

Material consideration for better crash parts: from metallic to fiber reinforced thermoplastic materials

Gihune Jung and Sebastian Schmeer - Institut für Verbundwerkstoffe GmbH (Germany)

INTRODUCTION

The crashworthy structures in automotive and aircraft industries are mainly based on two kinds of subsystems like rigid parts and deformable parts. The rigid parts are for integrity against crushing to save the passenger by ensuring enough space, for which the most adequate material might be the metallic material of high strength or ultra-high strength. But in the case of deformable parts, it should be designed to dissipate the impact energy in a progressive, stable and controlled manner, thereby preventing the rapid deceleration which can cause serious injuries such as brain damages. This article focuses on an improved crash performance by selecting the right material for better deformable parts.

Before entering into technical matters, the word

of 'adaptive crash control' should be emphasized more than 'adaptive headlights' or 'adaptive cruise control' that is the convenient option assisting nighttime driving or maintaining a safety distance. The 'adaptive crash control' is the vital matter which should be more actively explored to minimize any damages. Even though the crash-free car is realized in the near future through the numerous self-driving car projects, it might not imply no crashworthy parts in a car, i.e. no rigid frame, no crash absorber and bumper system, no seat belt and air-bag system, and so on. Furthermore, if the manned drone is early commercialized as unveiled in CES 2016, then the 'adaptive crash control' for the understructure will be more important than others. In brief, the true meaning of crashworthy parts is to pour money into what should not happen.

CRASHWORTHINESS AND CRUSHING MODES

There are two kinds of crashworthiness tests. One is quasi-static test that is very similar to the compression test in a speed level of millimeter per minute. The other is dynamic test in a speed level of meter per second, which is preferred for the true simulation. The performance is expressed in terms of specific energy absorption (SEA) having the unit of J/g, which is defined as the ratio of the applied energy to the crushed mass. In dynamic test, the applied energy is the kinetic energy based on the velocity just before impact, and the crushed mass is normally calculated from the resultant crushing displacement. As shown in fig. 1, the load-displacement curve is comprised of a peak load, fluctuation, and spring back to rest, while the crushing velocity decreases to zero and springs back to rest. The ideal curve has the

Come migliorare le parti soggette a urto: dal metallo alle termoplastiche fibrorinforzate

Gihune Jung e Sebastian Schmeer - Institut für Verbundwerkstoffe GmbH (Germany)



G. Jung

INTRODUZIONE

Le strutture a prova d'urto nelle industrie automobilistica e aeronautica si basano principalmente su due tipologie di sottosistemi, le parti rigide e quelle deformabili. Le parti rigide servono a proteggere dallo schiacciamento salvando il passeggero grazie al sufficiente spazio disponibile. Per questo il materiale più adatto potrebbe essere il materiale metallico di alta o massima resistenza. Eppure, nel caso delle parti deformabili, la progettazione dovrebbe avvenire in modo da dissipare l'energia d'urto in modo progressivo, stabile e controllato, prevenendo

in questo modo la rapida decelerazione che può causare ferite gravi come traumi cranici. In questo articolo si discute la prestazione antiurto migliorata grazie alla scelta del materiale idoneo per parti deformabili migliori.

Prima di addentrarci nel vivo del contenuto tecnico dell'articolo, è bene dare enfasi alla locuzione "controllo dell'urto adattivo" e non a quella "fari adattivi" o "controllo della velocità di crociera adattiva", vale a dire l'opzione disponibile durante la guida notturna o per mantenere la distanza di sicurezza. Il "controllo dell'urto adattivo" è la tematica principale che dovrebbe

essere esplorata con rigore per ridurre al minimo i danni. Anche se si prevede di realizzare nel futuro l'automobile esente da urti con i numerosi progetti di automobili autopilotate, questo obiettivo potrebbe non implicare la creazione di parti di un'automobile a prova d'urto, vale a dire assenza di strutture rigide, di paraurti e parafranghi, di cinture di sicurezza e air-bag ecc. Oltre a questo, se sarà a breve commercializzato il drone pilotato dall'uomo, come già svelato a CES 2016, il "controllo dell'urto adattivo" per la sottoscocca diventerà ancora più importante di altri. In breve, il vero significato del termine

shape of a rectangle, maintaining a constant mean-load (progressive) of little fluctuation (stable) up to the maximum displacement.

