

## KURZBERICHT

## Selektives Laserschmelzen von oberflächenbehandelten Pulvern aus Cu-Verbundwerkstoffen (PONAMP)

**Das Projekt war eine Kooperation zwischen Forschungsinstituten aus Deutschland und Belgien, die im Rahmen von CORNET finanziert wurde. Ein projektbegleitender Ausschuss aus beiden Ländern unterstützte die Projektleitung. Auf deutscher Seite waren das fem und das Fraunhofer-Institut UMSICHT beteiligt. Die belgischen Forschungspartner waren SIRRIS, Uni Mons und Materia Nova. Das fem hatte die Rolle des Gesamtprojektkoordinators.**

Das Ziel des Forschungsvorhabens war, neue Materialien für die additive Fertigung zu entwickeln. Der Einsatz von Materialkombinationen im Pulver war vorgesehen, um Teile mit hoher Festigkeit/Leitfähigkeit durch Laserstrahlschmelzen (LBM) zu produzieren. Um dies zu erzielen, wurden die Pulver mittels PVD mit geeigneten Elementen bei Materia Nova (Belgien) beschichtet. Ziel war es, Pulver herzustellen, die aus Cu-Verbundwerkstoffen bestehen, wie z.B. Cu + Nb, W, Ta, Cr, Mo. Die Legierungen sind aushärtbar und sollen durch eine feine Verteilung der unlöslichen Legierungselemente eine hohe Härte und elektrische/thermische Leitfähigkeit erreichen. Schmelzmetallurgisch lassen sich aber solche Legierungen aus unlöslichen bzw. minimal löslichen Systemen nur sehr schwierig oder gar nicht homogen herstellen. Um die Pulver herzustellen, wurden daher verschiedene Ansätze verfolgt: Beschichtung durch PVD, mechanisches Legieren und anschließend Plasma-Sphäroidisieren, und Plasma-Sprühen von Suspensionen. Die Legierungsbildung sollte während der Verarbeitung mit LBM erfolgen.

Im Laufe des Projekts untersuchte das fem die Verarbeitbarkeit von beschichteten und unbeschichteten Cu-Legierungspulvern mit LBM, auch unter Verwendung eines schnellen Screening-Methode auf der Basis von Blechen anstelle von Pulver. Es wurden mehrere Pulver getestet, darunter handelsübliche, unbeschichtete CuNiSiCr- und CuCrZr-Pulver, beschichtete CuNiSiCr- und CuCrZr-Pulver (sowohl mit Nb als auch Cr) sowie W-beschichtetes reines Kupferpulver. Für alle oben genannten Legierungspulver wurden Prozessparameter für eine optimale Verarbeitbarkeit bei einer Laserleistung bis zu 380W entwickelt. Als Technologiedemonstrator wurde eine Spule für einen innovativen Leichtbau-Elektromotor (entwickelt vom KMU Unicorn Engineering) sowohl mit den CuNiSiCr- als auch mit den CuCrZr-Legierungspulvern hergestellt.

Um das Potenzial geeigneter Werkstoffpaarungen schnell beurteilen zu können, wurde ein einfaches Prüfverfahren mit beschichteten Blechen etabliert. Bleche aus vier verschiedenen

Werkstoffen (reines Cu, CuCrZr, CuNiSiCr und CuNiAl-Legierung) wurden bei Materia Nova in Belgien durch PVD im kaltgewalzten Zustand mit fünf verschiedenen Elementen (Cr, Mo, Nb, Ta, W) beschichtet und dem fem zur Verfügung gestellt. Die beschichteten Bleche wurden einmalig in der LPBF-Anlage belichtet und die entstehenden Schmelzspuren metallographisch ausgewertet (Schmelzbreite, -tiefe und Legierungsbildung/-ausscheidung). Unbeschichtete Bleche wurden als Referenz jeweils identisch behandelt. Diese Screening-Methode ermöglichte eine schnelle Bewertung der Beschichtungswirkung und diente der Auswahl der am besten geeigneten Werkstoffpaarungen für nachfolgende Pulverbeschichtungen.

Die Elemente Cr, Nb und W erwiesen sich aufgrund ihrer günstigen Wirkung auf die Energieabsorption und der beobachteten Bildung von Ausscheidungen im Gefüge als die am besten geeigneten Kandidaten für die Pulverbeschichtung (welche bei Materia Nova in Belgien stattfand). Als Substrat wurden die kommerziell erhältlichen Legierungspulver CuCrZr und CuNiSiCr (die vom Industriepartner Schmelzmetall zur Verfügung gestellt wurden) sowie für reines Cu (welches bei Fraunhofer Umsicht verdüst wurde) ausgewählt.

