

Heading to the sun with plasma

Atmospheric pressure plasma makes CFRP solar car lighter

Inès A. Melamies, Facts4You

To speed up the bonding process, optimize adhesion and save several kilos in weight, a team of students from KU Leuven University in Belgium pretreated the CFRP components of their solar racing car with atmospheric pressure plasma prior to bonding.

Production manager Dokus Soetemans and his fifteen Belgian colleagues who make up the 'Punch Powertrain Solar Team' are budding electronic and mechatronic engineers with an average age of 21 years. For over ten years Leuven University has worked closely with industry partners to offer its masters students a special postgraduate course: Those taking part in the biennial Solar Car Project have to build a single-seater racing car powered entirely by the sun and enter it in contests for the world's most efficient electric cars. The first aim is to compete successfully in the longest and toughest solar car rally in the world: The World Solar Challenge in Australia (Fig 1).

The young team – who were entirely responsible for every detail of this one and a half million euro project – had just 15 months to make it a reality. In June 2015 the car was unveiled to the public for the first time, by the end of August all home road tests had been completed and in September the team and its aerodynamic masterpiece Punch One headed off down under. However, before all this could take place, the solar car had to be designed and built from scratch.

EVERY GRAM COUNTS

Less mass means less energy consumption and with a maximum overall weight of 165 kg, Punch One should be 10 kg lighter than its predecessor and a good 25 kg lighter than most of its rivals. Six square meters of the vehicle's surface are covered with 391 ultra-thin silicon solar cells. Yet despite their light weight, they still amount to a total weight of 8 kg. The heaviest part of the car is the solar battery with a specified maximum



Photo: Punch Powertrain Solar Team

Andare verso il sole con il plasma

Il plasma a pressione atmosferica alleggerisce l'automobile in CFRP con propulsione a energia solare

Inès A. Melamies, Facts4You

Per velocizzare il processo di incollaggio, ottimizzare l'adesione e risparmiare diversi chili di peso, un team di studenti provenienti dall'Università Lovanio KU in Belgio ha pretrattato i componenti CFRP della loro automobile racing ad energia solare con il plasma a pressione atmosferica prima di eseguire le operazioni di incollaggio.

Il responsabile del reparto produzione Dokus Soetemans, insieme ai quindici colleghi che in Belgio hanno creato il "Punch Powertrain Solar

Team" ha riunito ingegneri esperti di elettronica e di mecatronica con un'età che si aggira sui 21 anni. Da più di dieci anni l'Università di Lovanio lavora a stretto contatto con partner industriali per offrire ai propri studenti un corso speciale post-laurea. Gli studenti che prendono parte al progetto biennale Solar Car hanno il compito di realizzare una auto da competizione monoposto interamente a energia solare e di partecipare a gare in cui sono protagoniste le automobili elettriche più efficienti del mondo.

Il primo obiettivo consiste nel competere con successo al rally delle auto ad energia solare più lungo e faticoso del mondo: il World Solar Challenge in Australia (fig. 1)

Il team costituito da giovani ingegneri, responsabili di tutti i dettagli di questo progetto, dal costo di un milione e mezzo di euro, aveva tempo soltanto 15 mesi per realizzarlo, e nel mese di giugno 2015 l'automobile è stata presentata per la prima volta al pubblico, entro la fine di agosto erano stati eseguiti tutti i test di collaudo su strada e in settembre sono

Fig 1 - Powered only by the sun: the energy-efficient Punch One solar car at the World Solar Challenge rally in Australia. The plasma bonding process reduced the weight of the CFRP body by several kilos
Solo con l'energia solare: la Punch One, ad efficienza energetica, al World Solar Challenge rally in Australia. Il processo di incollaggio al plasma ha ridotto il peso della carrozzeria in CFRP di alcuni chili

weight of 21 kg. Here, nothing could be shaved off. So to achieve the desired weight reduction the first job was to replace the two previous motors with a single 5 kW electric motor. The suspension and steering system were also replaced; they are now made mainly from carbon. But the car was still too heavy and the only area left to save weight was the vehicle body itself.