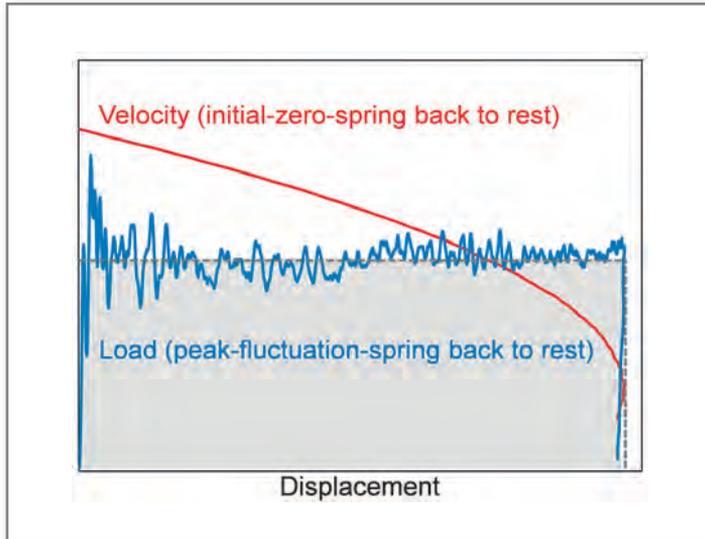


Fig. 1 - Load-displacement curve and crushing velocity change in dynamic test
 Curva del dislocamento del carico e cambiamento della velocità di schiacciamento nel test dinamico

“parte a prova d’urto” è in realtà dispendio di denaro in qualcosa che non dovrebbe succedere.

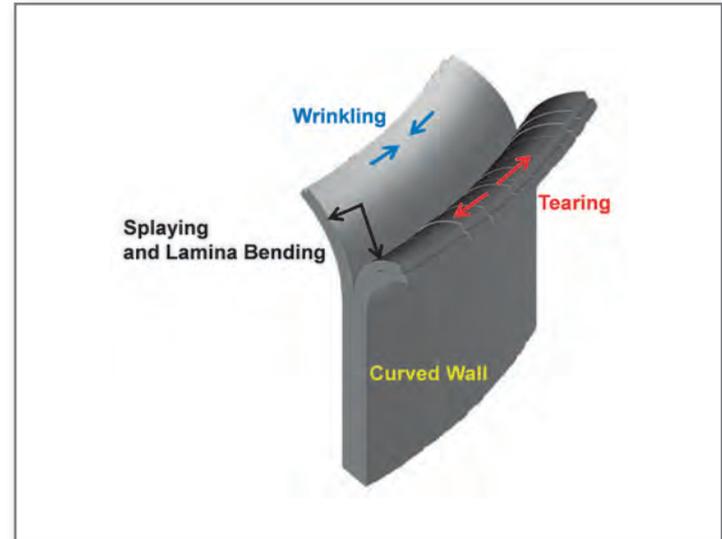


Fig. 2 - Splaying and lamina-bending mode followed by wrinkling and tearing
 Modalità di “inclinazione e piegatura della lamina” seguita dalla modalità “raggrinzamento e strappo”

The crushing modes are dependent on material characteristics and classified into three types. The first one is 'progressive folding (or local buckling) mode', which is a typical mode of ductile material. The second one is 'fragmentation mode close to pulverization' of brittle material as a well-known behavior of Epoxy/CF. The third one is 'splaying and lamina-bending mode' of tough material and followed by 'inside-wrinkling and outside-tearing' in the case of curved wall as depicted in fig. 2.

