

Impakt-Beschichtung für hochbelastete Faserverbund-Strukturen in Luftfahrtanwendungen

Martin Welsch & Ralph Funck
CirComp GmbH
Marie-Curie-Str.11
67661 Kaiserslautern, Germany
www.circomp.de

Kurzfassung— Die vorliegende Veröffentlichung befasst sich mit **Impakt-Beschichtungen für Luftfahrtanwendungen**. Dabei werden **impaktabsorbierende und impaktindizierende Beschichtungen für den Anwendungsfall von Zug-/ Druckstangen in der Luftfahrtindustrie untersucht**. **Impaktabsorbierende Beschichtungen erweisen sich als nicht zielführend, wohingegen die impaktindizierende Beschichtung DW330 sehr gute Visualisierung von Schlagschäden bei geringen Energien zeigt.**

Schlagworte— *Impakt, BVID, AirStrut[®], Tie rod, Zug-/ Druckstäbe, Beschichtung, Faserverbund, DW330*

I. EINLEITUNG

Eine Schlagbeanspruchung auf Faserverbundkunststoff-Laminat (FVK) führt häufig zu starken Schädigungen innerhalb des Laminates. Sie sind auf der Laminatoberfläche kaum erkennbar. In der Luftfahrtindustrie werden solche Impaktsschäden als „Barely Visible Impact Damage“ (BVID) bezeichnet. Sichtbar wird der Schaden bei entsprechender Impaktenergie meist auf der gegenüberliegenden Laminatoberfläche. Sofern durch Schlagbeanspruchungen Faser-, Zwischenfaserbrüche und Delaminationen entstehen, wird die Steifigkeit und Festigkeit des Verbundes reduziert. Die Restdruckfestigkeit wird beispielsweise durch CAI-Prüfungen (Compression-After-Impact-Tests) bestimmt [1].

Insbesondere für FVK Zug-/ Druckstäbe (strut, tie rod, AirStrut[®]) führen Impaktsschäden zur Reduzierung der Knicksteifigkeit. Die tie-rods werden mit ausreichender Sicherheit dimensioniert, damit sie die Grenzlast mit vorhandener Vorschädigung des Laminates ertragen. Bedingt durch diese Anforderung sind die Laminat entsprechend dickwandig und erhöhen das Bauteilgewicht.

Um die Leichtbaugüte der AirStruts[®] zu steigern, werden neuartige Beschichtungen untersucht. Grundsätzlich kommen impaktabsorbierende oder impaktindizierende Beschichtungen für den Anwendungsfall in Frage.

II. STAND DER TECHNIK

Nach dem aktuellen Stand der Technik werden FVK - Streben mit einem hellen Strukturack beschichtet. Neben zusätzlichen FST (Fire Smoke Toxicity) Eigenschaften dient dieser Lack zur besseren Visualisierung von Schlagschäden,

auch Impakt-Schäden genannt. Durch die helle Farbe bildet sich im Bereich des Impakts ein Kontrast aus. Dennoch sind die Schäden schwer detektierbar und erfordern geschultes Personal. Abbildung 1 zeigt exemplarisch eine hell lackierte CFK Oberfläche, die mit 8,5J vorgeschädigt wurde.



Abbildung 1: FVK mit lackierter Oberfläche und Impaktsschaden (8,5J)

Zu der Thematik Impaktsschäden auf FVK Strukturen liegen eine Vielzahl von Arbeiten vor, z.B. [2], [3] und [4]. So sind u.a. Beschichtungen bekannt, die durch die Schlagbeanspruchung ihre Farbe ändern.

III. BESCHICHTUNGSARTEN

Im Rahmen der Entwicklung wurden impaktabsorbierende und impaktindizierende Beschichtungsarten untersucht. Als Referenz werden lackierte „state-of-the-art“ tie rods verwendet (siehe Abbildung 2).



