



Thermoplastic development and applications in aerospace



C. Placidi, D. Malacaria – Dema Spa

Introduction

In the industrial sector, specifically in aeronautics, research and technological innovation is crucial due to the compulsory compliance with the requirements of the market particularly focused with the environment. The European Union, with the group of experts of the Advisory Council for Aviation Research and Innovation in Europe (ACARE), asks to the industry to dramatically reduce, by 2020, the environmental aircraft impact, in terms of CO₂, NO_x and perceived noise. The challenge is to reduce CO₂ emissions by 50%, NO_x by 80% and lowering the perceived noise of 10 db.

In the meanwhile, according to

the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) study, aviation affects only 2% of global emissions of CO₂, air traffic is still growing and it is been estimated that air travel will double in the coming years.

Commercial aviation has never suffered inflections regarding air traffic, but rather it has always seen the number of flights per year increasing. Since 2000 the air traffic has increased by 53% (Fig. 1), despite the occurrence of catastrophic events that unexpectedly did not have a negative impact on progressive trend held until then.

The growth forecasts of air transport, in order to reducing the environmental impact, are

directing research studies related to aeronautical structures to develop materials and technologies for lighter and resistant structures. These studies show that the thermoplastic composites, already widely used in other industries, are having a growing interest in aviation.

Thermoplastic materials in aeronautics

Thermoplastic composite materials represent a technological area in which Europe has a leading position in general aviation: past studies of the applicability and research, such as TAPAS, indicated that these materials are strong candidates for large-scale applications in future aircraft programs.

“As the aerospace industry moves to composite fuselages and wings, many of the structural aluminum clips and brackets holding the interior major assemblies are changing to thermoplastics composites.

Thermoplastic composites offer a combination of strength, fire resistance and galvanic corrosion resistance that allows weight and process savings” (Tom Smith – Tencate).

Until now, technologies associated with these materials are mature enough to flight on aircraft: the AW169 tailcone; Airbus uses thermoplastics on A380 outboard fixed leading edge, for cockpit floor on A400M and brackets on A350, Gulfstream

Sviluppo ed applicazione dei materiali compositi a matrice termoplastica in campo aeronautico

C. Placidi, D. Malacaria – Dema Spa

Introduzione

Nel settore industriale ed in particolare in quello aeronautico, l'ambito della ricerca e dell'innovazione tecnologica è di fondamentale importanza per le industrie che ne fanno parte, chiamate a dover soddisfare le richieste di un mercato particolarmente attento anche all'aspetto ambientale: l'Unione Europea, insieme al gruppo di esperti dell'Advisory Council for Aviation Research and Innovation in Europe (ACARE), ha richiesto agli operatori del settore di ridurre drasticamente, entro il 2020, l'impatto ambientale degli aerei, in termini di emissioni di CO₂,

NO_x e rumore percepito. La sfida è quella di ridurre le emissioni di CO₂ del 50%, di NO_x dell'80% e l'abbassamento del rumore percepito di 10 db. Sebbene secondo l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), il trasporto aereo incide solo per il 2% sulle emissioni globali di CO₂ generate, da decenni, l'aviazione registra la crescita di gran lunga più importante tra le modalità di trasporto utilizzate dall'uomo, e si stima che il trasporto aereo sia destinato a raddoppiare nei prossimi anni. L'aviazione commerciale risulta essere uno dei pochi campi che non ha mai risentito di inflessioni

per quanto riguarda il traffico aereo, ma che anzi ha visto sempre aumentare il numero di voli annuali. Dal 2000 ad oggi il traffico aereo ha avuto un incremento

del 53% (Fig. 1), nonostante il presentarsi di eventi drammatici, che inaspettatamente hanno

Fig. 1 - Air traffic progress until 1970 to today
Andamento del traffico aereo dagli anni '70 ad oggi