THE BODY

The self-supporting body made by the students is a 1.72 meter wide and 4.50 meter long monocoque construction comprising a top and a bottom shell made from CFRP (carbon-fiber-reinforced plastic). Using a vacuum infusion process, the students manufactured the shells from different prepregs; a 0.08mm Textreme, a UD fabric and a 0.23mm twill. The core material is Rohacell. Once cured and demolded, plastic shells of this size are strong as far as the material is concerned, but still very unstable due to their light weight, curved shape and large surface area. Therefore the top and the bottom shell needed a framework of stiffening ribs with an extra stiffening construction, the torsion box, for the bottom shell (Fig. 2 and 3), to prevent bending and twisting of the substructure. After assembly the two shells will give the solar car its final aerodynamic shape (Fig. 4 and 5).

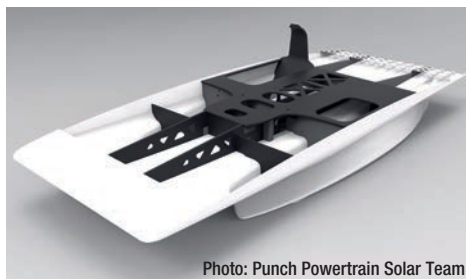


Photo: Punch Powertrain Solar Team

Fig 2 - Plasma-treated monocoque bottom shell showing ribs and torsion box
Guscio inferiore scocca trattato al plasma con inserti di rinforzo e box di torsione

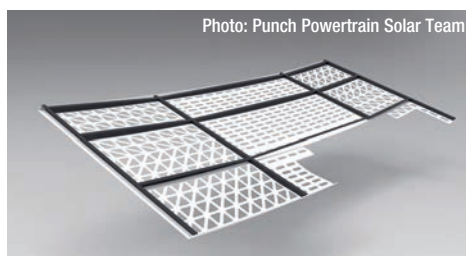


Photo: Punch Powertrain Solar Team

Fig 3 - Plasma-treated structure of the stiffening ribs in the top shell
Struttura degli inserti di rinforzo sul guscio superiore trattata al plasma



Photo: Punch Powertrain Solar Team

Fig 4 - Assembly of the different car body layers
Assemblaggio dei vari strati della carrozzeria



Photo: Rob Stevens, KU Leuven

Fig 5 - The finished solar car Punch One
Punch One finita, l'auto a energia solare

partiti per l'Australia con il loro capolavoro Punch One. Tuttavia, prima che tutto questo potesse avverarsi, l'automobile ad energia solare doveva essere progettata e costruita dal nulla.

OGNI GRAMMO CONTA

Meno massa sta per minor consumo di energia, con un peso massimo totale di 165 kg. Punch One doveva essere infine più leggera di 10 kg rispetto al modello precedente e ben 25 kg più leggera della maggior parte dei modelli concorrenti. Sei metri quadrati della superficie del veicolo sono rivestiti da celle solari al silicio ultrasottili. Eppure, nonostante il loro scarso peso, esse hanno ancora un peso totale di 8 kg. Il componente più pesante dell'automobile è la batteria solare, con un peso massimo specificato di 21 kg. In questo caso non ci sono eccedenze da eliminare. Quindi, per ottenere la riduzione di peso desiderata, il primo obiettivo è stato sostituire i due motori precedenti con un motore elettrico di 5 kW. Anche sospensioni e ingranaggi sono

stati sostituiti e attualmente sono realizzati principalmente in carbonio. Ma l'automobile si presentava ancora troppo pesante e l'unica area in cui risparmiare peso era la carrozzeria stessa.

LA CARROZZERIA

La carrozzeria autoportante realizzata dagli studenti è una struttura monoscocca larga 1,72 metri e lunga 4,50 metri, comprendente un guscio superiore e uno inferiore costruiti con CFRP (composito rinforzato al carbonio). Utilizzando il processo di infusione sottovuoto, gli studenti hanno prodotto i gusci con vari tipi di prepregs; 0,08 mm Textreme, tessuto UD e twill da 0,23 mm.