Abbildung 2: State-of-the-art AirStruts[®] lackiert und unlackiert

1. Impaktabsorbierende Beschichtungsarten:

- Aramid Umwicklung mit Decklack
- Elastomer Beschichtung mit Decklack
- Polyester Umwicklung mit Decklack

Durch eine absorbierende Beschichtung soll der Aufprall gedämpft werden, wobei möglichst viel Energie von der Beschichtung umgewandelt werden soll (Querschnitt siehe Abbildung 3). Dadurch kann eine höhere Restdruckfestigkeit erzielt werden.

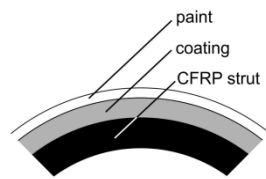


Abbildung 3: Schematische Darstellung eines CFK-Rohrkörper Teilquerschnittes mit Beschichtung und Decklack

2. *Impaktindizierende Beschichtungsarten* :
 - a. Zweikomponenten Hartschaum
 - b. DW330

Eine indizierende Beschichtung soll einen Aufprall möglichst früh und eindeutig visualisieren. Beispielsweise lässt sich dies durch eine plastische Verformung der Beschichtung bewerkstelligen. Dabei wird ähnlich wie bei der absorbierenden Beschichtung ein kleiner Teil der Energie absorbiert. Somit ist es möglich bereits bei niederenergetischen Impakts eine BVID hervorzurufen, ohne dabei das Laminat signifikant zu beschädigen. Demzufolge besitzen Struts mit einer solchen Beschichtung die gleiche Restdruckfestigkeit wie ein state-of-the-art AirStrut®, bei geringerer Bauteilmasse.

IV. VERSUCHSKÖRPER

Zum Zuge der Versuche werden state-of-the-art tie – rods für diverse Beschichtungsversuche, Impaktversuche und Zug-/ Druckversuche verwendet. Des Weiteren werden Rohrprobekörper (d_i 27,5mm; d_a 36mm; L 300mm) für die Impaktversuche, Ultraschallprüfungen und mikroskopische Untersuchungen herangezogen.

V. VERSUCHE

1. *Impaktversuche*

Die Impaktversuche werden mittels eines Fallturmes durchgeführt. Es wird ein kugelförmiger Impaktor mit einem Durchmesser von 16mm verwendet (siehe Abbildung 4).

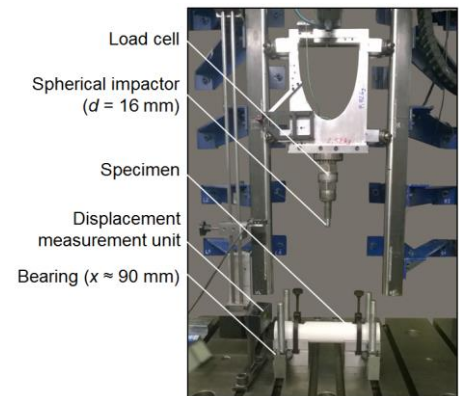


Abbildung 4: Impakt-Fallturm

2. *Zug-/ Druckversuche*

Die Zug-/ Druckversuche werden mit einer servohydraulischen 250kN Maschine durchgeführt. Dabei wird folgende Prüfmethode angewandt:

- a. Aufbringen einer Vorlast von 1kN mit 8mm/min
- b. Halten der Vorlast für 3s
- c. Entlasten auf 200N
- d. Aufbringen der Kraft mit 2mm/min (wegeregelt)

3. *Ultraschallprüfung*

Zur Beurteilung der Laminatschädigung nach den Impaktversuchen werden die Probekörper einer Ultraschallprüfung nach dem Impuls-Echo-Verfahren in einem Tauchtank mit Wasser als Kopplungsmedium unterzogen.

4. *Mikroskopische Untersuchungen*

Zur Vermessung der Eindrücktiefe der Schadensfläche werden mikroskopische Untersuchungen an den Proben durchgeführt.

