

New high performance bonding technologies for automotive lightweight designs

Nicole Schlingloff, Rainer Kohlstrung, Thomas Engels - HENKEL, ADHESIVE TECHNOLOGIES



INTRODUCTION

Over the recent years the automotive industry has successfully proceeded to build lighter vehicles with more fuel-efficient engines to significantly reduce fleet consumption in accordance with legal requirements.

Metals with low density such as aluminum and even magnesium are increasing in demand – as are polymer materials such as fiber-reinforced composites.

Fueled by the importance of those very diverse materials, questions regarding bonding technology enter the center stage of the discussion.

Modern lightweight designs require new bonding technologies in addition to new adhesive materials especially tailored to

overcome local stresses in the bond lines of the new car body designs made up of a multitude of different panel materials.

WEIGHT REDUCTION TO MEET FUTURE LEGAL STANDARDS

Two main factors drive vehicle weight reduction. In addition to the future maximum values for CO₂ emissions as expressed in the EU Directive 443/2009, an increasing number of countries are planning road usage fees based on such emissions. Both factors in combination

with increased fuel prices result in a strong motivation to purchase low emission vehicles. Fuel consumption can be lowered by different methods: Lightweight vehicle construction and. down-gauging vehicle components such

Fig. 1 - Lightweighting through integration of multi-materials

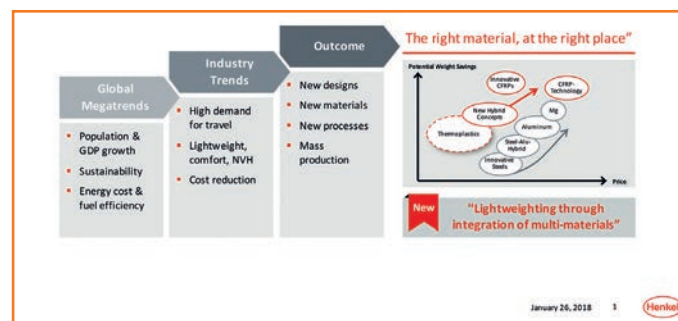


Fig. 1 - Riduzione del peso con l'integrazione di multimateriali

Nuove tecnologie di incollaggio ad alta prestazione per automobili di peso ridotto

Nicole Schlingloff, Rainer Kohlstrung, Thomas Engels - HENKEL, ADHESIVE TECHNOLOGIES



INTRODUZIONE

Nel corso di questi ultimi anni l'industria automobilistica ha messo in atto nuove tecniche per costruire veicoli di peso ridotto, dotati di motori grazie a cui sia possibile risparmiare combustibile in conformità con i requisiti normativi. La domanda di metalli a densità ridotta come l'alluminio e anche il magnesio è in crescita come i materiali di natura polimerica quali i compositi fibro-rinforzati. Tenuto conto dell'importanza dei diversi materiali, al centro della discussione

si pongono vari quesiti relativi alle tecnologie dell'incollaggio. Progettare automobili dal peso ridotto richiede nuove tecnologie di incollaggio oltre a nuovi materiali adesivi, idonei specificatamente a resistere alle sollecitazioni locali nelle linee di incollaggio della nuova auto, realizzata con una moltitudine di materiali diversi.

RIDUZIONE DI PESO PER SODDISFARE LE NORMATIVE

Sono due gli elementi principali che presiedono

alla riduzione del peso.

Oltre ai massimi valori consentiti per il futuro delle emissioni di CO₂ come espresse nella direttiva UE 443/2009, un numero crescente di paesi ha pianificato le tasse automobilistiche in base alla valutazione delle emissioni. Entrambi i fattori uniti ai prezzi in crescita del combustibile, inducono all'acquisto di veicoli a emissioni ridotte.