BONDING INSTEAD OF LAMINATION

The joining force between the rigid foam ribs encased in Textreme and the bodywork must be strong enough to produce a back pull and counteract any tensile or compressive stresses in the shells in any direction. In view of the challenges the car body has to face during races, previous student teams had always chosen to laminate these static elements. Multiple layers and lengths of prepreg strips were applied at each attachment point of the ribs. But this joining method was not only extremely labor-intensive and time-consuming; all the extra prepreg strips also increased the weight. So the question was whether it would be possible after all to achieve a high-strength bond using adhesives instead of a lamination process. Various adhesives manufactured by Henkel were tested to find an alternative. Due to the car's strong vibrations, an adhesive was required which had both high elasticity and a short open time for fast bonding operations. Loctite EA 466 was ultimately chosen, a fast curing, 2-component epoxy resin adhesive. However, in the first tensile-shear-force tests failure occurred as a result of an adhesive fracture (Fig.6) instead of the expected cohesive fracture. At the fracture point there was no adhesive on the CFRP surface that was to be bonded, despite the fact that this had been pretreated with a special cleaner. "We

Il materiale d'anima è Rohacell. Una volta reticolati e distaccati dallo stampo, i gusci di questa dimensione sono robusti grazie al materiale, ma ancora instabili a causa del loro scarso peso, della forma curva e dell'area superficiale ampia. Di conseguenza, i due gusci richiedevano un reticolo di costole di rinforzo e una costruzione di irrigidimento, il box di torsione per il guscio inferiore (fig. 2 e 3), per prevenire flessioni e torsioni della sottostruttura. Dopo l'assemblaggio, i due gusci danno all'auto ad energia solare la sua linea aerodinamica finale. (fig. 4 e 5).

INCOLLAGGIO ANZICHÉ LAMINAZIONE

La forza di adesione fra le costole di schiuma rigida incorporate nel Textreme e la scocca deve essere sufficientemente intensa da produrre una spinta di ritorno e contrastare qualsiasi sollecitazione compressiva o di trazione nei gusci in qualsiasi direzione. In vista delle difficoltà che la scocca dell'automobile avrebbe dovuto affrontare durante la corsa, i team precedenti avevano scelto di laminare questi

Fig 6
Adhesive failure
before plasma
treatment
*Deterioramento
dell'adesivo prima
del trattamento
al plasma*

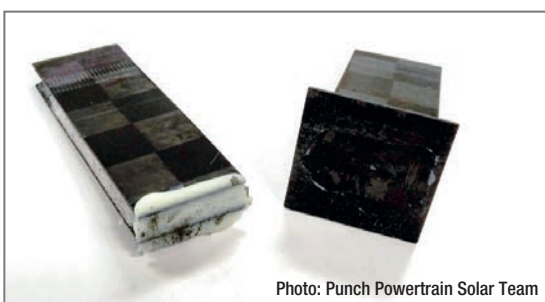


Photo: Punch Powertrain Solar Team

were told”, says Soetemans, “that the problem lay not with the adhesive, but with the material. It was thought that the poor adhesion was due to the surface energy, which was apparently too low. Henkel advised us to treat the plastic surfaces of the ribs with atmospheric pressure plasma (AP plasma).” The team took this advice and immediately got in touch with the Belgian representative of the German plasma company Plasmamatreat.

CLEANING AND ACTIVATION WITH AP PLASMA

Openair-Plasma jet technology developed by Plasmamatreat twenty years ago is employed today in almost all fields of industrial production. The process uses potential-free plasma for surface treatment. Produced inside plasma nozzles by an intensive, pulsed arc discharge, the plasma is conditioned at the nozzle outlet. A targeted flow of air along the discharge path separates parts of the plasma and transports them via the nozzle head to the surface of the material being treated, whilst retaining the voltage-carrying parts of the plasma flow inside the nozzle head. The nozzle head also determines the geometry of the plasma beam being emitted. The process performs three operations in a single step lasting only a matter