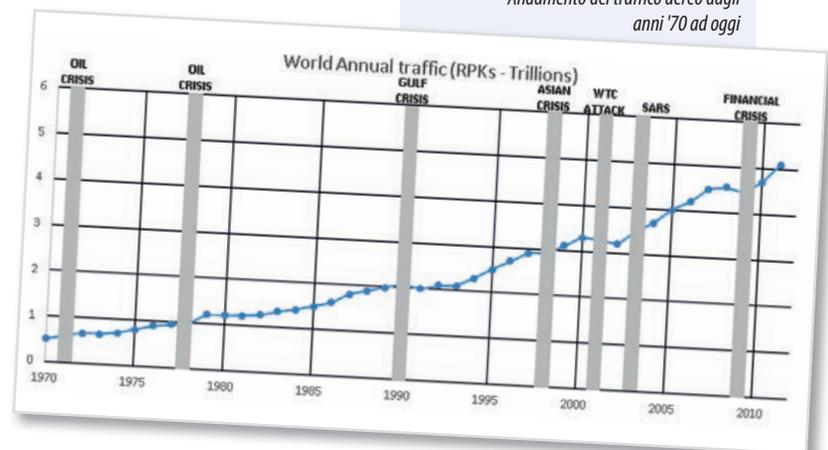
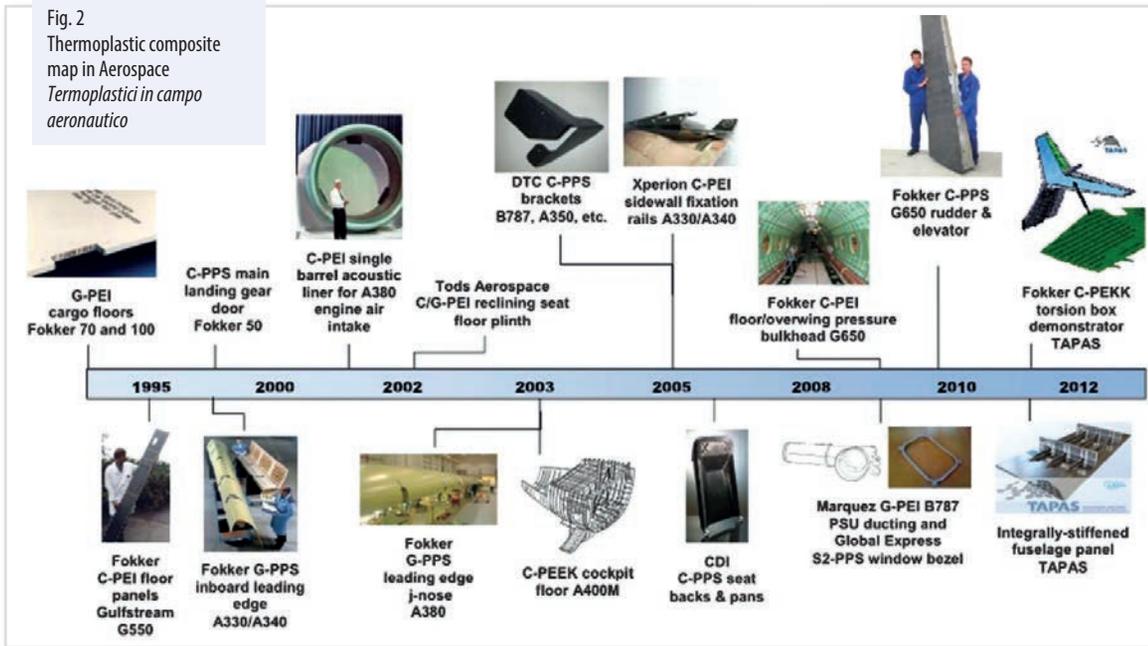


Fig. 2
Thermoplastic composite
map in Aerospace
*Termoplastici in campo
aeronautico*



used thermoplastic on G650 elevator and rudder (Fig. 2). Aimed by reduce costs and structural weight, technology studies have focused mainly on following technologies applicable to thermoplastic: Welding, Compression Moulding and Automatic

Placement. "Fiber Reinforced Polymer Composite Manufacturing Workshop: Summary Report 2014" presented key manufacturing process technologies, application areas for those technologies, the state-of-the-art, and the limitations and challenges

tutt'altro che inciso in modo negativo sull'andamento progressivo tenuto fino a quel momento. Le previsioni di crescita del trasporto aereo nella visione di riduzione dell'impatto ambientale, indirizzano gli studi di ricerca legata alle strutture aeronautiche, a svilup-

pare materiali e tecnologie che permettano di avere strutture più leggere e resistenti, con processi di assemblaggio più veloci e che necessitino di meno manutenzione. Tali studi dimostrano che i materiali compositi a matrice termoplastica, già ampiamente utilizzati in altri settori industriali, stanno riscuotendo un crescente interesse anche in campo aeronautico.