I consumi di combustibile possono essere ridotti con tecniche diverse: costruzione di veicoli leggeri e componenti di minori



as powertrain, engine, and underbody yield further secondary effects. Various studies show that a 10% curb weight reduction results in reduced emissions of 5.0 to 12.5 g of CO₂ (approx. 4.5 to 6%) per driven kilometer. The consequent implementation of lightweight measures in the car body therefore appears very effective. Increasing demands regarding stiffness, acoustics, crash performance and

Fig. 2 - Dependence of adhesive elastic modulus to section stiffness and residual stresses

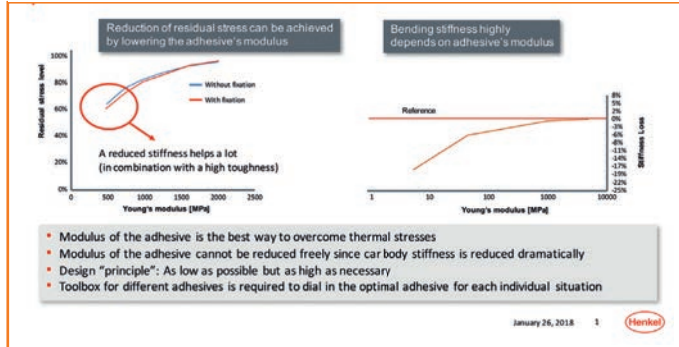


Fig. 2 - Variabile del modulo elastico dell'adesivo in base alla rigidità dell'area e delle sollecitazioni residue



dimensioni come il gruppo propulsore, il motore e la sottoscocca producono altri effetti secondari.

Vari studi mostrano che una contrazione del peso pari al 10% dà luogo a emissioni ridotte dal 5.0 al 12.5 g. di CO₂ (da circa 4,5% al 6%) per chilometro.

La conseguente implementazione della riduzione di peso della carrozzeria è diventata quindi una misura effettiva. La domanda crescente per quanto concerne la rigidità, le emissioni acustiche, la prestazione di resistenza all'urto e la stabilità a lungo termine entrano generalmente in conflitto con le costruzioni dal peso ridotto e sottolineano la complessità della sfida.

LE SCELTE ATTUALI PER RIDURRE IL PESO DEL VEICOLO

In questi ultimi decenni diversi approcci tecnologici finalizzati alla riduzione del peso della carrozzeria sono stati al centro dell'attenzione degli ingegneri OEM. I tre principali sono i seguenti:

a. Utilizzo di materiali a densità ridotta

I compositi a base di alluminio, magnesio termoplastici e plastici/termoindurenti, vengono frequentemente impiegati per componenti in sospensione, coperture e sempre di più per parti strutturali della carrozzeria.



long-term stability are generally in conflict with lightweight construction and underline the complexity of this challenge.

CURRENT TRENDS FOR REDUCING VEHICLE WEIGHT

Over the last decades several concepts for car body weight reduction have been in the focus of OEM engineers. The three most important ones are:

- a. **Use of low-density materials**
Aluminum, magnesium and plastics/thermoset and thermoplastic composites are often used in hang-on parts, covers and more and more in structural sections of the car body.
- b. **Targeted use of high-strength steels**
- c. **Integrated lightweight construction**
This is a combination of the various materials and functional characteristics based on the use of bonding technologies and production processes.

Fig. 3 - Empiric relationship between bond strength and elongation at break

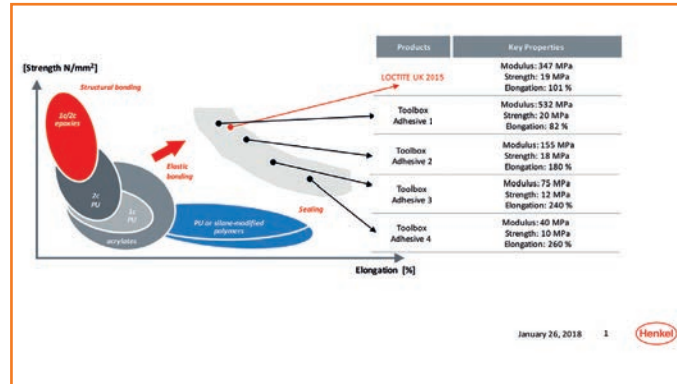


Fig. 3 - Relazione empirica fra la tenacità del legame e l'allungamento a rottura

POTENTIAL AND LIMITS OF CURRENT TECHNOLOGY TRENDS

When considering the already high share of aluminum it becomes clear that additional new technologies like fiber-reinforced composites will be required to further reduce weight. Today the right material at the right place is of paramount importance to arrive at optimal light weight car designs (Fig. 1).