elementi statici. Quindi sui punti di attacco delle costole di rinforzo venivano posti strati multipli di strisce di prepreg. Ma questa tecnica non solo richiedeva molto lavoro e molto tempo, ma le strisce aggiuntive di prepreg aumentavano il peso. Di conseguenza, il punto da affrontare era la possibilità di realizzare un legame di elevata robustezza utilizzando gli adesivi anziché il processo di laminazione. Per trovare una soluzione alternativa, sono stati dunque provati diversi adesivi prodotti da Henkel. Per via delle forti vibrazioni dell'automobile, era indispensabile utilizzare un adesivo che presentasse sia una elevata elasticità che brevi tempi di lavorazione per poter eseguire velocemente le operazioni di incollaggio. Infine è stato scelto Loctite EA 466, un adesivo bicomponente a base di resine epossidiche a reticolazione veloce. Tuttavia, nei primi test della resistenza a trazione e taglio si è osservato un deterioramento causato dalla frattura adesiva (fig. 6) e non da quella coesiva come ci si sarebbe aspettato. Nel punto della frattura non c'era adesivo visibile sulla superficie CFRP da incollare, nonostante il fatto che essa fosse stata pretrattata con un detergente specifico. “Ci avevano detto”, ha commentato Soetemans, “che il problema non riguardava l'adesivo, ma il materiale. Si era pensato che lo scarso risultato ottenuto nel processo adesivo fosse dovuto alla tensione superficiale, apparentemente troppo ridotta. Henkel ci consigliò quindi di trattare le superfici plastiche degli inserti di rinforzo con il plasma a pressione atmosferica (plasma AP)”. Il team accolse il suggerimento e immediatamente si mise in contatto con il rappresentante della società tedesca Plasmamatreat.

PULITURA E ATTIVAZIONE CON IL PLASMA AP

La tecnologia Openair-Plasma jet, sviluppata da Plasmamatreat vent'anni fa è utilizzata attualmente in quasi tutti i campi della produzione industriale. Il processo usa il plasma a potenziale zero per il trattamento superficiale. Prodotto all'interno di ugelli dedicati da una scarica ad arco pulsato, il plasma viene condizionato all'uscita dell'ugello. Un flusso di aria orientato lungo la traiettoria della scarica

of seconds: It simultaneously brings about the microfine cleaning, electrostatic discharging and activation of the plastic surface. This triple action far outweighs the effectiveness of conventional pretreatment systems. The result is homogeneous wettability of the material surface and long-time stable adhesion of the adhesive bond or coating even under challenging load conditions. The surface is activated through the chemical and physical interaction of the plasma with the substrate. When the AP plasma hits a plastic surface, groups containing oxygen and nitrogen are incorporated into the mainly non-polar polymer matrix. Plasma activation brings about an increase in surface energy, rendering the substrate polar.

CONVINCING TEST RESULTS

Never before had the students experienced a material pretreatment with plasma and they were keen to see the process. Two different tests had to be performed to verify the effect, one before and one after the bonding process. The aim of the first test was to determine the surface energy of the CFRP before and after plasma treatment. Plasmamatreat measured the contact angles using a Mobile Surface Analyzer (MSA) from Krüss. The portable instrument automatically applies two parallel drops, then measures the contact angle and calculates the free surface energy in a process which lasts no more than a second. The results provide valuable information about the

separa le parti del plasma trasportandole mediante la testina dell'ugello sulla superficie del materiale da trattare, mantenendo nello stesso tempo le parti interessate dal voltaggio del flusso al plasma all'interno della testina dell'ugello. Questa determina inoltre la geometria del raggio al plasma emesso. Il processo esegue tre operazioni in un'unica fase con una durata di pochi secondi: esso determina simultaneamente la pulitura microfine, la scarica elettrostatica e l'attivazione della superficie plastica. Questa tripla azione supera alla grande l'efficacia dei sistemi di pretrattamento convenzionali. Il risultato è la bagnabilità della superficie del materiale e l'adesione stabile per lungo tempo del legame adesivo o rivestimento anche in condizioni di carico critiche. La superficie viene attivata grazie all'interazione chimico-fisica del plasma con il substrato. Quando il plasma AP colpisce la superficie plastica, i gruppi contenenti ossigeno e azoto vengono incorporati nella matrice polimerica prevalentemente non polare. L'attivazione al plasma determina un aumento dell'energia superficiale rendendo polare il substrato.

