Fachartikel

Reparieren statt ersetzen: EHLA erneuert hochfeste Fahrwerkskomponenten

Fahrwerke zählen zu den am stärksten belasteten Baugruppen eines Flugzeugs. Beim Start, bei der Landung und beim Rollen wirken hohe Kräfte auf Radachsen, Kolben, Bolzen und weitere sicherheitskritische Komponenten. An Funktionsflächen berühren Lager, Buchsen oder Dichtungen die Bauteiloberfläche. Reibung, lokale Druckspitzen und wiederkehrende Lasten erzeugen dort Verschleiß. Gleichzeitig greifen Kälte, Hitze, Feuchte, Kerosin, Reinigungs- und Enteisungsmittel sowie Eis, Sand und Staub die Oberflächen an und begünstigen Korrosion.

Bei einer Wartung eines Fahrwerks bauen Fachleute Komponenten aus, reinigen, prüfen und vermessen sie. Kleinere Schäden schleifen sie aus, solange die Reparaturgrenzen dies erlauben. Bei zu großem Materialverlust bleibt häufig nur der Austausch. Das verursacht Kosten, verlängert Standzeiten und bindet Ressourcen.

Üblicherweise schützt Hartchrom die Funktionsflächen vor Verschleiß und Korrosion. Strengere Anforderungen an Umwelt- und Arbeitsschutz erhöhen jedoch den Bedarf an Alternativen. Bei beschädigten Bereichen reicht Schutz allein nicht aus: Hier zählt eine zweite Fähigkeit, nämlich verlorenes Material gezielt wieder aufzubauen, ohne die Eigenschaften des hochfesten Grundwerkstoffs zu beeinträchtigen.

Klassische Schweißverfahren eignen sich dafür nur bedingt. Zu viel Wärme verändert bei hochfesten Luftfahrtstählen das Gefüge, beeinflusst die mechanischen Eigenschaften und kann durch Verzug zu geometrischen Abweichungen führen. Besonders kritisch ist die Wärmeeinflusszone. Eine geeignete Reparaturtechnologie muss deshalb zwei Anforderungen zugleich erfüllen: Sie erzeugt eine sichere metallische Verbindung und begrenzt den Wärmeeintrag.

LEGATO entwickelt eine neue Reparaturkette

An dieser Herausforderung setzt das Forschungsprojekt LEGATO an. Das Gesamtvorhaben untersucht verschiedene Aspekte künftiger Fahrwerke und bündelt dafür Kompetenzen aus Forschung und Industrie. In einem Teilvorhaben entwickelt das Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT eine laserbasierte Reparaturkette für hochbelastete Fahrwerkskomponenten.

»Im Mittelpunkt unserer Forschung stehen drei Schritte«, verrät Kim Julia Kallies, Projektleiterin am Fraunhofer ILT. »Material lokal wieder aufbauen, die Randzone mechanisch einstellen und die erzeugte Schicht zuverlässig prüfen.«

Die Liebherr-Aerospace in Lindenberg bringt als Industriepartner Anforderungen aus Fertigung, Wartung und Instandhaltung ein: reale Bauteile und Schadensbilder ebenso wie Vorgaben zu Werkstoffen, Härte, Oberflächenqualität und geringem Wärmeeintrag. Der assoziierte Partner Hegenscheidt-MFD unterstützt das Teilvorhaben mit Erfahrung in Rollier- und Festwalzprozessen.

»Für uns zählt am Ende nicht nur, ob eine Schicht im Labor funktioniert«, erklärt Harald Betsch von Liebherr-Aerospace. Er ist Senior Expert Thermal Spraying/Welding im Bereich Materials and Processes. »Entscheidend ist, ob der Prozess zu realen, belasteten Fahrwerkskomponenten, ihren Werkstoffen, Schadensbildern und Reparaturgrenzen passt. Genau diese Anforderungen bringen wir aus Entwicklung, Fertigung und Instandhaltung in LEGATO ein.«

Den Materialauftrag übernimmt EHLA, eine Hochgeschwindigkeitsvariante des Laser Metal Deposition (LMD). Ein Laser schmilzt metallisches Pulver auf und trägt es lokal auf die Bauteiloberfläche auf. Die hohe Prozessgeschwindigkeit und der vergleichsweise geringe Wärmeeintrag machen EHLA besonders interessant für wärmeempfindliche und hochfeste Werkstoffe.

