

prova si rimanda il lettore all'interessante manuale edito da Zenkert (1). Nello stesso lavoro, così come in (2) e (3), sono presentate anche interessanti panoramiche sulle proprietà dei materiali costituenti di maggiore interesse ingegneristico.

Tra le prove più importanti e di più frequente esecuzione è comunque opportuno ricordare almeno le prove di resistenza a trazione e a compressione delle pelli, le prove di compressione, flessione e taglio sull'anima e le prove di flessione a 3 e 4 punti sui pannelli completi. Alcuni esempi dell'attività di caratterizzazione sperimentale di materiali e strutture sandwich svolta presso i laboratori del Dipartimento di Tecnica e Gestione dei sistemi industriali dell'Università di Padova sono riportati nelle [Fig. 2-4].

Modalità di cedimento

Data la particolare natura multistrato e multimateriale di una struttura sandwich, le possibili cause di cedimento sono diverse e molteplici e possono interessare le pelli, l'anima oppure la struttura completa. In funzione della geometria, delle proprietà dei materiali utilizzati e delle condizioni di carico, alcuni modi di cedimento saranno più critici di altri, limitando le prestazioni e la capacità portante della struttura. Tra le principali e più frequenti modalità di cedimento è opportuno ricordare almeno le seguenti, schematicamente rappresentate in [Fig. 5]:

- rottura delle pelli (per trazione o compressione);

- rottura a taglio o per instabilità dell'anima;

- instabilità globale (buckling);

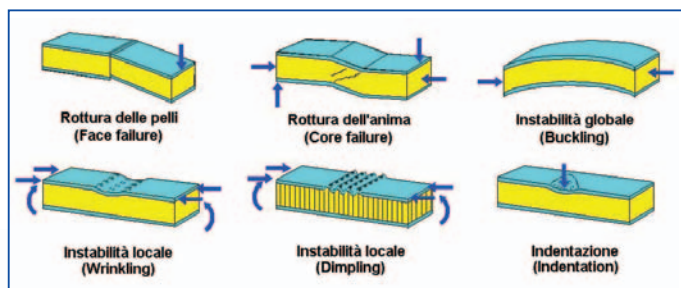
- instabilità locale delle pelli (wrinkling o dimpling);

- indentazione;

- delaminazione all'interfaccia pelle-anima o in corrispondenza di inserti.

Per ognuna delle modalità di cedimento citate sono disponibili adeguati criteri di resistenza, con formulazioni più o meno complesse in grado di fornire una previsione delle condizioni tensionali critiche per l'attivazione del modo di cedimento considerato. Questi valori critici andranno in seguito confrontati con le condizioni tensionali presenti nella struttura per effetto dei carichi esterni applicati. Senza entrare nel merito della trattazione teorica dei diversi criteri di cedimento, che esula dagli scopi del presente lavoro, è possibile ricordare che i diversi modi di cedimento sono almeno in qualche misura condizionati dal comportamento della struttura stessa. Si è già detto, e verrà ulteriormente chiarito nel seguito, come le pelli sopportino principalmente la componente flessionale della sollecitazione dovuta ai carichi esterni e questo comporta la nascita di tensioni di trazione e compressione nelle pelli stesse, causa principale del loro cedimento. Per la stessa ragione, l'anima cede prevalentemente a taglio. Carichi di compressione possono poi generare fenomeni di instabilità globale che, oltre a compromettere la funzionalità della struttura possono portare a cedimento le pelli e l'a-

[Fig. 5] - Principali modi di cedimento di un pannello sandwich / Main failure modes of a sandwich panel



Failure Modes

The intrinsic multi-layer, multi-material structure of the sandwich panels has a direct influence on the several failure modes the panels can

[Fig. 4] - Prova di flessione a tre punti su pannello sandwich in laminato carbonio/epossidica con anima in schiuma polimerica / Three-point bending test on a carbon/epoxy skin, polymeric foam core sandwich panel



experience, which can involve the skins, the core or even the complete structure due to the interaction of the constituents. Depending on panel geometry, material properties and loading conditions one or more failure modes may result therefore the load bearing capability of the whole structure. Among the more important and also more frequent modes of failure, at least those presented in [Fig. 5] and summarised below should be mentioned:

- skin failure (in tension or compression);

- core shear failure and shear crimping;

- buckling;

- skin wrinkling or dimpling;

- indentation;

- delamination at the skin/core interface or near metal inserts.

For each mode of failure an appropriate failure criteria is available, suitable to provide an evaluation of the critical loading conditions for the activation of the mode under analysis. The stresses associ-

ated to the critical loads have then to be compared with the stress fields acting on the structure due to the externally applied loads. Without going into the analytical details of the formulations for the different failure criteria, which is beyond the aim of this paper, it is worth noting that the failure modes are, at least to a certain extent, conditioned by the behaviour of the structure. As already mentioned, the skins sustain, mainly, the bending actions and this induces in the skins tensile and compressive stresses which are the main causes of their failure. On the other hand, the core fails mainly due to the shear actions. External compressive loads may lead to overall buckling of the panel and to the subsequent possible failure of skins and core

which can reach the critical conditions in tension/compression or shear, respectively. Compressive loads may lead also to local instability of the skins (wrinkling and dimpling), which can occur also on the compressed face of a panel under bending. The indentation is a typical failure mode of the foam cores consisting in the local crushing of the foam due to the application of an external load on a too reduced skin area. The delamination, instead, may appear at the skin/core interface near the free edges as well as near the inserts required in the structure. In both cases the integrity of the structure is deeply compromised. The delamination at the skin/core interface, however, can be reduced or even avoided by a proper choice of the adhesive and a careful control of the manufacturing process. In the presence of inserts, particularly if metallic, the good adhesion and therefore the delamination remain a critical problem; in