CONVINCENTI RISULTATI DEL TEST

Mai prima, gli studenti avevano fatto esperienza con il pretrattamento del materiale con l'ausilio della tecnica al plasma e hanno apprezzato molto la dimostrazione di questo processo. Dovevano essere eseguiti due test differenti al fine di verificarne l'effetto, uno prima e uno dopo il processo di incollaggio. La finalità del primo test era definire l'energia superficiale del CFRP prima e dopo il trattamento al plasma. Plasmamatreat ha misurato gli angoli di contatto utilizzando un Mobile Surface Analyzer (MSA) prodotto da Krüss. Lo strumento portatile applica automaticamente due gocce parallele per poi misurare l'angolo di contatto e calcolare l'energia

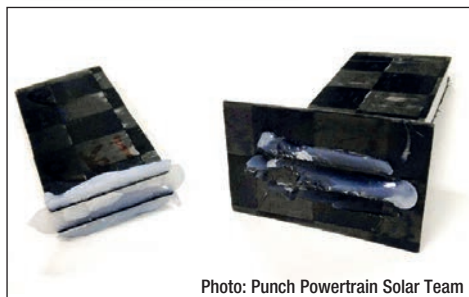


Photo: Punch Powertrain Solar Team

Fig 7 - Cohesive fracture in the adhesive after plasma treatment

Rottura coesiva dell'adesivo dopo il trattamento al plasma

wettability of the surface by aqueous or organic liquids. The findings: The smooth side of the CFRP sample which was to be bonded had a surface energy of only 24mJ/m^2 (24 dyne) before treatment, but after plasma treatment this figure rose to 74mJ/m^2 (74 dyne) – ideal conditions for the subsequent adhesive process. The second test, a repeat of the tensile-shear-strength test provided the proof: The fracture behavior had changed. Instead of the earlier adhesive fracture, this time the desired cohesive fracture was obtained (Fig.7).

LIGHTER AND FASTER

Under the direction and supervision of Dokus Soetemans, three of his fellow students then carried out the plasma treatment and bonded all the stiffening ribs to the two body shells. To make the job easier, Plasmatrete provided a

hand-held rotary nozzle jet (Fig.8) normally used for laboratory work or small-scale applications which weighed only 2.5 kilograms. The process proved to be very straightforward: Whilst one person guided the plasma nozzle across the surfaces to be treated, the next person followed on behind applying the adhesive. Some pressure was applied to the bonded ribs and off the shell went into the oven for one hour at 90°C to cure the adhesive.

While previously it had taken far longer than a week to laminate the stiffening ribs, now with the aid of plasma the job was completed in three days. But even more importantly: The new plasma bonding process had reduced the weight of the solar car body by almost three kilograms and the targeted 165 kilogram overall weight had now been achieved. After 3000 kilometers through the Australian outback at temperatures of well over 40°C a proud and happy

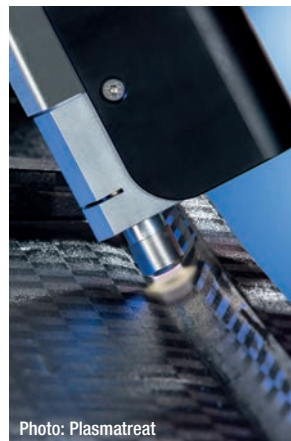


Photo: Plasmatrete

Fig 8 - Pretreating the CFRP surface with Openair plasma rotary nozzle brings about simultaneous microfine cleaning, electrostatic discharge and simultaneous strong activation of the plastic surface, significantly enhancing its wettability and adhesive properties

Il pretrattamento della superficie CFRP con l'ugello rotante al plasma Openair rende possibili la pulitura microfine simultanea, la scarica elettrostatica e la forte attivazione della superficie plastica, a grande vantaggio delle proprietà di bagnabilità e adesive

solar team finished fifth out of thirty in Adelaide on October 25, 2015. The flat tire and a one hour penalty right at the start of the race, which unfortunately allowed a number of competitors to pass them, were soon forgotten. Now this year's Sasol Solar Challenge in South Africa is waiting. Punch One might be heading to the sun again.