TYPICAL VALUES AND LIMITATIONS

The metallic material dissipates the impact energy normally with the non-symmetrical folding of diamond shape, and the typical value of SEA is around 20 J/g, but further drops to below 10 J/g by assembly processes. Besides this low value of SEA, the metallic material has the serious limitation on length-efficiency. As shown in fig. 3, the metallic material remains the folded zone along the specimen length. A length-efficiency was roughly calculated as 70 % of the initial specimen length, of which the remainder cannot dissipate the impact energy but transfer it to connected parts. The length-efficiency (or available displacement) is a very important requirement for the endurable deceleration level

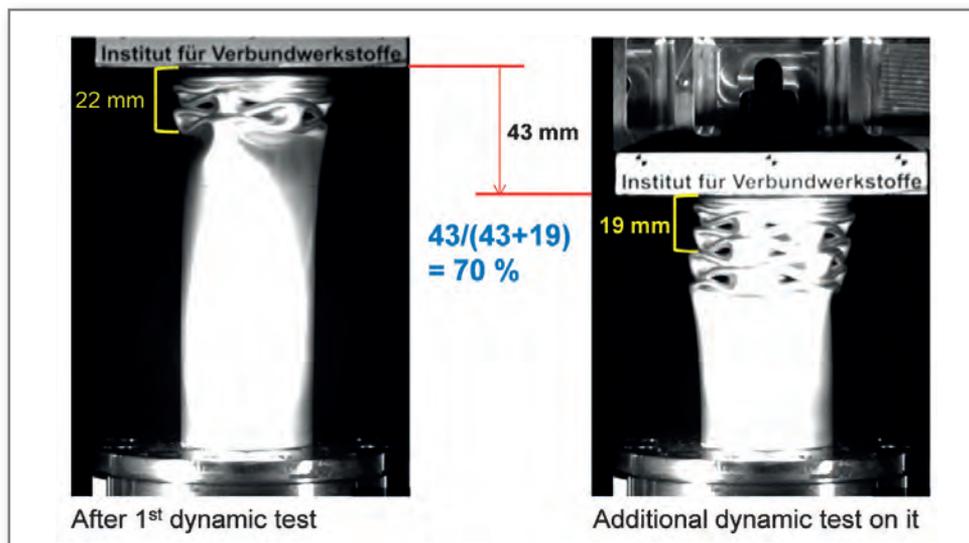


Fig. 3 - Reduced length-efficiency of metallic material (dynamic test with 9.5 m/s)
Riduzione dell'efficacia della lunghezza del materiale metallico (test dinamico con 9,5 m/s)

to prevent brain damages.

In the case of fiber reinforced polymer composites, resulting from its low density, the higher value of SEA is easily attainable. The crushing mode and SEA are influenced by two groups of parameters. The matrix type (thermoset or thermoplastic), fiber type, fiber content, and fiber orientation are classified as the intrinsic parameter, whereas the

extrinsic parameter includes specimen geometry, processing condition, trigger, and impact velocity. The Epoxy/CF has the typical value of SEA around 65 J/g in dynamic test, over 3 times higher than metallic material, carefully nominated from the literatures for continuous carbon fiber reinforcement of around 50 vol. %. Compared to the quasi-static test showing 'splaying and

RESISTENZA E MODALITÀ D'URTO

Esistono due tipologie di test di resistenza all'urto. Il primo è il test quasi-statico, molto simile al test della compressione in un range di velocità di millimetri al minuto. L'altro è il test dinamico in un range di velocità di metri al secondo, che è preferibile ai fini di una simulazione realistica.

La prestazione è espressa in termini di assorbimento specifico di energia (SEA) con l'unità J/g, che è definita come il rapporto fra energia applicata e massa di schiacciamento. Nel test dinamico, l'energia applicata è l'energia cinetica basata sulla velocità prima dell'impatto e la massa di schiacciamento è calcolata normalmente dal dislocamento dello schiacciamento da urto risultante. Come mostrato in fig. 1, la curva di dislocamento del carico è compresa fra il carico di picco, la fluttuazione e il ripristino dello stato di riposo mentre la velocità di schiacciamento diminuisce a

0 e ritorna allo stato di riposo. La curva ideale ha la forma di un rettangolo, che mantiene la media costante di carico (progressiva) di una leggera fluttuazione (stabile) fino al dislocamento massimo. Le modalità di schiacciamento dipendono dalle caratteristiche del materiale e vengono classificate in tre categorie. La prima è del modo di "incurvatura progressiva" (o ingobbamento), che è tipico dei materiali duttili. Il secondo è il "modo di frammentazione quasi polverizzazione" del materiale fragile, un comportamento ben noto dell'Epossidica/Fibra di Carbonio. Il terzo è "il modo inclinazione e piegatura della lamina" del materiale rigido, seguito dal raggrinzamento interno e strappo esterno" nel caso di una parete curva come descritto in fig. 2.