I materiali termoplastici in campo aeronautico

I materiali compositi a matrice termoplastica rappresentano un'area tecnologica in cui l'Europa possiede una posizione di leader nel panorama dell'aviazione generale: i passati studi di applicabilità e di ricerca in questo campo, come ad esempio TAPAS, hanno indicato che tali materiali sono dei seri candidati per applicazioni di

facing the technology today. Studies about welding were diversified in order to investigate different processes, as frequency Laser welding, Ultrasonic and Induction Welding. Induction Welding technology (Fig. 3) is the most developed, with a TRL (Technology Readiness Level) of 5. Compression Molding, widely used and developed in automotive, has TRL 6 in aeronautics. Automatic Placement process (Fig. 4), that uses robot for the lamination of the plies applying pressure and temperature on the surface, has TRL 6.

Applications of new technologies for thermoplastic materials

As part of the development and application of new technologies for the thermoplastic, DEMA S.p.A. has invested in various research projects concerning Automatic Placement, Compression Moulding and Induction Welding.

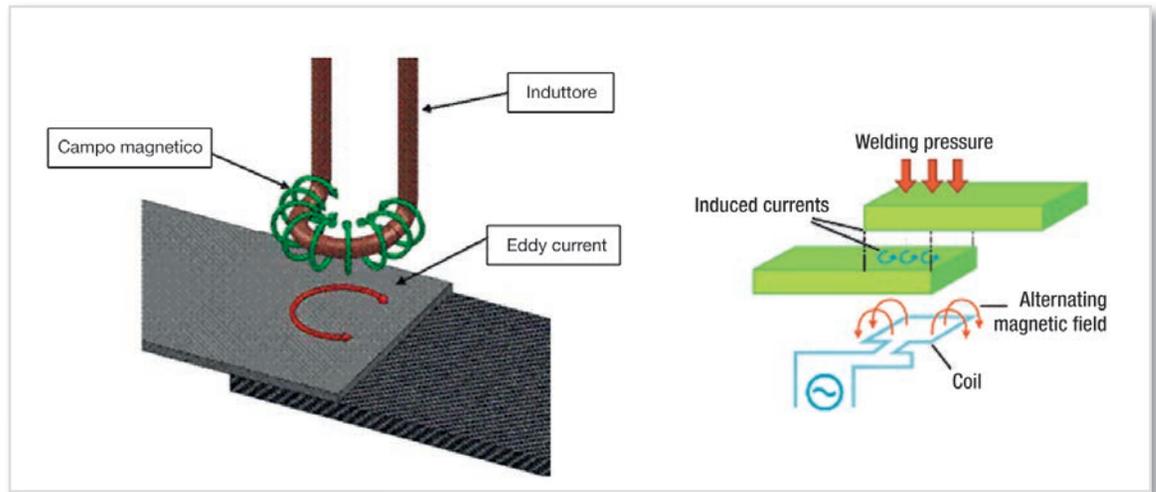


Fig. 3 Induction Welding Saldatura ad induzione elettromagnetica

In collaboration with CRIAQ (Consortium for Research and Innovation in Aerospace in Quebec), along with Canadian partners such Concordia University, McGill University, Bell Textron Canada Ltd and National Research Council of Canada, the company has participated in the

development of Automatic Tape Placement (ATP). The process has been optimized in terms of heat flow and of deposition rate with the aim of improving the quality of the product/process.

Mainly thermal aspects have been studied: thermocouples have been introduced inside the layers to accurately monitor the process temperature in the heating phase. The cooling rate



Fig. 4 Automatic Tape Placement (ATP) process Processo di deposizione automatica delle fibre (ATP)

limitazioni e le sfide che queste tecnologie presentano per il futuro. Gli studi sulla saldatura, in funzione delle caratteristiche intrinseche delle matrici termoplastiche, si sono diversificati andando a investigare differenti processi, tra cui laser ad alta frequenza, ultrasuoni e induzione elettromagnetica. La tecnologia dell'Induction Welding