Kim Kallies und ihre Forschungsgruppe untersuchen im Projekt mehrere Werkstoffkombinationen aus der Anwendung. 300M repariert das Team mit artgleichem Material. Für korrosionsbeständige Schichten prüft es unter anderem einen martensitischen Edelstahl, einen speziell für EHLA entwickelten Werkstoff. Auch 15-5PH, ein hochfester, korrosionsbeständiger Stahl für Fahrwerksstrukturen, gehört zu den untersuchten Werkstoffen.

Eine Besonderheit von EHLA führt zum nächsten Schritt: Die Prozessgeschwindigkeiten liegen deutlich näher an mechanischen Bearbeitungsverfahren als beim konventionellen LMD. Dadurch koppelt das Team den Materialauftrag direkt mit einem mechanischen Bearbeitungsschritt. Genau diesen Ansatz verfolgt SCaRB.

EHLA und Rollieren in einem Prozess

SCaRB steht für Simultaneous Coating and Roller Burnishing. Der Ansatz verbindet den EHLA-Materialauftrag mit einem direkt nachlaufenden Rollierprozess. Während der Laser metallisches Pulver auf die Bauteiloberfläche aufträgt, folgt das Rollierwerkzeug mit definiertem Abstand und bearbeitet die frisch erzeugte Schicht noch während des Beschichtungsprozesses.

Die hohe Prozessgeschwindigkeit von EHLA schafft dafür die Grundlage: Materialauftrag und Rollieren laufen in einem gemeinsamen Prozessablauf. Das Team spannt das Bauteil zwischen Beschichten und mechanischer Bearbeitung nicht neu ein, spart Rüstzeit und nutzt den kurzen zeitlichen Abstand zwischen beiden Prozessschritten.

SCaRB nutzt nicht nur die Geschwindigkeit des EHLA-Prozesses, sondern auch dessen Restwärme. Die frisch aufgetragene Schicht ist kurz nach dem Materialauftrag noch warm und verformt sich dadurch leichter plastisch. Der Abstand zwischen Laser und Rollierwerkzeug bestimmt, wie warm und verformbar die Schicht beim Rollieren noch ist. Damit steuert dieser Abstand Oberfläche, Härte und Eigenspannungen mit.

Für die Umsetzung entwickelte Hegenscheidt-MFD ein Rollierwerkzeug, welches das Fraunhofer ILT in die Maschinenumgebung integrierte. Über die Zustellung des Werkzeugs stellt das Team die Rollierkraft ein. Mit wechselbaren Rollen passt es Rollenradius und Rollenhärte an die jeweilige Anwendung an.

»Für uns ist entscheidend, dass wir die EHLA-Schicht nicht erst nachträglich bearbeiten, sondern den warmen Zustand direkt im Prozess nutzen«, erklärt die Projektleiterin. »Das Rollieren glättet die Oberfläche, beeinflusst aber zugleich Härte und Eigenspannungen. Damit macht SCaRB aus dem Materialauftrag einen Prozess, mit dem wir die Reparaturstelle gezielt funktional einstellen können.«

Materialeigenschaften gezielt einstellen

Für die spätere Funktion einer reparierten Fahrwerkskomponente reicht die ursprüngliche Geometrie allein nicht aus. Oberfläche und Wärmeeinflusszone brauchen die passenden Eigenschaften für den späteren Lastfall. Dies ist der entscheidende Vorteil von SCaRB: Die Rolle glättet die aufgetragene Schicht, erhöht die oberflächennahe Härte und beeinflusst die Eigenspannungen.

Der Materialauftrag erzeugt je nach Prozess Zugeigenspannungen. Unter zyklischer Belastung begünstigen sie Ermüdungsrisse. Das Rollieren reduziert diese Spannungen und wandelt sie unter geeigneten Bedingungen in Druckeigenspannungen um. Damit wird eine Reparaturstelle nicht nur geometrisch, sondern auch funktional an den späteren Lastfall angepasst.

Die gewünschten Eigenschaften der Reparaturstelle lassen sich über das Prozessfenster steuern. Laserparameter, Pulverparameter, Abstand zwischen Laser und Rollierwerkzeug, Rollierkraft, Rollenradius und Rollenhärte beeinflussen Oberfläche, Härte und Eigenspannungszustand unterschiedlich stark. Im Anschluss werden Schichthaftung, Gefüge, Härte, Eigenspannungen, Oberflächenqualität und vor allem das Ermüdungsverhalten unter realen Lasten überprüft.

Gerade die Ermüdungsfestigkeit spielt bei Fahrwerkskomponenten eine zentrale Rolle, weil sie im Betrieb wiederholt hohen mechanischen Belastungen ausgesetzt sind. Die nächsten Untersuchungen klären deshalb, wie die durch SCaRB eingestellten Eigenspannungen mit der Lebensdauer reparierter Komponenten zusammenhängen. Die Komponente braucht über ihre Einsatzdauer zuverlässig die geforderten Eigenschaften.