VALORI TIPICI E LIMITI

Il materiale metallico dissipa l'energia d'urto,

normalmente con piegatura asimmetrica a forma di diamante e il valore tipico SEA si aggira sui 20 J/g, ma diminuisce ulteriormente fino a raggiungere i 10 J/g nel processo di assemblaggio. Oltre a questo valore ridotto di SEA, il materiale metallico presenta dei chiari limiti sull'efficacia della lunghezza. Come mostrato in fig. 3, il materiale metallico permane nella zona ripiegata nella lunghezza del campione. L'efficacia della lunghezza è stata calcolata pari a circa il 70% della lunghezza del campione iniziale, la cui rimanenza non può dissipare l'energia d'urto ma trasferirla alle parti connesse. L'efficacia della lunghezza (o dislocamento disponibile) è un requisito molto importante ai fini del grado di decelerazione per prevenire danni cerebrali. Nel caso dei compositi polimerici a fibra rinforzata, a causa della ridotta densità, è facilmente raggiungibile un elevato valore di SEA. La modalità di schiacciamento e

lamina-bending mode', the dynamic test undergoes 'fragmentation mode' and results in 20~30 % drop of SEA. This is why the dynamic test is preferred for the true simulation. The length efficiency for the fragmentation mode becomes 100% because there is no folded zone. But its behavior close to pulverization does not seem so attractive, on account of scattered pieces in all directions or scattering with high velocity.

APPROACH FOR THE BETTER MATERIAL

As a basic requirement, the crash energy absorption should be accompanied by a progressive, stable and controlled manner. The final goal is to achieve the acceptable value of the performance per weight and cost. For the better crash parts, the material should satisfy two additional requirements, cost-effectiveness and flexibility in design, as summarized in fig. 4. Here the approach is directed to use GF rather than CF, long fiber rather than continuous fiber, and thermoplastic material for the attractive 'splaying and lamina-bending mode'. Most of all, the prejudice against long fiber reinforcement should be checked that it is weaker than continuous fiber reinforcement. The modulus levels of PP/GF materials are 6 GPa for glass mat reinforced thermoplastic (GMT, long fiber, random directional, 19 vol. % GF), 13 GPa for TwinTEX® (continuous fiber, 0/90° woven fabric, 35 vol. % GF) and 20 GPa for TEPEX® (continuous fiber, 0/90°

SEA sono influenzati da due serie di parametri. La tipologia di matrice (termoindurente o termoplastica), il tipo di fibra, il contenuto di fibra e l'orientamento della fibra sono classificati come parametri intrinseci, mentre il parametro estrinseco comprende la geometria del campione, la condizione di processo, l'avviamento e la velocità dell'impatto. Expo/CF ha il valore tipico di SEA pari a circa 65 J/g nel test dinamico, più di tre volte superiore al materiale metallico, precisamente definito in letteratura per il rinforzo in fibra di carbonio continua di circa 50 vol%. Rispetto al test quasi statico che mostra il "modo inclinazione e piegatura della lamina", il test dinamico implica il "modo di frammentazione" e dà una riduzione del 20~30% di SEA. Questo è il motivo per cui viene scelto preferibilmente il test dinamico per una simulazione quanto più rispondente alla realtà. L'efficacia della lunghezza per il modo frammentazione arriva al 100% perché non vi è alcuna area ripiegata. Eppure la sua risposta "quasi polverizzazione" non sembra così interessante, se si considerano i pezzi dispersi in tutte le direzioni o che si propagano ad alta velocità.