### LBM von beschichteten und unbeschichteten Pulvern

Es wurde eine Parameterstudie mit den unbeschichteten CuNiSiCr- und CuCrZr-Pulver durchgeführt, um die Parameter für eine optimale Dichte festzulegen: dabei wurde die Pulverschichtstärke konstant gehalten (0,025 mm), während Laserleistung (95-480 W), -geschwindigkeit (100-1400 mm/s) und Spurbstand (0,025-0,085 mm) variiert wurden.

Im Vergleich zu den unbeschichteten Pulvern weisen die mit Nb/Cr beschichteten eine höhere Absorption auf. Die besten Ergebnisse wurden mit einer Laserleistung von 250–200 W, einer Geschwindigkeit von 600–900 mm/s und einem Spurbstand von 0,055 mm erzielt (0,02–0,04% Porosität ; Abb 1).

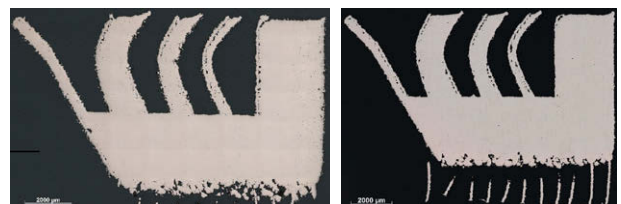


Abb.1: Metallographische Untersuchung des aus beschichtetem Cu-Legierungen hergestellten Testteils. a): CuCrZr + Nb, Prozessparameter 250W, 600 mm/s, Spurbstand = 0,055 mm, Porosität 0,02 %. b) CuNiSiCr + Cr, Prozessparameter 200W, 900 mm/s, Spurbstand = 0,055 mm, Porosität 0,04%

Die REM-Untersuchung der Oberfläche der aus CuNiSiCr/CuCrZr + Nb/Cr hergestellten Teile zeigte fein verteilte Verunreinigungen. EDX-Messungen an diesen Flächen ergaben jeweils erhöhte Gehalte an Nb/Cr und Sauerstoff. Die REM-Untersuchung der metallographischen Schliffen ergab fein verteilte Punkte im Gefüge beider Legierungen (siehe Abb. 2): EDX-Messungen konnten an den entsprechenden Stellen erhöhte Gehalte an Nb, Cr, Ni, Si und Sauerstoff feststellen, was auf Oxid- und Ausscheidungsbildung hinweist.

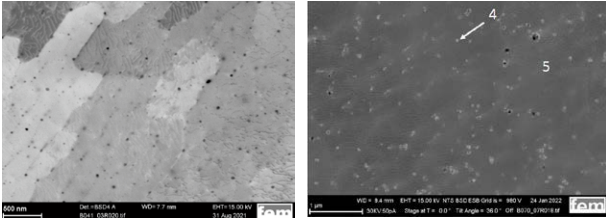


Abb. 2: REM-Untersuchung des Gefüges des aus beschichtetem CuNiSiCr hergestellten Teils. Oxiddispersion und Ausscheidungen in der Matrix sichtbar. a) CuNiSiCr-Legierung mit Cr-Beschichtung; b) Legierung mit Nb-Beschichtung, EDX Messpunkte. 5: Cu, Cr / 4: Cu, Cr, Nb

Die Beschichtung mit W auf ReinCu bewirkte eine sehr hohe Absorption und die Verarbeitbarkeit des Materials wurde dadurch stark erhöht. Mit 380 W, 800 mm/s, Spurabstand 0,055–0,066 mm wurde in den Bauteilen eine Porosität <1% erzielt. Mit denselben Parametern weisen Bauteile aus ReinCu ohne Beschichtung hingegen ~16 % Porosität auf (siehe Abb. 3).