Zur Reparaturkette gehört damit auch ein geeignetes Prüfverfahren. Das Fraunhofer IWS bringt dafür LAwave ein, die Laser-induced Surface Acoustic Wave Spectroscopy. Hier regt ein Laser akustische Oberflächenwellen an; das Verfahren wertet deren Verhalten aus und liefert präzise Informationen über die oberflächennahen Eigenschaften der Beschichtung und des darunterliegenden Bereichs, ohne das Bauteil zu beschädigen.

Damit ergänzt LAwave die Prozesskette an einer ausschlaggebenden Stelle: EHLA baut Material lokal wieder auf oder erzeugt eine Schutzschicht, SCaRB stellt Oberfläche und Randzone mechanisch ein, LAwave liefert zerstörungsfreie Daten über die behandelten Bereiche. So rücken Reparatur, Funktion und Prüfung eng zusammen.

Vor einem standardisierten Reparaturverfahren in der Luftfahrt stehen aber noch weitere Entwicklungs- und Qualifizierungsschritte. Das Team überträgt die Ergebnisse aktuell auf reale Bauteilgeometrien und repräsentative Belastungen und erbringt die Nachweise für eine mögliche spätere Anwendung.

Ausblick auf eine automatisierte Reparaturkette

Langfristig zielt LEGATO auf eine durchgängige digitale Reparaturkette. Am Anfang steht ein automatisierter Scan der beschädigten Komponente. Aus den erfassten Geometriedaten bestimmt das System Schadensgröße und Materialverlust und leitet daraus die Bahn für den anschließenden Materialauftrag ab.

Die Reparatur erfolgt lokal mit EHLA. Direkt dahinter bearbeitet das SCaRB-Werkzeug die frisch aufgetragene Schicht und stellt Oberfläche und Randzone ein. Je nach Funktionsfläche folgt ein gezielter Polier- oder Schleifschritt. Den Abschluss bildet eine zerstörungsfreie Prüfung.

Im Zielbild laufen alle Schritte in einem gemeinsamen Aufbau ab, ohne dass das Team das Bauteil zwischen den einzelnen Schritten neu einspannt. Scan, Materialauftrag, mechanische Bearbeitung und Prüfung bilden dann keine getrennten Arbeitsschritte mehr, sondern Teile einer vernetzten Prozesskette.

Liebherr-Aerospace Lindenberg GmbH
Spezialist für integrierte Luftfahrtsysteme

Liebherr-Aerospace Lindenberg GmbH wurde 1960 gegründet und beschäftigt am Standort Lindenberg im Allgäu rund 4.000 Menschen. Das Unternehmen entwickelt, fertigt und betreut integrierte Systeme für die Luftfahrtindustrie. Zum Portfolio zählen Fahrwerkssysteme, Flugsteuerungs- und Betätigungssysteme, Getriebe und Elektronik. Zudem hat es im schnell wachsenden Markt der »Advanced Air Mobility« erfolgreich Fuß gefasst.

Für Fahrwerke deckt Liebherr-Aerospace zentrale Aufgaben ab: vom Engineering über Auslegung, Belastungs- und Ermüdungsrechnung bis zur Fertigung, Prüfung und Instandhaltung. Das Unternehmen entwickelt und fertigt unter anderem Strukturbauteile wie Hauptbeschläge, Gleitrohre, Streben, Verriegelungselemente, Radachsen und Zugstreben.

EHLA

EHLA steht für Extreme Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen. Das Verfahren trägt metallisches Pulver mit einem Laser lokal auf eine Bauteiloberfläche auf. Dabei entsteht eine metallisch verbundene Schicht, die fehlendes Material ersetzt oder eine Schutzfunktion übernimmt. Im Vergleich zum konventionellen LMD arbeitet EHLA mit höherer Prozessgeschwindigkeit und geringerem Wärmeeintrag. Das hilft bei hochfesten Luftfahrtstählen, weil der Prozess nur wenig Wärme in den Grundwerkstoff einbringt.



Bild 1:
Prüfstand für Fahrwerkskomponenten: Hier lassen sich Belastungen untersuchen, wie sie im Betrieb auf sicherheitskritische Bauteile wirken. Besonders beansprucht werden Radachsen, Kolben, Bolzen sowie Kontaktflächen zu Lagern, Buchsen und Dichtungen.
© Liebherr-Aerospace Lindenberg GmbH.