INNOVATIONS IN STRUCTURAL BONDING

New trends for bonding in multi-material designs

Traditionally structural adhesives have been improved by increasing the elastic modulus and the tension or lap shear strength to cope with the stiffness changes and resist to the local stresses in bonded multi-material assemblies.

It can be shown in bondline simulation studies that in classical bond lines adhesives with an elastic modulus of more than 300 to 500 MPa will only lead to an increase of

approx. 5% of the assembly stiffness. However, a reduction of the elastic modulus of a structural adhesive from infinite to 500 MPa will reduce the residual stresses in the bondline from 100% to approx. 60% (at 500 MPa). Thus, optimizing the adhesive modulus to the stiffness of the assembly is the best way to overcome thermal stresses caused by the

Tab. 1 - Tensile and tensile shear properties at 23°C of some toolbox adhesives DIN EN 527, DIN EN 1465, tensile shear strength on e-coated steel

Toolbox Adhesives Adesivi Toolbox	# 1	Loctite UK 2015	# 2	# 3	# 4
Tensile young's modulus [MPa] Modulo di Young della trazione [MPa]	532	347	155	75	40
Tensile strength [MPa] Resistenza alla trazione [MPa]	20	19	18	12	10
Elongation at break [%] Allungamento a rottura [%]	82	101	180	240	260
Tensile shear strength, 0.5 mm gap [MPa] Resistenza allo scorrimento, spazio vuoto 0.5 mm [MPa]	25	24	15	12	11

Tab. 1 - Proprietà di resistenza alla trazione e resistenza alle forze di taglio di elementi in scorrimento a 23°C di alcuni adesivi DIN EN 527, DIN EN 1465, resistenza allo scorrimento su acciaio rivestito con tecnica elettrostatica



b. Uso mirato dell'acciaio ad alta resistenza

c. Costruzioni leggere integrate

Si tratta della combinazione di vari materiali e di caratteristiche funzionali basate sull'utilizzo di tecnologie di incollaggio e di processi di produzione

LIMITI E POTENZIALITÀ DELLE ATTUALI TENDENZE TECNOLOGICHE

Quando si prende in considerazione il già importante ruolo dell'alluminio, diviene evidente che nuove

tecnologie come i compositi fibro-rinforzati diventeranno obbligatorie per ridurre ulteriormente il peso. Allo stato attuale, il materiale giusto al posto giusto è un parametro fondamentale per giungere ad una progettazione di un'automobile dal peso ottimale (Fig. 1).

INNOVAZIONI PER L'INCOLLAGGIO STRUTTURALE

Nuove tendenze per l'incollaggio di oggetti multi-strutturali

Da sempre, gli adesivi strutturali vengono ottimizzati



different CTE of the assembly materials.

But the modulus cannot be reduced freely thus, as a design principle the adhesive modulus must be as low as possible but as high as necessary (Fig. 2).

A second important property of structural adhesives is the tension or lap shear strength. Structural adhesives with strength values of > 35 - 40 MPa have been developed during the recent years.

However, they are limited in elongation at break with typical maximum strain rates of a few percent only. These adhesives can withstand very high residual stresses successfully resulting from operational loads during the car ride or thermal stresses in production.

Fig. 4 - Strength buildup as function of curing temperature for Loctite UK 2015, e-coated steel to e-coated steel with a 0.5 mm bond gap, DIN EN 1465

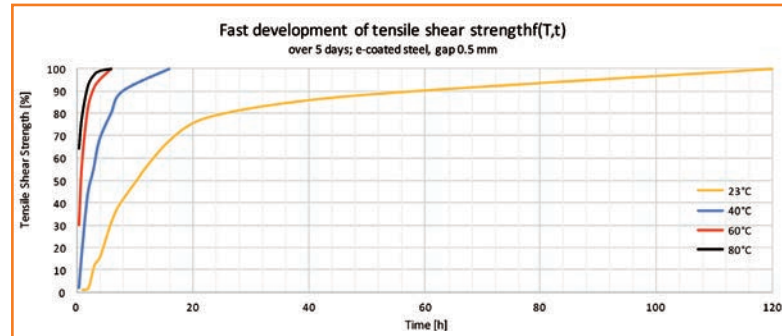


Fig. 4 - Consolidamento della resistenza in funzione della temperatura di reticolazione per Loctite UK 2015, acciaio rivestito con tecnica elettrostatica e spazio vuoto di 0,5 mm, DIN EN 1465



incrementando il modulo elastico e la resistenza alla trazione e allo scorrimento di elementi stratificati per gestire le variazioni della resistenza e resistere alle sollecitazioni locali in assemblaggi di più materiali incollati.