L'APPROCCIO AL MATERIALE MIGLIORE

Come requisito basilare, l'assorbimento dell'energia d'urto deve essere accompagnato da una modalità progressiva, stabile e controllata. L'obiettivo finale è raggiungere un valore accettabile della prestazione in base

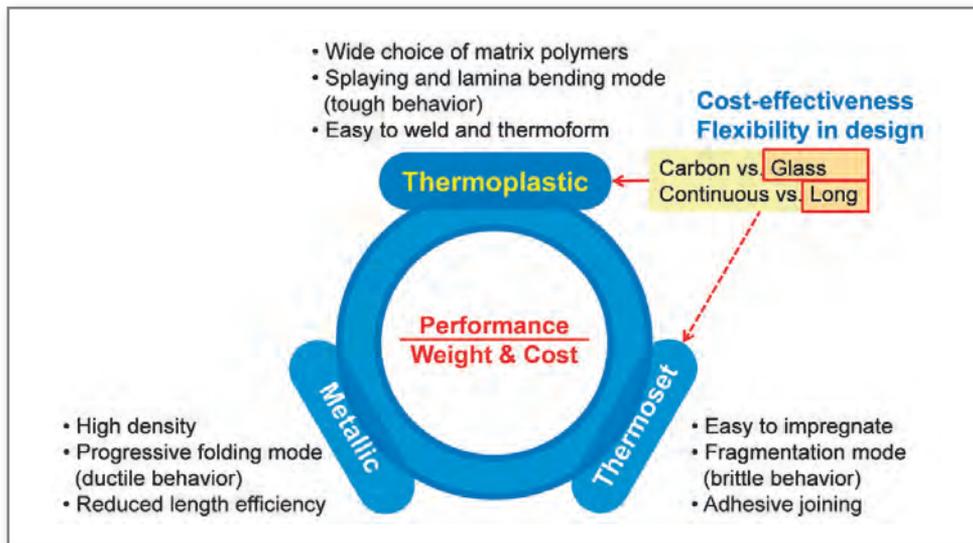


Fig. 4 - Approach in material for the better crash parts
Approccio al materiale migliore per le parti soggette a urto

woven fabric, 45 vol. % GF). When compared with the theoretical curves, these values are obviously correlated to the fiber content and orientation, not to the fiber length. Thus, if the fiber content is as high as the continuous fiber reinforcement, the long fiber reinforcement can catch up the modulus level to some degree for isotropic layup of continuous fiber.

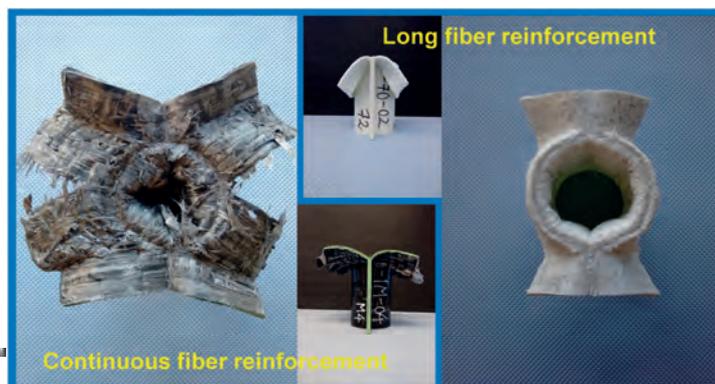


Fig. 5
 Crushed features for long and continuous fiber reinforcements
Particolari dei rinforzi in fibra lunga e continua

al peso e ai costi. Per ottenere delle parti soggette agli urti migliori, il materiale deve soddisfare due ulteriori requisiti, l'efficacia dei costi e la flessibilità progettuale, come riportato sommariamente in fig. 4. In questo caso la tecnica riguarda l'uso fibre di vetro (GF) e non fibre di carbonio (CF), con fibra lunga e non continua e materiale termoplastico per "il modo inclinazione e piegatura della lamina". Prima di tutto, il pregiudizio contro il rinforzo a fibra lunga dovrebbe essere preso nuovamente in considerazione confrontando questo con il rinforzo fibra continua. I livelli del modulo dei materiali PP/GF sono 6 GPa per le termoplastiche rinforzate con tessuti di vetro (GMT, fibra lunga, direzionale casuale, 19 vol.% GF), 13 GPa per TwinTEX® (tessuto fibra continua, 0/90°, 35 vol % GF) e 20 GPa per TEPEX® (tessuto fibra continua, 0/90°, 45 vol % GF). Confrontandoli con le curve teoriche, questi valori ovviamente risultano essere

correlati al contenuto di fibra e all'orientamento, ma non alla lunghezza della fibra. Quindi, se il contenuto di fibra è elevato tanto quanto il rinforzo di fibra continua, il rinforzo a fibra lunga può quasi eguagliare il livello del modulo per la laminazione isotropa della fibra continua.