(Fig. 3) è quella maggiormente sviluppata, attestandosi attualmente ad un TRL (Technology Readiness Level) pari a 5, nel quale si raggiunge la capacità di realizzare e validare dei componenti in un ambiente simulato. Il processo di formatura è principalmente indirizzato alla formatura per compressione (Compression Molding) la cui tecnologia deriva

larga scala nei futuri programmi aeronautici. "Come l'industria aerospaziale si muove per fusoliere composite e le ali, molte delle clip e delle bracket strutturali di alluminio che collegano le principali componentistiche interne sono sempre più frequentemente sostituite con termoplastici compositi. I compositi termoplastici garantiscono una combinazione di resistenza strutturale, al fuoco e alla corrosione galvanica che permette di ottenere significativi risparmi in termini di peso e di processo" (Tom Smith - Tencate). Ad oggi le tecnologie associate a questi materiali sono mature al punto da poter essere impiegate su componenti aeronautici operativi: è in composito termoplastico il cono della trave di coda

dell'AW169; Airbus utilizza materiale termoplastico per il bordo d'attacco fisso esterno dell'A380, per il pavimento di cabina del A400M e per alcune brackets del A350, la Gulfstream per l'elevatore e timone del G650 (Fig. 2). Guidati principalmente dall'obiettivo di ridurre i costi e il peso, gli studi tecnologici sono incentrati essenzialmente su tre tipi di tecnologie applicabili ai compositi termoplastici: la saldatura, la formatura dei fogli di laminato preconsolidato e l'automatic placement. Nel "Fiber Reinforced Polymer Composite Manufacturing Workshop: Summary Report 2014" sono descritti i punti chiave dei processi tecnologici produttivi, le aree di applicazione di queste tecnologie, lo stato dell'arte e le

was verified by a Differential Scanning Calorimetry (DSC) during the automatic lamination of the plies.

Tests results show a slight gradient in crystallinity levels for the PEKK and no gradient was found for the PEEK. The crystallinity levels through the thickness were very close together, and at the very high cooling rates, the difference of a few thousand °C/min does not affect the crystallinity level dramatically (Fig. 5).

The thermoplastic tailboom was manufactured using an automated fiber placement (AFP) machine located at National Research Council Canada's facility in Montreal.

As part of another research project for the development of a new regional aircraft, technologies of

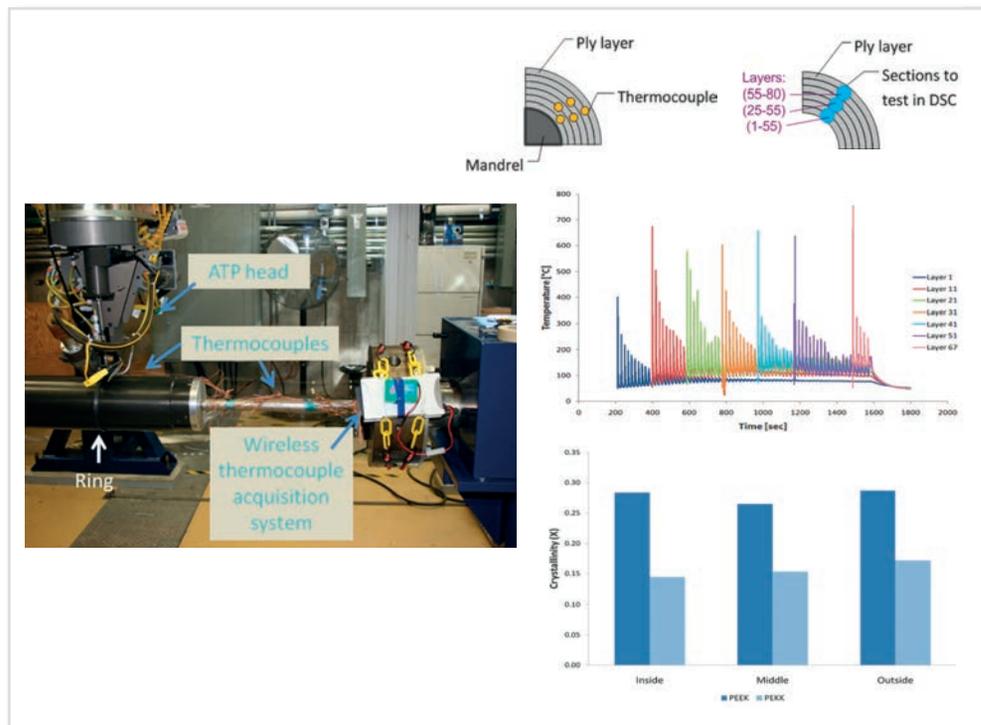


Fig. 5 Thermal aspect and results of ATP manufacturing process
Variabili termiche del processo ATP e risultati