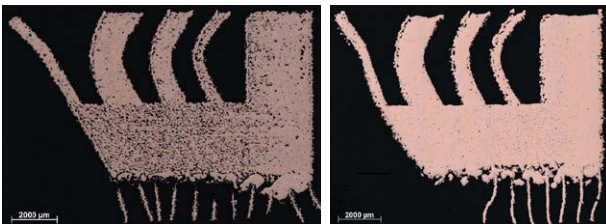


Abb. 3: Metallographische Untersuchung des aus ReinCu hergestellten Testteils (Prozessparameter 380 W, 600 mm/s, Spurabstand = 0,065 mm) Links: ReinCu, Porosität 15,9 %; rechts: ReinCu + W, Porosität 0,9 %

### Untersuchung an Probekörpern: Messung der physikalischen Eigenschaften

Um die physikalischen Eigenschaften der hergestellten Materialien zu messen, wurden kleine Platten (14 x 14 x 2,8 mm) mit den optimalen Laserparametern hergestellt. An diesen Platten wurden die Vickershärte und die elektrische Leitfähigkeit für drei Materialzustände gemessen: im Ausgangszustand, lösungsgeglüht und lösungsgeglüht und anschließend ausgelagert. Die elektrische Leitfähigkeit wurde mit der Wirbelstromprüfung an geschliffenen Proben gemessen.

Das Diagramm in Abbildung 4 zeigt einen grafischen Vergleich der gemessenen Werte. Die Eigenschaften der CuNiSiCr/CuCrZr AM-Teile nach dem Lösungsglühen und der Alterung stimmen mit den Datenblattwerten des Herstellers überein und übertreffen diese (186 HV1, 38 % IACS bzw. 115 HV1, 75,8 % IACS). Die Werte des handelsüblichen CuNiSi-Blechs (202 HV1 und 55 % IACS) wurden mit denen des additiv hergestellten Materials verglichen: die AM-Teile weisen eine höhere Härte (248 HV1), aber eine geringere Leitfähigkeit (40 % IACS) auf. Was die Auswirkung der Wärmebehandlung betrifft, ist der AM-Zustand äh-

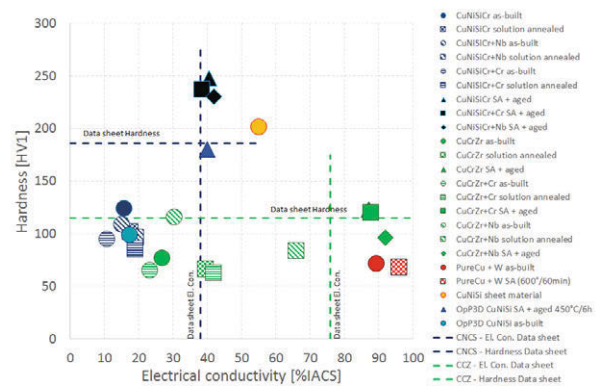


Abb. 4: Grafische Darstellung der gemessenen physikalischen Eigenschaften (Vickershärte und elektrische Leitfähigkeit) an den Plättchen im gebauten und thermisch behandelten Zustand

lich wie der lösungsgeglühte Zustand, außer bei CuCrZr + Nb (bei dem das Lösungsglühen die elektrische Leitfähigkeit drastisch verbessert – von 30 auf 66 % IACS). Nach dem Lösungsglühen und der Auslagerung zeigen beschichtetes und unbeschichtetes CuCrZr/CuNiSiCr eine ähnliche Leitfähigkeit und Härte. Nach dem Lösungsglühen und der Alterung erreicht das AM-Teil aus reinem Cu + W eine elektrische Leitfähigkeit von 96 % IACS, was mit der geringen Porosität (<1 %) des Teils übereinstimmt.

Die Optimierung der Schichtdicke, der Verarbeitungsbedingungen und der Wärmebehandlung nach der LBM-Behandlung ist wichtig für eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften. Die Bildung von Ausscheidungen war das Ziel des Forschungsansatzes, der darin bestand, die Menge eines nicht mischbaren Elements in der Legierung durch PVD-Beschichtung zu erhöhen und nach der LBM-Verarbeitung fein verteilte Ausscheidungen zu erhalten (wie in Abbildung 2 zu sehen), um die physikalischen und mechanischen Eigenschaften der Teile zu verbessern. Weitere Arbeiten sind erforderlich, um den physikalischen Prozess und das Zusammenspiel von Beschichtung, LBM-Verfahren und Nachbehandlung zu verstehen, um optimale Eigenschaften zu erzielen.