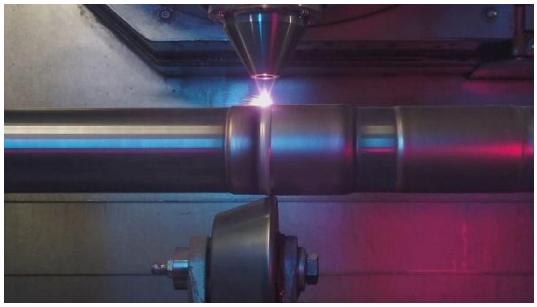


Bild 2:
Für den gekoppelten Prozess wurde eine Maschinenumgebung aufgebaut, die EHLA und Rollieren in einem Setup verbindet. Hegenscheidt-MFD entwickelte dafür ein Rollierwerkzeug, das in den Maschinenrevolver integriert wurde.
© Fraunhofer ILT, Aachen.

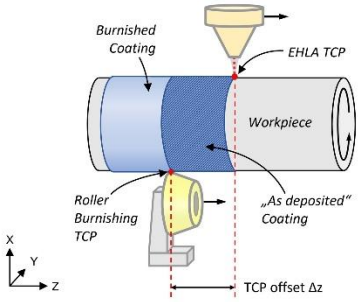


Bild 3:
SCaRB kombiniert EHLA und Rollieren in einem Prozess. Das Rollierwerkzeug nutzt die Restwärme des Materialauftrags, um Oberfläche und Randzone plastisch zu formen. Entscheidend ist dabei das Zusammenspiel aus Abstand zwischen Laser und Rolle, Rollierkraft und Rollenradius.
© Fraunhofer ILT, Aachen.

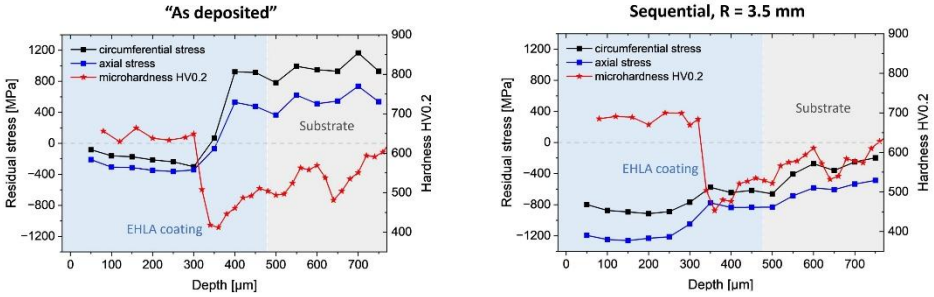


Bild 4:
Vergleich einer EHLA-Schicht vor und nach dem Rollieren: Links zeigt das Diagramm die Schicht direkt nach dem Materialauftrag, rechts nach der Bearbeitung mit dem Rollierwerkzeug. Das Rollieren verändert Eigenspannungen und Mikrohärte über die Tiefe deutlich und verschiebt den Spannungszustand in der Randzone in Richtung günstiger Druckeigenspannungen.
© Liebherr-Aerospace Lindenberg GmbH.

Die Fraunhofer-Gesellschaft mit Sitz in Deutschland ist eine der führenden Organisationen für anwendungsorientierte Forschung. Im Innovationsprozess spielt sie eine zentrale Rolle – mit Forschungsschwerpunkten in zukunftsrelevanten Schlüsseltechnologien und dem Transfer von Forschungsergebnissen in die Industrie zur Stärkung unseres Wirtschaftsstandorts und zum Wohle unserer Gesellschaft. Seit ihrer Gründung als gemeinnütziger Verein im Jahr 1949 nimmt sie eine einzigartige Position im Wissenschafts- und Innovationssystem ein.
Mehr als 30 000 Mitarbeitende an 74 Instituten und selbstständigen Forschungseinrichtungen in Deutschland erarbeiten das jährliche Finanzvolumen von 3,6 Mrd. €. Davon entfallen 3,2 Mrd. € auf das zentrale Geschäftsmodell von Fraunhofer, die Vertragsforschung.

Kontakt

Fachliche Ansprechpersonen

Kim Kallies
Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT
Gruppe Beschichtung LMD und Wärmebehandlung
Tel. +49 241 8906-556
kim.kallies@ilt.fraunhofer.de

Viktor Glushych
Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT
Gruppenleiter Beschichtung LMD und Wärmebehandlung
Tel. +49 241 8906-152
viktor.glushych@ilt.fraunhofer.de

Pressekontakt

Petra Nolis
Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT
Kommunikation
Gruppenleitung
Tel. +49 1714115001
petra.nolis@ilt.fraunhofer.de

www.ilt.fraunhofer.de