compression molding and induction welding have been studied. The goal of the research project involves the design and construction of the demonstrator of the forward plug door (Fig. 6), with baseline in metallic sandwich, and aftward door with integrated airstairs. The first objective was to evaluate the best technology for components manufacturing: thermoset composite materials, with techniques such as RTM (Resin Transfer Molding), co-cured / co-bonded, and thermoplastic (PPS, PEEK) were evaluated.

Aspects such as industrialization and certification have influenced the choice also.

With weight reduction as main purpose, the elimination of mechanical joints represented the main idea on which research was focused.

The trade-off has validated that thermoplastic was the best solution in fact:

- RTM solution presented the

main advantage of being a one-shot process, but the need to develop a campaign of tests for the acquisition of the allowable and the complexity of the tools for the manufacture made it a non-competitive solution;

- Co-cured/co-bonded solution had the advantage of being an already known technology, but the complexity of the interfaces with the opening mechanism and the need to add metal components made it a not very good solution.

The use of thermoplastic composites shown, as main advantages, the thermo-welding capability between all the components, completely eliminating the mechanical joints and therefore reducing the number of parts (<50% to respect to baseline) and then the weight (<35%), as well as to reduce the time of production and assembly (<25%) and, accordingly, tool costs (<10%).

In the design phase has been studied the feasibility and

validity of electromagnetic induction welding and thermoforming. Induction Welding has been developed in cooperation

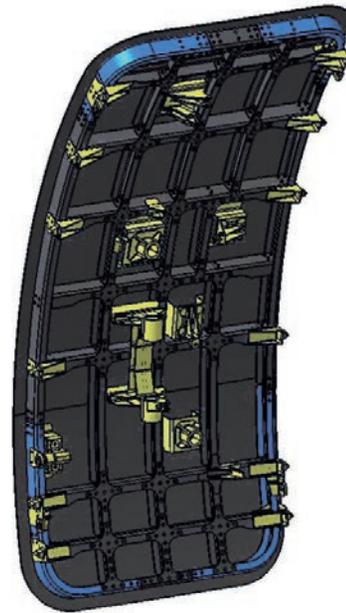


Fig. 6
Thermoplastic forward door study for new regional aircraft
Studio della porta anteriore in materiale termoplastico per un nuovo velivolo regionale

with CETMA in Brindisi, in order to calibrate the process and to define the allowable shear of welded areas: several single shear tests were performed, by varying both the welding parameters (temperature gradient, pressure, distance of the coil from the laminate) and the geometrical parameters of the specimens (overlap length, thickness of laminates). The results obtained show that, by optimizing the process parameters, values of Single Shear Strength are compatible with the design loads.

The thermoforming process was developed in collaboration with ACS Consulting and Carbopress of Modena. According to thermoforming cycle for component geometries, process parameters in terms of Temperature, Time and Pressure have been set, and the design of the equipment chain was finalized (Fig. 7). The thermoformed components have an excellent surface finish, the keeping of the tolerances

dall'automotive ereditando una maturità tale da essere, in aeronautica, identificata con un TRL pari circa a 6, essendo già stati realizzati dimostratori di sistemi e sottosistemi di componenti reali in ambienti simulati.

Anche il processo di Automatic Placement (Fig. 4), che prevede la stesura automatizzata delle lamine su tool tridimensionali con l'aiuto di robot che hanno il compito di applicare pressione e temperatura sulla superficie, presenta un grado di maturità tecnologico che lo pone al livello 6 di TRL.

Applicazioni di nuove tecnologie per materiali termoplastici

Nell'ambito dello sviluppo e l'applicazione delle nuove tecnologie per i materiali a matrice termo-

plastica, DEMA S.p.A ha investito in differenti progetti di ricerca che riguardano l'Automatic Placement, il Compression Moulding e l'induction Welding.