Die Beschichtung von reinem Cu mit W sorgte für eine erhöhte Energieabsorption und ermöglichte die Bearbeitung des Materials mit einer geringeren Laserleistung (< 380 W), während normalerweise ein LBM-System mit einem 1000-W-Laser erforderlich wäre, um eine Dichte von 99% zu erreichen. Solche LBM-Systeme haben jedoch einen größeren Laserspot (z.B. 70–100 µm) und sind nicht in der Lage, feine und detaillierte Strukturen wie die in diesem Projekt hergestellten zu erzeugen. Reines Cu ist (aufgrund seiner Instabilität bei der LBM-Bearbeitung) derzeit als Material für die additive Fertigung industriell nicht weit verbreitet, und in dieser Hinsicht lassen sich die Kosten der PVD-Behandlung durch die bessere Bearbeitbarkeit des Materials rechtfertigen.

### Additive Fertigung eines Demonstrators

Für den Bau von Demonstratoren wurde die Geometrie einer Spule für hocheffiziente Elektromotoren (entworfen vom KMU und Projektpartner Unicorn Engineering GmbH) gewählt. Die Spule findet ihre Anwendung in einem eisenfreien Elektromotor

mit Leichtgewicht und hohem Wirkungsgrad für mobile Anwendungen. Das Bauteil wurde sowohl mit CuNiSiCr- als auch mit CuCrZr-Legierungen gebaut (siehe Abb. 5).

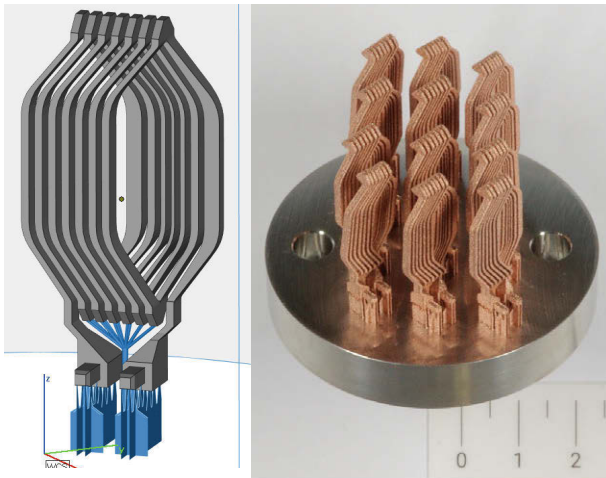


Abb.5: Fertigung des Demonstrators (Spule für Elektromotor). Links: CAD-Konstruktion (Design von Unicorn Engineering GmbH); rechts: additiv gefertigte CuCrZr-Teile auf der Bauplattform

### Danksagung

PONAMP is a Cornet Project funded by national agencies members of the Cornet Network: German Federation of Industrial Research Associations (AiF) | Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action | Service Public de Wallonie – DGO6 (SPW)



Supported by:



Federal Ministry  
for Economic Affairs  
and Climate Action

on the basis of a decision  
by the German Bundestag



Wallonie

AiF 250 EN (CORNET)

1.9.2019 – 28.2.2022

#### INDUSTRIEPARTNER

Arnd Sauter GmbH | BMW AG | ECKA Granules Germany GmbH | INDUTHERM Erwärmungsanlagen GmbH | KME Germany GmbH & Co.KG | Reischauer GmbH | SCHMELZMETALL Deutschland GmbH | Trovus Tech GmbH | Unicorn Engineering GmbH | Höganäs /H.C. Starck Surface Technology and Ceramic Powders GmbH | SAGITA SA | Diarotech SA | Ionics SA | Nemotherm SPRL | FN Herstal SA | EREM SA | Image Matters SA | ThalesAlenia Space SA | Manetco SPRL | AMOS SA | SONACA SA | Höganäs Belgium SA | Thermallium SPRL | Euro Heat Pipes SA | Innovative Coating Solutions SA

#### FORSCHUNGSPARTNER

Fraunhofer UMSICHT, Sulzbach-Rosenberg/Deutschland | MateriaNova, Mons/Belgien | sirris, Brussels/Belgien | Université de Mons (Plasma-Surface Interactions Chemistry), Mons/Belgien

#### ANSPRECHPARTNER

fem | Forschungsinstitut Edelmetalle + Metallchemie | Katharinenstraße 17 | 73525 Schwäbisch Gmünd | Deutschland  
Dr. Ulrich Klotz, klotz@fem-online.de | B. Eng. Dario Tiberto, tiberto@fem-online.de, +49 7171 1006-714