questo motivo, sempre più spesso, i materiali ad alta efficienza strutturale e/o funzionale traggono ispirazione dalla natura: sono, in altre parole, bio-mimetici. Tralasciando i materiali compositi "convenzionali", che sono studiati al Politecnico da oltre un ventennio, vale la pena di ricordare che, presso il DIA, in quest'ambito si sta lavorando a compositi innovativi, la cui matrice polimerica è opportunamente "dopata" per renderla fluorescente in presenza di cambiamenti ambientali, quali l'applicazione di un campo di sforzo, l'assorbimento di umidità o la variazione del pH. Così come accade ad alcuni tipi di micro-organismi, il materiale diventa sensibile a stimoli esterni, e intrinsecamente in grado di dare una misura dell'entità di tali stimoli. Questi risultati vengono perseguiti nell'ambito di ricerche europee, in collaborazione con università finlandesi e spagnole.
Pure nell'ambito di ricerche europee, si stanno studiando i cosiddetti materiali *functionally-graded*, ovvero materiali che modificano le proprie caratteristiche con continuità, in dipendenza dei requisiti

9.
Lega di titanio Ti6Al4V, caratteristica microstruttura costituita da lamelle grossolane di fase alfa in lastra sottoposto a deformazione plastica a caldo. Ingrandimento originale 100X.



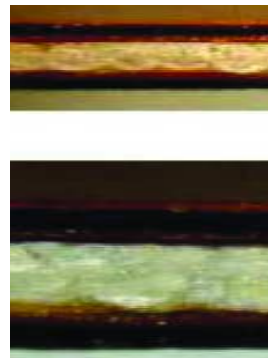
10.
:Mappa di processo per un materiale composito a matrice in lega di alluminio 6061 rinforzato con particelle di allumina.



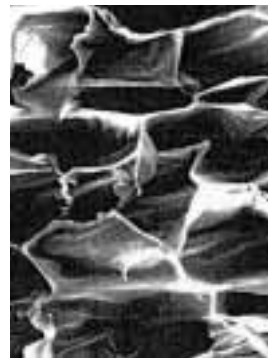
11.
Fibra in carburo di silicio inglobata in una matrice in lega d'alluminio.

12.
Rilevazione termografica del campo di temperature indotte dall'attivazione di fili in lega a memoria di forma NiTiNOL entro un laminato in composito.

13.
Sezione di uno smart laminate costituito da fibre piezo-ceramiche inglobate in una matrice epossidica.



14.
Micro-struttura di un materiale metallico cellulare deformata da un impatto ad alta velocità.



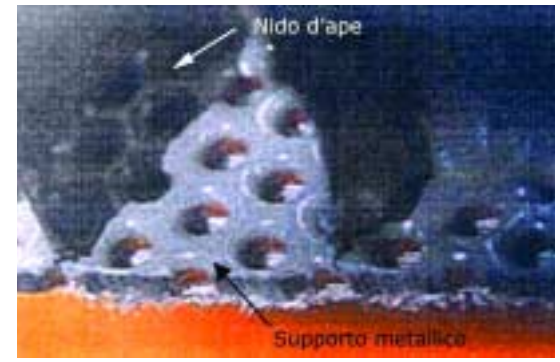
funzionali. In particolare, assieme con università tedesche, tramite tecniche di brasatura nel vuoto ad alta temperatura, si sono prodotti componenti ibridi, costituiti da leghe di titanio e da ossido di zirconio, in grado di offrire tenacità, durezza superficiale e resistenza all'usura variabili con continuità in maniera controllata.
Nello stesso filone, grazie ad una collaborazione con il CNR, assieme con altre università italiane, si sta collaborando allo sviluppo di ceramiche il cui grado di porosità e di cristallinità è variabile per garantire un gradiente di resistenza, rigidezza e osteo-integrabilità nelle applicazioni bio-ingegneristiche.
Infine, i cosiddetti *smart materials* sono ormai diventati argomenti di ricerca quasi convenzionali e ben consolidati presso il DIA. Al momento, l'attenzione è rivolta all'integrazione di micro-attuatori e trasduttori entro materiali "ospiti" (quali i compositi) per ottenere *smart materials*. In particolare, nell'ambito di progetti di ricerca sovvenzionati dalle Agenzie Spaziali Italiana (ASI) ed Europea (ESA), sono allo studio compositi inglobanti fili in lega a memoria di forma NiTiNOL [Fig.12], fibre piezoceramiche [Fig.13], film o piastrine piezo-polimerici, oppure fibre ottiche, per dar luogo a laminati intelligenti capaci di rilevare e misurare stimoli esterni (trasduzione) e applicare le conseguenti azioni correttive (attuazione). Per mezzo di queste tecniche, si intende controllare l'instabilità di pannelli sottili, attuare superfici mobili aeronautiche, controllare dinamicamente strutture elicotteristiche e provvedere al *deployment* di strutture *gossamer*, quali antenne e vele spaziali.