In collaborazione con il CRIAQ (Consortium for Research and Innovation in Aerospace in Quebec), insieme a partner canadesi quali Concordia University, McGill University, Bell Textron Canada Ltd e il National Research Council of Canada, l'azienda ha partecipato allo sviluppo del processo di Automatic Tape Placement (ATP). Il processo è stato ottimizzato in termini di flusso di calore, velocità coda di un elicottero in composito termoplastico è stato effettuata utilizzando le capabilities del laboratorio del National Research Council Canada di Montreal.

Nell'ambito di un ulteriore pro-

getto di ricerca per lo sviluppo di un nuovo velivolo regionale sono state studiate le tecnologie del compression moulding e dell'induction welding. L'obiettivo del progetto di ricerca prevede la progettazione e la realizzazione del dimostratore della porta anteriore, di tipo plug (Fig. 6) con baseline in sandwich metallico, e della porta posteriore con scaletta integrata.

Il primo obiettivo è stato di valutare la migliore tecnologia da utilizzare per la realizzazione dei componenti: è stato valutato l'utilizzo di materiali compositi termoindurenti, con tecniche di processo quali RTM (Resin Transfert Molding) e co-cured/co-bonded, e materiali a matrice termoplastica (PPS, PEEK) termosaldati.

La scelta è stata influenzata

anche da aspetti quali industrializzazione e certificabilità.

Essendo la riduzione di peso l'obiettivo principale, l'eliminazione delle giunzioni meccaniche rappresentava l'idea principale su cui è stata incentrata la ricerca.

La fase di studio preliminare ha mostrato come i materiali termoplastici fossero la soluzione migliore:

- l'RTM presentava il vantaggio principale di essere un processo one-shot ma la necessità di sviluppare una campagna di test per l'acquisizione degli ammissibili e la complessità degli attrezzi per la fabbricazione non la rendevano competitiva;

- la soluzione co-cured/co-bonded presentava il vantaggio di essere una tecnologia già conosciuta, ma la complessità



Fig. 7
Thermofforming tool for internal door component
Attrezzo di termoformatura per un elemento interno delle porte

imposed as well as a time of creation extremely reduced by approximately 2 minutes for a single part. The use of forming and welding allows to obtain a structure without mechanical joints that has good characteristics in terms of resistance (Fig. 8)

Conclusions

DEMA research activities demonstrate the alignment with Horizon2020 objectives and they open new technological and manufacturing overview able to increase know-how and technical skills for aeronautic composite

thermoplastic materials in Italy. In ATP, optimum process parameters for consolidation of thermoplastic composite are still under study and a very efficient usage of this technology contributes to

significantly reduce the lamination cost and flow time. In induction welding, next objective will predict potential deformations due to the tensions triggered during welding and reduce post-weld surface roughness, especially for aerodynamic surfaces. In thermoforming, the aim is to improve the process in order to avoid the generation of wrinkles in parts with strong curvature and reduce forming costs for double curvature surfaces, as AFT door skin.

The studies carried out so far, although not yet in industrial phase, looked forward to continue research and development of thermoplastic materials for aeronautical components.

delle interfacce con il meccanismo di apertura e la necessità di aggiungere componenti in metallo ne facevano una tecnologia non ottima per gli obiettivi di progetto.

L'utilizzo di compositi termoplastici presentava come principali vantaggi quello di termosaldare tra loro tutti i componenti, eliminando completamente la chiodatura e ridurre quindi il numero delle parti (<50% rispetto alla base-line) e quindi del peso (<35%), nonché di ridurre il tempo di produzione e assemblaggio (<25%) e, quindi, i costi delle attrezzature (<10%). Nella fase di progettazione sono state studiate la fattibilità e la validità delle tecnologie legate a questi materiali, ovvero la saldatura a induzione elettromagnetica e la termoformatura.