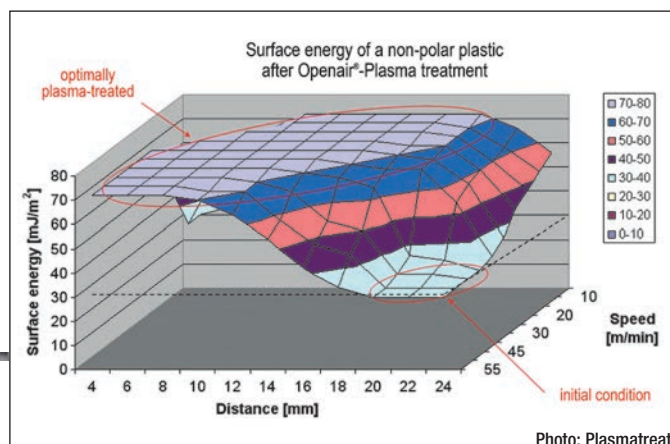


Fig.9. The diagram shows a non-polar plastic surface which was pretreated with atmospheric pressure plasma as a function of distance and speed. Rendered polar by the treatment, the surface energy rises to $>72\text{mJ/m}^2$ (>72 dyne)

Il diagramma mostra una superficie plastica apolare che è stata pretrattata con plasma a pressione atmosferica in funzione della distanza e della velocità. Resa polare dal trattamento, l'energia superficiale aumenta fino a più di 72mJ/m^2 (>72 dyne)

libera superficiale in un processo che dura non più di un secondo. I risultati forniscono informazioni valide sulla bagnabilità della superficie con liquidi acquosi o organici. I dati emersi sono i seguenti: la parte levigata del campione CFRP che doveva essere incollata presentava prima del trattamento un'energia superficiale pari a soltanto 24mJ/m^2 (24 dyne), ma dopo il trattamento al plasma questo valore è aumentato per arrivare a 74mJ/m^2 (74 dyne), condizioni ideali per il processo adesivo successivo. Il secondo test, una ripetizione del test di resistenza alla trazione e taglio ha dato infine la conferma: la risposta alla rottura era cambiata. Anziché la rottura adesiva precedente, questa volta si era ottenuta la rottura coesiva desiderata (fig. 7).

PIÙ LEGGERA E VELOCE

Con la guida e la supervisione dei lavori da parte di Dokus Soetemans, tre dei suoi studenti hanno in seguito realizzato il trattamento al plasma e incollato tutti gli inserti di rinforzo ai due gusci

della scocca. Per semplificare il lavoro, Plasmatrete ha fornito un ugello rotante a getto utilizzato manualmente (fig. 8), normalmente impiegato in laboratorio o per applicazioni su scala ridotta dal peso di solo 2,5 kg. Il processo si è rivelato molto semplice: mentre una persona guida l'ugello al plasma lungo le superfici da trattare, l'altro operatore lo segue applicando l'adesivo. Alle costole di rinforzo è stata applicata una certa pressione, poi, estratte dalla scocca sono state messe in forno per un'ora a 90°C per reticolare l'adesivo. Se prima d'ora era richiesta più di una settimana per laminare i rinforzi, in questo caso, con l'ausilio del plasma, il lavoro è stato completato in tre giorni. Ancora più importante è il dato che il nuovo processo di incollaggio al plasma ha ridotto il peso della scocca dell'auto ad energia solare di

almeno tre chilogrammi raggiungendo l'obiettivo prefissato di un peso totale pari a 165 kg. Dopo 3000 chilometri percorsi nell'entroterra Australiano, a temperature ben superiori ai 40°C , un team orgoglioso e felice si è classificato in quinta posizione su 30 partecipanti ad Adelaide, il 25 ottobre 2015. Lo scoppio di un pneumatico e un'ora di penalità proprio all'inizio della gara, che sfortunatamente hanno dato vantaggio a vari concorrenti, sono passati poi in secondo piano. La prossima gara sarà Sasol Solar Challenge del Sud Africa. Punch One potrebbe ancora una volta "seguire la via del sole".