Negli studi di simulazione della linea di incollaggio si evince che nelle usuali linee di incollaggio gli adesivi con modulo elastico variabile da 300 a 500 MPa determinano un incremento pari a circa il 5%

della rigidità dell'assemblaggio. Tuttavia, una riduzione del modulo elastico di un adesivo strutturale da infinito a 500 MPa riduce le sollecitazioni adesive nella linea di incollaggio dal 100% a circa il 60% (a 500 MPa).

Fig. 5 - Fast green strength buildup as function of curing temperature for Loctite UK 2015, e-coated steel to e-coated steel with a 0.5 mm bond gap, DIN EN 1465

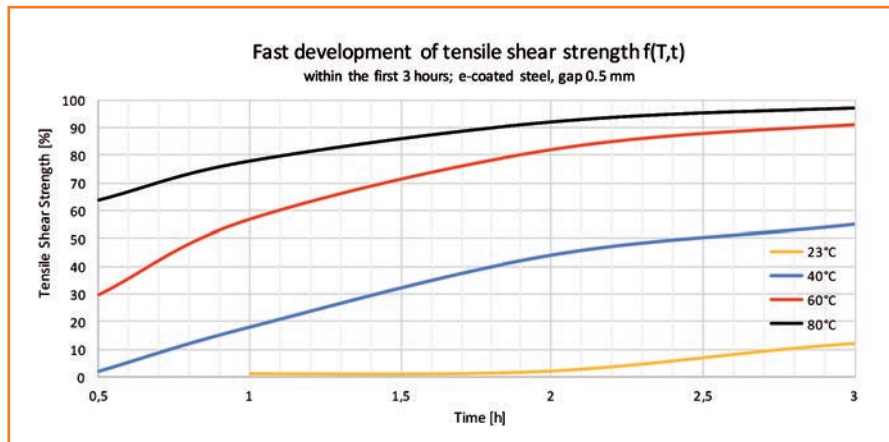


Fig. 5 - Consolidamento della resistenza in funzione della temperatura di reticolazione di Loctite UK 2015, acciaio su acciaio rivestito con tecnica elettrostatica con vuoto di 0,5 mm, DIN EN 1465



When e-coated substrates or plastic components are being adhesively bonded a too high adhesive strength may lead to surface ruptures at the e-coat – metal interface or at the plastics – fiber boundary. In this sense, it is reasonable to ask for adhesives with high enough strength levels (in the range of 10-25 MPa) but very high

flexibilities, i.e. elongations at break of 100+ %.

New class of structural polyurethane toolbox adhesives

Henkel has developed a new class of structural polyurethane adhesives primarily for trim shop applications which have high enough tensile or lap shear strength but at

the same time much higher flexibility. Usually these properties are naturally exclusive.

Due to the high variability in polyurethane chemistry it is possible to develop tailor made network structures which lead to structural two component polyurethane adhesives with high mechanical properties (close to those of 1-component epoxy adhesives) but at the same time very high flexibility and reactivity. Today a new structural polyurethane toolbox of different 2-component polyurethane adhesives exists in this new adhesive class. In a classical strength – elongation / or strain diagram this new toolbox of adhesives is to be found in the top right corner area (see figure 3).

All of them can be easily tailored to individual OEM specific production processes. Now the varying engineering demands for a multitude of different substrate assembly constructions can be met (Tab. 1 and Fig. 4, 5 and 6).

Loctite UK 2015, a 2-component polyurethane adhesive, is one typical example of this new class of structural adhesives.

Loctite UK 2015

This is a first product example of this new class of structural adhesives.