VI. ERGEBNISSE

Die Impaktversuche an state-of-the-art struts mit Decklack zeigen, dass sich auch bei hohen Energien nur eine geringe Eindrücktiefe ($< 0,1\text{mm}$) einstellt. Das BVID-Level ist von mehreren Faktoren abhängig: Lokale Steifigkeit, Wandstärke, Faserausrichtung, Oberflächenqualität, etc.. Impakt Vorversuche zeigen, dass das BVID-Niveau in Abhängigkeit dieser Faktoren zwischen ca. 7J und 32J variieren kann.

Aus den Zug-/ Druckersuchen von Struts konnte kein wesentlicher Einfluss des Impakt auf die Resttragfähigkeit unter Zuglast hergestellt werden. Wohingegen ein Impakt einen signifikanten Einfluss auf die Restdrucktragfähigkeit zeigt. Abbildung 5 stellt das Kraft-Weg-Diagramm eines nicht vorgeschädigten Struts und eines mit 10J (Impaktposition mittig) vorgeschädigten Struts dar.

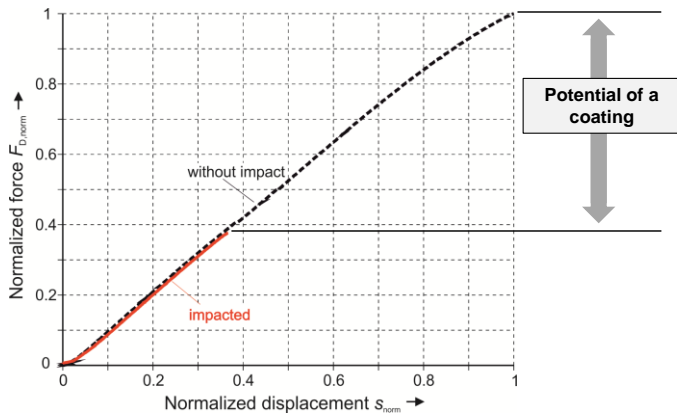


Abbildung 5: Druckversuch eines nicht vorgeschädigten Struts und eines mit 10J vorgeschädigten Struts

Zwischen den geprüften Struts liegen ca. 60% Kraftdifferenz vor. D.h. durch eine geeignete Beschichtung ist eine enorme Gewichtsersparnis möglich.

AirStruts® mit den impaktabsorbierenden Beschichtungen werden mit definierten BVID Energien beaufschlagt (siehe Tabelle 1).

TABELLE 1: IMPAKTABSORBIERENDE BESCHICHTUNG - BVID ENERGIE UND GEWICHTE

Coating (top layer, painted)	BVID energy [J]	Weight per length (relative)
Reference	8,5	100%
Aramid layer	8	+ 12%
Elastomer layer	10	+ 19%
Polyester layer	8	+ 19%

In der Abbildung 6 sind die Kraft-Weg-Diagramme für Struts mit einer impaktabsorbierenden Beschichtung und einer Vorschädigung entsprechend der Tabelle 1 dargestellt.

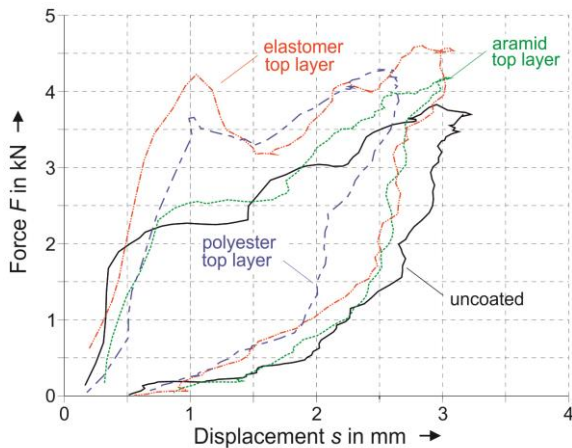


Abbildung 6: Kraft-Weg-Diagramm von Struts mit impaktabsorbierender Beschichtung

Die Ergebnisse zeigen, dass nur eine geringfügige Kraftsteigerung, trotz impaktabsorbierender Beschichtung, erreicht werden konnte. Da die zusätzliche

Beschichtungsmasse bzw. die gesamte Bauteilmasse einen entscheidenden Faktor darstellen, sind die getesteten impaktabsorbierenden Beschichtungen für die Anwendung nicht geeignet.