TERMOPLASTICHE A FIBRA LUNGA, MATERIALE AD ALTO CONTENUTO DI FIBRA

I materiali termoplastici con rinforzo a fibra lunga utilizzati per compiere questo studio sono stati prodotti grazie alla tecnologia della struttura ibrida multistrato (MLH), costituita da diversi sottostrati GF sottili (lunghezza fibra mista di 25 e 37 mm) e film polimerici, da questo momento denominato tessuto MLH. La resistenza all'urto del tessuto MLH, correlato al rinforzo a fibra continua (prodotto tessuto 0/90°, non bilanciato 2/1) è stata comparata

LONG FIBER THERMOPLASTIC MATERIAL WITH HIGHER FIBER CONTENT

The long fiber reinforced thermoplastic materials used in this study are manufactured by the concept of multi-layered hybrid (MLH) structure consisting of several thin GF sub-layers (mixed fiber length of 25 and 37 mm) and polymer films, so now named as MLH-mat. The crashworthiness of MLH-mat related to continuous fiber reinforcement (0/90° unbalanced 2/1 woven fabric) was compared by dynamic test with the impact velocity of 8.3 m/s on the two PP/GF materials having the same fiber content of 45 vol. % (70 wt. %). The crushing mode was of almost the same nature as 'splaying and lamina-bending followed by

con test dinamico con la velocità d'urto di 8,3 m/s sui due materiali PP/GF contenenti la medesima quantità di fibra di 45 vol % (70 in peso %). La modalità d'urto si è rivelata quasi della stessa natura di quella della "inclinazione e piegatura della lamina" seguita dalla modalità "raggrinzamento interno e strappo esterno" (fig. 5) e ha fornito curve di dislocamento del carico come rappresentate nel grafico di fig. 6. Nella comparazione con il rinforzo a fibra continua, non si è riscontrata alcuna riduzione di SEA e del tessuto MLH. I test danno 44 J/g nel tubo dello schiacciamento del tessuto MLH oltre a una modesta deformazione. Mediante il calore convertito dall'energia cinetica, i materiali termoplastici vengono momentaneamente fusi e deformati liberamente nel caso di rinforzo a fibra lunga. Modificando il polimero della matrice del tessuto MLH in un materiale PA6 e mantenendo

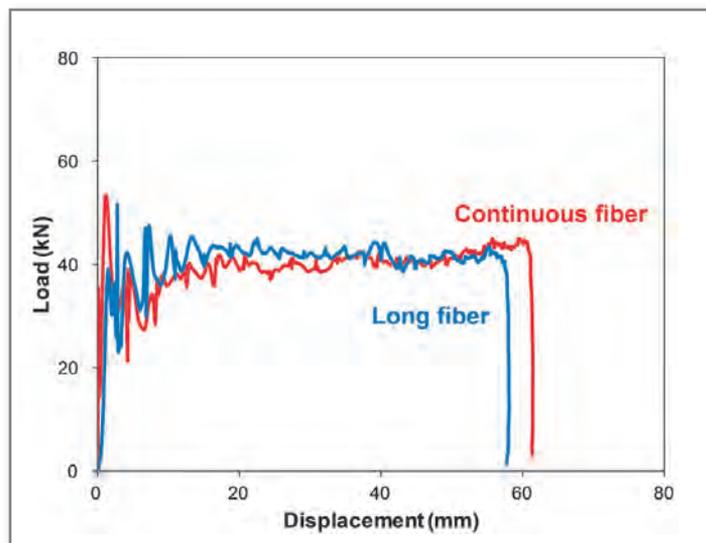


Fig. 6
Load-displacement curves for long and continuous fiber reinforcements
Curve dello spostamento di carico per rinforzi in fibre lunghe e continue

inside-wrinkling and outside-tearing' (fig. 5) and resulted in similar load-displacement curves as plotted in fig. 6. Compared to the continuous fiber reinforcement, there was no drop in SEA of the MLH-mat. The tests show 44J/g for the crush tube of MLH-mat and in addition a more gentle deformation. By the heat converted from kinetic energy, thermoplastic materials are momentarily melted and more freely deformed

of 52 J/g in dynamic test can be achieved, 18 % higher compared to PP grade. If eliminate the density effect in SEA, on the basis of the volumetric energy absorption (J/cm^3) the long glass fiber reinforced PA6 grade is equivalent to a continuous carbon fiber reinforced epoxy grade.