Di conseguenza, l'ottimizzazione del modulo adesivo in base alla rigidità dell'assemblaggio è la migliore tecnica per superare le sollecitazioni termiche causate dal differente CTE dei materiali di assemblaggio. Eppure il modulo non può essere ridotto liberamente, quindi, in base al principio di progettazione, il modulo adesivo deve essere quanto più basso possibile, ma alto tanto quanto è necessario (Fig. 2).

Una seconda importante proprietà degli adesivi strutturali è la resistenza alla trazione o allo scorrimento.

Nel corso di questi ultimi anni sono stati messi a punto adesivi strutturali con valori di resistenza pari a > 35 – 40 MPa. Tuttavia, essi presentano delle limitazioni nel test dell'allungamento a rottura con livelli di deformazione massimi pari ad una minima percentuale.

Questi adesivi possono resistere con successo a sollecitazioni residue molto elevate derivanti da carichi funzionali durante una competizione automobilistica oppure alle sollecitazioni termiche durante il processo produttivo.

Quando i substrati rivestiti per deposizione elettrostatica oppure i componenti plastici vengono incollati, una eccessiva resistenza dell'adesivo potrebbe determinare una rottura superficiale nell'interfaccia metallo rivestimenti oppure nel punto di delimitazione plastica – fibra. In questo caso, è ragionevole richiedere adesivi di elevata resistenza (fra 10-25 MPa), ma anche di alta flessibilità, vale a dire con un allungamento a rottura di 100+ %.

Nuova classe di adesivi poliuretanic strutturali

Henkel ha messo a punto una nuova classe

di adesivi strutturali, principalmente per applicazioni di rifinitura, dotati di resistenza alla trazione e allo scorrimento ma anche di una flessibilità molto più elevata.

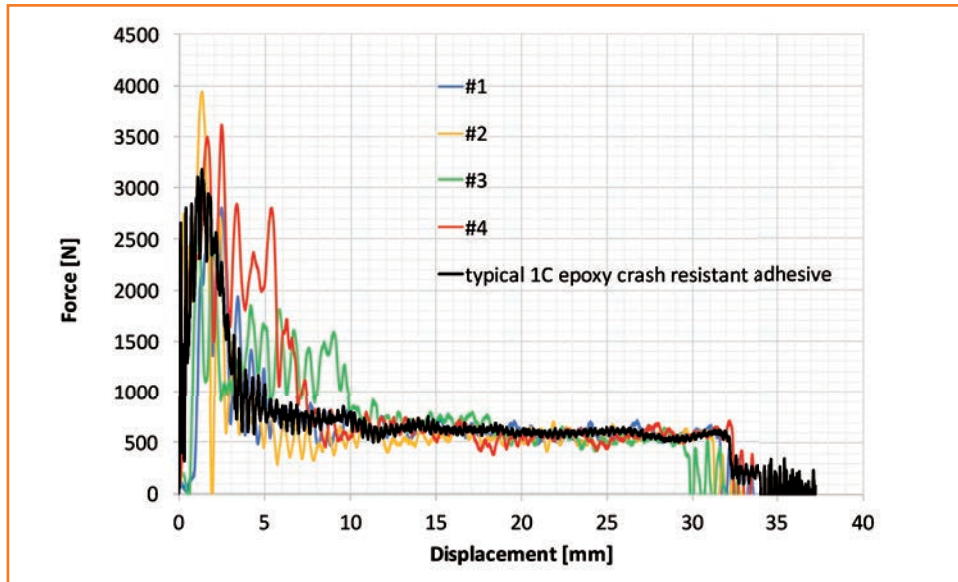
Solitamente queste proprietà sono intrinsecamente esclusive.

Per via dell'elevata variabilità dei processi chimici dei poliuretani, è possibile mettere a punto strutture reticolari specifiche che danno vita ad adesivi poliuretanic strutturali bicomponenti dotati di elevate proprietà meccaniche (simili a quelle degli adesivi epossidici monocomponenti), ma allo stesso tempo, anche di una elevata flessibilità e reattività.

Oggi, in questa nuova classe di adesivi, c'è una nuova serie di adesivi poliuretanic bicomponenti.