Im Zuge der Untersuchungen von impaktindizierenden Beschichtungen werden Vorversuche an Platten mit 10mm Wandstärke, hergestellt aus den entsprechenden Materialien, durchgeführt. Beide Platten werden mit der gleichen Impact Energie beaufschlagt (siehe Abbildung 7).

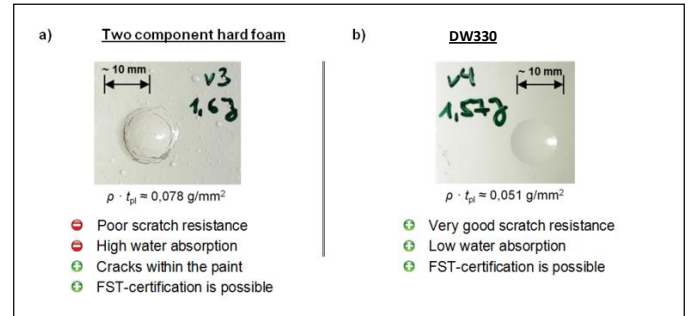


Abbildung 7: Vergleich der Zwei-Komponenten-Hartschaum und DW330 Proben (Epot ≈ konst.; t_{pl} plastische Eindringtiefe)

Beide Beschichtungstypen weisen bereits bei niederenergetischen Impakts (< 2J) deutliche plastische Verformungen auf. Die DW330 Beschichtung erweist sich als vorteilhaft. Alle weiteren Versuche werden an CFK-Rohrprobekörper durchgeführt. Getestet werden verschiedene Wandstärken und Rezepturen der Beschichtung.

Die Ultraschalluntersuchungen zeigen, dass bei allen Probekörpern Impakts mit einer Energie von ca. 8,5J eine großflächige Schädigung des Laminates verursachen. Beim Unterschreiten einer Wandstärke von 0,7mm verursachen bereits Impakts mit einer Energie von ≤ 1J eine leichte Schädigung des Laminates. Für die Impact-Indikationsbeschichtung wird daher eine Mindestwandstärke von 0,7mm angestrebt. Abbildung 8 zeigt exemplarisch einen C-Scan eines mit Impakts versehenen Rohrprobekörpers, der mit DW330 beschichtet ist.

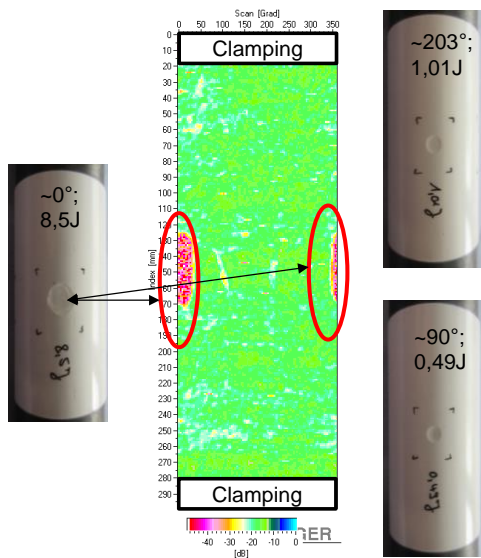


Abbildung 8: Ultraschall C-Scan eines CFK-Rohrprobekörpers inkl. DW330 Beschichtung mit unterschiedlichen Impact Energien

Anhand der mikroskopischen Untersuchung der Impakts (vgl. Abbildung 9) werden die Eindrücktiefen für verschiedene Impact-Energien vermessen (siehe Tabelle 2).