Materiali ad alta capacità di assorbimento di energia

Il miglioramento delle prestazioni dei velivoli (e dei mezzi di trasporto in genere) non consiste unicamente nell'incremento della velocità, dell'autonomia, del raggio d'azione e del carico utile, ma anche (e forse soprattutto) nel miglioramento degli standard di sicurezza. Nel caso degli aerei ad ala fissa e degli elicotteri, ciò consiste essenzialmente nell'aumentare la sicurezza passiva delle strutture, e nel rendere sopravvivibili eventi quali impatti, *crash*, ammaraggi ed atterraggi, tutti caratterizzati dalla necessità di smaltire grandi quantità di energia cinetica. Da molti anni il DIA è attivo a livello internazionale nella ricerca sui materiali ad alta capacità di assorbimento di energia, atti a conferire prestazioni di *crashworthiness* (sicurezza passiva) alle strutture, senza deteriorarne le caratteristiche ponderali. Attualmente il LaST (Laboratorio Sicurezza Trasporti) del Politecnico è riconosciuto nel mondo come uno dei centri di eccellenza per lo studio di queste problematiche. Le leghe metalliche, i materiali compositi, gli elastomeri ed i polimeri, i nidi d'ape, i materiali cellulari polimerici e metallici [Fig.14], i materiali polimerici ed i vetri stratificati per la realizzazione di trasparenti, i materiali innovativi rinforzati con fibre di boro [Fig.15], vengono in questo momento studiati e le loro prestazioni ottimizzate anche in relazione alle condizioni ambientali, quali la temperatura e la velocità di deformazione. Tali studi hanno dato luogo ad importanti ricadute in settori collegati, quali quello dell'automobilismo sportivo: il LaST è infatti un laboratorio certificato dalla FIA (*Federation International d'Automobilisme*) per l'effettuazione delle prove di crash sulle strutture delle vetture di F1.

15.
Provini per la valutazione della capacità di assorbimento di energia di un materiale composito ibrido rinforzato con fibre di boro e di grafite, prima e dopo il test.

16.
Particolare di un pannello sandwich micro-forato, con compiti di resistenza strutturale e di assorbimento acustico



17.
Cedimento di un incollaggio ibrido metallo-composito in condizioni di utilizzo spaziali (-100°C).

Materiali ad integrazione multifunzionale

L'ottimizzazione ponderale spinta richiede l'integrazione funzionale dei materiali: essi devono cioè essere in grado di svolgere contemporaneamente funzioni diverse. A questo proposito, presso il DIA, in collaborazione con industrie aeronautiche italiane, sono in corso ricerche sul comportamento dei nidi d'ape micro-forati [Fig.16] e delle schiume metalliche che, alla consueta funzione strutturale, uniscono rispettivamente capacità di smorzamento acustico (per le gondole motore) e di assorbimento dell'energia in caso d'impatto.

Materiali per condizioni ambientali spaziali

L'utilizzo affidabile dei materiali in ambiente spaziale presuppone la conoscenza del loro comportamento in condizioni anomale. Per questo motivo, presso il DIA sono in corso studi sul comportamento a bassa temperatura (-150 °C) degli adesivi, sulla variazione dei meccanismi di attrito nelle coppie di strisciamento, sul fenomeno dell'*out-gassing* dei compositi in ambiente di alto vuoto e, in collaborazione con università statunitensi e canadesi, sull'erosione dovuta all'ossigeno atomico dei compositi a matrice polimerica [Fig.17].