In un diagramma tipico delle prove di resistenza-allungamento / o deformazione, questa

Fig. 6 - Impact wedge test of Loctite UK 2015 according ISO 11343 on 0.8 mm thick DC 1405 steel grade with HDG and Silicoater coating



	Grind blasting + Silicoater (SurAsil 200) + Primer SurAchem GE 141 Sabbatura + Silicoater (SurAsil 200) + Primer SurAchem GE 141				Mean	SDev
	#1	#2	#3	#4		
Specimen (0.2 mm gap) Modello (0.2 mm gap)	#1	#2	#3	#4		
Average Cleavage Force (25% - 90%) [N] Forza media di sfaldamento (25% - 90%) [N]	585,6	697,3	547,3	604,3	608,6	63,7
Dynamic Resistance to Cleavage (25% - 90%) [N/m] Resistenza dinamica allo sfaldamento (25% - 90%) [N/m]	29,3	34,9	27,4	30,2	30,4	3,2
Energy (25% - 90%) [J] Energia (25% - 90%) [J]	12,3	13,8	11,2	12,4	12,4	1,0
Total Energy [J] Energia totale [J]	30,0	25,1	22,4	22,7	25,0	3,5

Fig. 6 - Test dell'impatto a cuneo di Loctite UK 2015, in base ad ISO 11343 su acciaio DC 1405 con spessore di 0,8 mm e rivestimento HDG e Silicoater



nuova serie di adesivi si colloca nell'area dell'angolo in alto a destra (Fig. 3). Tutti questi possono essere facilmente personalizzati in base a processi produttivi specifici OEM. Ormai è possibile soddisfare i più svariati requisiti tecnici di una moltitudine di costruzioni con assemblaggio di substrati (Tab. 1 e Fig. 4, 5 e 6).

Loctite UK 2015, adesivo poliuretano bicomponente è un esempio tipico di questa nuova classe di adesivi strutturali.

Loctite UK 2015

Questo è il primo esempio prodotto di questa nuova classe di adesivi strutturali. Una struttura reticolare polimerica unica



A unique polymer network structure in addition to a special toughened elastifier finally leads to the new combination of a high tensile strength of > 18 MPa, an elongation at break of 90-110 % and an elastic modulus of > 300 MPa. It can be either cured at 23°C or at elevated temperatures. The time and temperature dependent buildup of the tensile shear strength is shown in Fig. 4 and 5. Especially between room temperature and 40°C there is a steep increase in reactivity and strength increase. Green strength is achieved at 23°C after 2.5h, at 40°C after 0.7 h and with temperatures > 50°C far below 30 minutes (Fig. 5). With respect to the dynamic material properties which are related to the crash resistance of structures bonded with Loctite UK 2015 a DIN EN ISO 11343 impact wedge test with a 0.2 mm adhesive gap has been made. Curing: 5 days at room temperature.

The total dynamic energy uptake (at 2 m/s impact) amounts to 25 J +- 3,5 J (Fig. 6).

The tests prove that the dynamic energy absorption of Loctite UK 2015 in crash relevant bonded structures lies in the range typical for crash resistant 1-component epoxy adhesives

aggiunta a uno speciale elasticizzante rinforzato determina infine una nuova combinazione di elevata resistenza alla trazione >18 MPa, allungamento a rottura di 90-110% e modulo elastico di >300 MPa.

Inoltre, può essere reticolato sia a 23°C sia ad alte temperature. Le variabili di tempo e temperatura nella definizione della resistenza alla trazione e alle forze di taglio sono indicate nelle Figure 4 e 5.

In particolare fra la temperatura ambiente e i 40°C vi è un incremento repentino della reattività e della resistenza. La resistenza alla trazione è raggiunta a 23°C dopo 2,5 ore, a 40° dopo 0.7 ore e con temperature superiori a 50°C, ben al di sotto dei 30 minuti (Fig. 5).