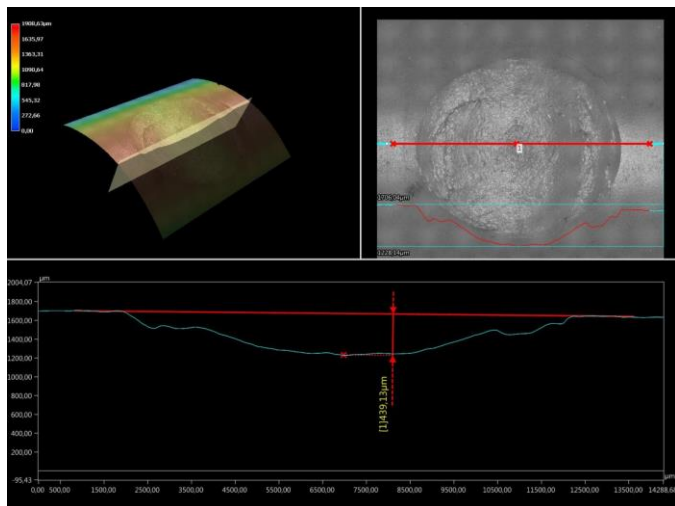


Abbildung 9: Mikroskopische Aufnahme der DW330-Beschichtung (Wandstärke 0,7mm) mit einem Impact von 8,5J

TABELLE 2: EINDRÜCKTIEFE DER DW330-BESCHICHTUNG (WANDSTÄRKE 0,7MM) FÜR VERSCHIEDENE IMPAKT ENERGIEN

Impact energy [J]	Indentation depth [µm]
8,5	439
1,01	328
0,49	323

Die DW330-Beschichtung visualisiert Schlagbeanspruchungen bereits bei geringen Energien (< 1J).

Demzufolge können Struts mit einer solchen Beschichtung deutlich leichter dimensioniert werden.

Mit der entwickelten DW330-Beschichtung besteht bei gleicher Grenzlast ein Einsparpotential von ca. 40% gegenüber den state-of-the-art Struts mit herkömmlichem Decklack. Eine Anpassung der Beschichtung ist möglich, um die BVID-Grenzenergie anzuheben.

VII. ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen der Entwicklung einer Impact-Beschichtung wurden Impactversuche mit anschließenden Zug-/ Druckversuchen an impactabsorbierenden Beschichtungen durchgeführt. Es wurde festgestellt, dass die absorbierenden Eigenschaften der Beschichtungen im Vergleich zur Zusatzmasse der Beschichtung keinen Mehrwert für die AirStruts® liefert.

Impactversuche an impactindizierenden Beschichtungen zeigen hingegen eine frühe Visualisierung des Impakts bei niederen Energien. Eine Beschichtung bestehend aus DW330 erweist sich als besonders geeignet. Struts können dadurch gewichtsoptimierter dimensioniert werden und bieten ein Gewichts-Einsparpotential gegenüber herkömmlichen AirStruts® von ca. 40%.

LITERATUR

- [1] Norm DIN EN 6038:2016-02: Luft- und Raumfahrt – Faserverstärkte Kunststoffe – Prüfverfahren – Bestimmung der Restdruckfestigkeit nach Schlagbeanspruchung, DIN Normenausschuss Luft- und Raumfahrt, Februar 2016
- [2] S. Barut - "Sensitive Coating Solutions to Lower BVID Threshold on Composite Structure, Springer International Publishing Switzerland; 2016
- [3] H. Sung Kim, M. A. Khamis - Failure and impact behaviours of hollow micro-sphere/epoxy resin composites; Department of Mechanical Engineering, The University of Newcastle, Callahan NSW 2308, Australia; June 2001
- [4] Sutikno, W. Berata, W. Wijanarko, I. Sidharta - Effect of volume fraction Epoxy-Hollow Glass Microspheres and curing temperature variation on compressive properties of composites; Mechanical Engineering Department – Faculty of Industrial Technology Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia; February 2016