Il processo di induction welding, in collaborazione con il CETMA di Brindisi, è stato sviluppato per calibrare il processo e definire gli ammissibili a taglio per le zone termosaldate: numerosi test single shear sono stati effettuati, facendo variare sia i parametri di saldatura (gradiente di temperatura, pressione, distanza della bobina dal laminato) che i parametri geometrici dei provini (lunghezza di overlap, spessore dei laminati). I risultati ottenuti dimostrano come, ottimizzando i parametri di processo, si raggiungano valori di Single Shear Strength compatibili con i carichi agenti. Il processo di termoformatura è stato sviluppato e messo a punto in collaborazione con ACS Consulting e Carbopress di Modena. In funzione del ciclo di for-



Fig. 8
Thermoformed and welded components
Componenti termoformati e termosaldati

matura studiato in funzione delle geometrie dei componenti, sono stati settati i parametri di processo in termini di temperatura, tempo e pressione nonché è stata finalizzata la progettazione della catena delle attrezzature (Fig. 7). I componenti termoformati presentano un'ottima finitura superficiale, il mantenimento delle tolleranze imposte nonché un tempo di realizzazione estremamente ridotto di circa 2 minuti per singola parte. L'utilizzo dei due processi di formatura e saldatura

permette di ottenere una struttura senza giunzioni meccaniche che presenta ottime caratteristiche in termini di resistenza (Fig. 8).

Conclusioni

Le attività di ricerca sviluppate dalla DEM A S.p.A. dimostrano un trend coerente con gli obiettivi descritti in Horizon2020 e aprono nuovi orizzonti tecnologici e produttivi capaci di incrementare in Italia il know how e le competenze tecniche relative ai materiali compositi termoplastici in campo

aeronautico. Nel processo ATP si continua a ricercare l'ottimo nei parametri di processo per il consolidamento dei materiali e un utilizzo sempre più efficiente di questa tecnologia, che permette una significativa riduzione dei tempi e dei costi di laminazione. Nel processo di induction welding gli obiettivi sono principalmente di valutare le possibili tensioni di deformazione causate dal processo di saldatura stesso e migliorare la finitura superficiale nella zona di saldatura, che risulta ad oggi non essere ottimale per superfici aerodinamiche. Nel processo di termoformatura, la finalità è quella principalmente di migliorare il processo per evitare la presenza di grinze nei componenti che presentano una forte curvatura e ridurre i costi delle attrezzature per superfici a doppia curvatura, come lo skin della porta posteriore. Gli studi finora svolti, sebbene non ancora industrializzabili, auspicano il proseguimento della ricerca e dello sviluppo dei materiali a matrice termoplastica su componenti aeronautici industrializzabili.

ABOUT THE AUTHORS

Claudia Placidi has a Master degree in Aeronautical Engineering at University of Rome, "La Sapienza", with the thesis "Structural analysis and optimization for a racing UAV composite wing" (2011). Since 2012 has been employed for DEMA as Structural Analyst and her main activities include detail stress analysis for metallic and composite structure and, in R&D, development and application of thermoplastics on fuselage structure.

***Claudia Placidi** consegue la laurea specialistica in Ingegneria Aeronautica all'Università di Roma "La Sapienza" con la tesi "Analisi strutturale e ottimizzazione dell'ala di un UAV da competizione" nel 2011. Dal 2012 è analista strutturale presso la DEMA S.p.A., dove si occupa di analisi strutturali per componenti metallici e in composito e, nell'ambito R&D, di sviluppo e applicazione dei materiali termoplastici su strutture di fusoliera.*

Danilo Malacaria. He is graduated in aerospace structural engineering at the University of Napoli "Federico II" with a thesis in the field of numerical and experimental correlations by finite element code. After a brief experience in the automotive, since 2005 he has been working for DEMA SpA. With the role of structural analyst, he has had the opportunity to work for the development and certification of the B787 Fan Cowl and for A380 fatigue tests. From 2009, he coordinates R&D programs by defining collaborations with national and international research centres, including CIRA and CRIAQ and he is a member of ACARE Italia. Currently he is the Head of Research and Innovation.

***Danilo Malacaria** è laureato presso l'Università Federico II di Napoli con una tesi nel campo delle correlazioni numerico-sperimentali. Dal 2005, dopo una breve esperienza nel settore automotive, lavora in DEMA SpA. Nel ruolo di analista strutturale ha seguito importanti programmi di sviluppo e di certificazione quali 787 fan Cowl ed A380 Fatigue Test. Attualmente è il Responsabile della Ricerca e della Innovazione Tecnologica coordinando e definendo, tra l'altro, le strategie di collaborazione nazionali e internazionali fra le quali quelle con il CIRA ed il CRIAQ. È membro rappresentante in ACARE Italia.*