CONCLUSION

Glass fiber reinforced thermoplastic materials

show the desirable crushing mode of 'splaying and lamina-bending followed by inside-wrinkling and outside-tearing', which is quite distinct from 'progressive folding mode' resulting in reduced length-efficiency or 'fragmentation mode close to pulverization' of brittle fiber reinforced thermoset materials. Long fiber reinforced thermoplastic materials show the same level of SEA with continuous fiber reinforcement in the case of same fiber content. By skipping layup or weaving process, long fiber reinforced thermoplastic materials promise a better cost-effectiveness and moreover, flexibility in design owing to its flowability. The typical SEA values of long fiber reinforcement are 44 J/g for PP/GF45 vol. % (70 wt. %) and 52 J/g for PA6/GF42 vol. % (63 wt. %).

ACKNOWLEDGEMENT

The MLH-mat material has been developed together with LARGE Co., Ltd. in Korea as described in the research paper: G. Jung, P. Mitschang and C. Park, "New GMT material suitable for various polymers and high glass fiber content," *Plastics, Rubber and Composites*, vol. 44, no. 3, pp. 117-122, 2015.

alto il contenuto di fibra lunga, come PA6/GF42 vol% (63 % in peso), nel test dinamico è possibile ottenere un valore SEA di 52 J/g, 18% più alto del grado PP. Se si elimina l'effetto densità in SEA, sulla base dell'assorbimento dell'energia volumetrica (J/cm^3), il grado PA6 con rinforzo di fibra di vetro lunga è equivalente al grado epossidico rinforzato con fibra di carbonio continua.

CONCLUSIONI

I materiali termoplastici rinforzati con fibra vetro-sa presentano una modalità antischiacciamento interessante di "inclinazione e piegatura della lamina" seguita dalla modalità "raggrinzamento interno e strappo esterno", differente da quella della piegatura progressiva che provoca una riduzione dell'efficacia in lunghezza o "modalità di frammentazione che si approssima alla polverizzazione" dei materiali termoidurenti

rinforzati con fibra fragile. I materiali termoplastici rinforzati con fibra lunga presentano lo stesso grado SEA con rinforzo a fibra continua nel caso di un medesimo contenuto di fibra. Evitando la fase di laminazione o di tessitura, i materiali termoplastici rinforzati con fibra lunga promettono una superiore efficacia di costi e, oltre a questo, flessibilità progettuali grazie alla sua scorrevolezza.

I valori SEA tipici per il rinforzo a

fibra lunga corrispondono a 44 J/g per PP/GF45 vol% (70% peso) e 52 J/g per PA6/GF42 vol% (63% in peso).

about the author

Focusing on the lightweight application with thermoplastic materials of long and continuous fiber reinforcement, Gihune Jung has developed one material during LG Hausys Co., Ltd. (Korea) and moved to IVW (Germany) in 2012 to develop the other material of long fiber reinforcement. This is similar to GMT but suitable for various polymers and high fiber content. Now, he continues to find the competitive opportunity in crash application using the two kinds of fiber reinforced thermoplastic materials.

Specializzatosi nelle applicazioni leggere di materiali termoplastici come materiale per rinforzi in fibra lunga e continua, Gihune Jung ha messo a punto un materiale presso LG Hausys Co Ltd (Corea) per poi trasferirsi a IVW (Germania) nel 2012 per sviluppare l'altro materiale di rinforzo a fibra lunga. Questo è simile a GMT, ma adatto a vari polimeri e ad un alto contenuto di fibra. Attualmente, compie ricerche per reperire nuove opportunità nelle applicazioni antiurto utilizzando le due tipologie di materiali termoplastici a fibra rinforzata.