Per quanto riguarda le proprietà dinamiche del materiale, correlate alla resistenza all'urto delle strutture incollate con Loctite UK 2015 è

Fig. 7 - Example of the cohesive failure mode after impact wedge test

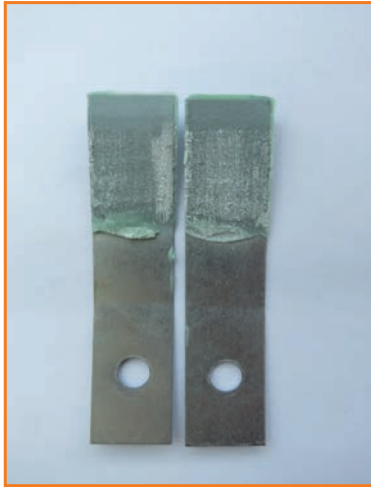


Fig. 7 - Esempio di modalità di rottura coesiva dopo prova da urto con cuneo

Fig. 8 - Automated robot application with the use of a static mixer machine system from SCA Schucker, 2C metering system, 160 ccm (80/80), 2x80cm³, 50 mm shot, compression 78:1, mixing ratio 2.5:1 (v/v), Sulzer Quadromixer 7,5-24, robot speed 200 mm/s

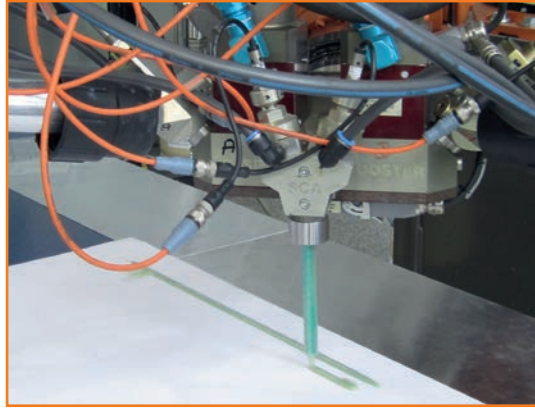


Fig. 8 - Applicazione su robot automatizzato con l'uso di un mixer statico di SCA Schucker, sistema di distribuzione 2C, 160 ccm (80/80), 2 x 80 cm³, fase 50 mm, compressione 78:1, rapporto miscela 2,5:1 (v/v), Sulzer Quadromixer 7,5-24, velocità del robot 200 mm/s

Adhesive engineering

The mechanical performance of adhesively bonded car body structures can be studied and optimized by using engineering simulation capabilities to determine the influence of the adhesive properties e.g. for a specific case We have taken the Yaris Sedan FE model available in NCAC and modified it to include a bonded composite roof. In the simulation study for the normalized car body stiffness the Young's modulus of the adhesive was varied to see its effect on the overall torsional stiffness of the body-in-white. This way we could identify a range of adhesive Young's moduli (see the green area in Fig. 10) which would only lead to a small loss in torsional stiffness. But at the same time the negative effects of the CTE (coefficient of thermal elongation) mismatch of the different substrates can be mitigated by using the new 2-component polyurethane adhesive with Young's moduli lying in the green area of Fig. 10.

Outlook for body shop application

So far the new class of 2-component polyurethane structural adhesives has been



(impact energy = 30,8 N/mm, see figure 6). In this regard the adhesive

is qualified to be considered for crash resistant structural joints. The highly reliable processing of the adhesive using standard robot metering equipment has been tested and verified with continuous long term tests over 8

h with very positive results (Fig. 8). The wide and robust process window for fully automated robotic application allows to use Loctite UK 2015 in serial production with cycle times of less than 9 minutes.

Fig. 9 - Example of a CFRP body structure bonded with Loctite UK 2015 (Adhesive bead in green color)

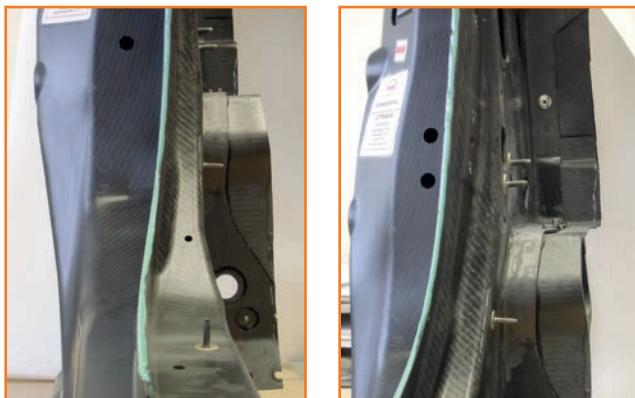


Fig. 9 - Esempio di una scocca CFRP incollata con Loctite UK 2015 (goccia di adesivo verde)



stata compiuta una prova d'urto con cuneo DIN EN ISO 11343 su una parte priva di adesivo di 0,2 mm.

l'adesivo è idoneo ad essere utilizzato per giunti strutturali resistenti all'urto. Il trattamento molto sicuro dell'adesivo

Reticolazione: 5 giorni a temperatura ambiente.

L'acquisizione di energia dinamica totale (urto di 2 m/s) risulta uguale a 25 J +/- 3,5 J (Fig. 6).

I test dimostrano che l'assorbimento di energia dinamica di Loctite UK 2015 nelle strutture incollate in caso di urto si colloca nel range tipico degli adesivi epossidici monocomponenti resistenti all'urto (energia d'impatto = 30,8 N/mm, Fig. 6). Per questo,

utilizzando attrezzature standard di distribuzione robotizzate è stato analizzato e collaudato mediante test continui a lungo termine per 8 ore, ottenendo risultati molto positivi (Fig. 8).

L'ampia e resistente finestra di processo per applicazioni totalmente robotizzate, consente l'utilizzo di questo adesivo nella produzione di serie con cicli inferiori ai 9 minuti.

Ingegnerizzazione del processo adesivo

La prestazione meccanica delle carrozzerie di automobili incollate con l'adesivo, può essere studiata e ottimizzata con le funzionalità della simulazione di processo così da determinare l'influsso esercitato dalle proprietà adesive.

A esempio il seguente caso specifico: il modello Yaris Sedan FE, disponibile in NCAC



mainly tailored for assembly or trim shop applications.

However, first results prove that the temperature resistance of e.g. this resin is high enough to pass e-coat cure conditions without degradation in material properties.

Fig. 10 - Influence of adhesive Young's modulus on normalized car body stiffness

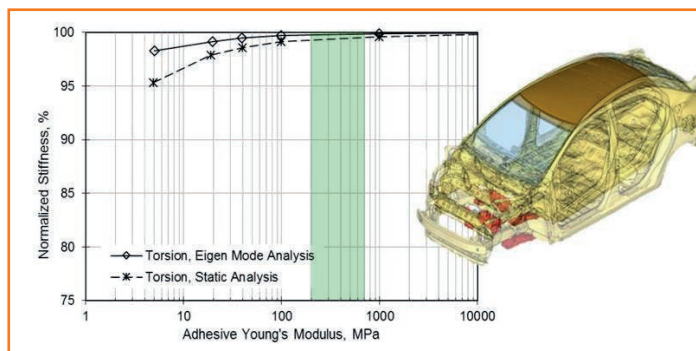


Fig. 10 - Influsso esercitato dal modulo di Young dell'adesivo sulla resistenza normalizzata della carrozzeria



è stato modificato per includere un tettuccio in composito incollato.

Nella simulazione finalizzata alla normalizzazione della rigidità della carrozzeria il modulo di Young dell'adesivo è stato modificato per verificare gli effetti sulla rigidità torsionale generale della scocca. In questo modo è stato possibile individuare una serie di moduli di Young dell'adesivo (vedi l'area verde di Fig. 10) che determinerebbe una perdita minima della rigidità torsionale. Ma nello stesso tempo, gli effetti negativi del disallineamento di CTE (coefficiente di allungamento termico) dei vari substrati possono essere ridotti grazie all'utilizzo del nuovo adesivo poliuretano bicomponente con moduli di Young compresi nell'area verde di Fig. 10.

Considerazioni per l'utilizzo in carrozzeria

Finora la nuova classe di adesivi strutturali poliuretano bicomponenti è stata personalizzata principalmente per montaggio o finitura. Tuttavia, i primi risultati dimostrano che la resistenza termica di questa resina, è sufficientemente alta da resistere alle condizioni di reticolazione della verniciatura elettrostatica senza deteriorare le proprietà del materiale.