

Systematische Untersuchung der parameterabhängigen Mikrostruktur- ausprägung auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften von gelöteten Verbunden aus SLM-generierten und konventionell hergestell- ten Werkstoffen

L. Wojarski, J. Bültena, W. Tillmann

Lehrstuhl für Werkstofftechnologie, Technische Universität Dortmund, Dortmund, Deutschland

Das Vakuumlöten von konventionell und additiv gefertigten Komponenten ermöglicht eine effiziente und kostenoptimierte Fertigung großvolumiger Bauteile mit komplexen Funktionselementen. Beim additiven Fertigungsprozess des Laser-Strahlschmelzens (PBF-LB/M) entstehen infolge des beschränkten Bauraums der Fertigungsanlage und der geringen Baugeschwindigkeiten Einschränkungen in der Bauteilgröße. Diese Einschränkungen können mit Hilfe der Löttechnik überwunden werden, indem komplexe PBF/LB/M-gefertigte Teilkomponenten an großvolumige, konventionell hergestellte und geometrisch einfache Teilkomponenten gelötet werden. Ferner sind die ohnehin notwendigen thermischen Nachbehandlungen PBF-LB/M-gefertigter Bauteile ohne zusätzlichen Prozessschritt in einen Lötprozess integrierbar.

Eine zentrale Fragestellung des IGF-Projektes 21693 N ist das Erlangen eines Verständnisses des Benetzungsverhaltens gängiger Lote auf den additiv und konventionell hergestellten Komponenten aus gleichen Legierungen, da eine hinreichende Benetzung für eine qualitativ hochwertige Fügeverbindung grundlegend ist. Die mikrostrukturellen Unterschiede zwischen PBF/LB/M- und konventionell hergestellten Werkstoffen beeinflussen die Diffusionseigenschaften im Lötprozess. Dabei ist davon auszugehen, dass die feine Mikrostruktur des additiv gefertigten Werkstoffs die Diffusion schmelzpunktsenkender Elemente des Lots an Korngrenzen beschleunigt, was eine Erhöhung der Solidustemperatur und Verschlechterung des Fließverhaltens des Lots zur Folge haben kann. Im Rahmen der Untersuchung wurde daher das Benetzungsverhalten des Nickelbasislots Ni 660 auf konventionell und additiv gefertigter IN718 analysiert und lichtmikroskopisch ausgewertet. Zudem wurden REM-Untersuchungen an Querschliffen der Benetzungsproben durchgeführt und die Mikrostruktur diskutiert.

Systematic investigation of the parameter-dependent microstructural characteristics and their influence on the mechanical-technological properties of brazed joints made from SLM-generated and conventionally manufactured materials

Vacuum brazing of conventionally and additively manufactured components enables efficient and cost-optimized production of large-volume components with complex functional elements. In the additive manufacturing process of laser beam melting (PBF-LB/M), restrictions in component size arise due to the limited space of the production system and the manufacturing rates. These limitations can be overcome with the help of brazing technology by brazing complex PBF-LB/M-manufactured components to large-volume, conventionally manufactured and geometrically simple components. Furthermore, the thermal post-treatment of PBF-LB/M-manufactured components, which is necessary anyway, can be integrated into a brazing process without an additional process step.

A main goal of the IGF project 21693 N is to gain an understanding of the wetting behavior of common filler materials on additively and conventionally manufactured components made of the same alloys, as sufficient wetting is essential for a high-quality joint. The microstructural differences between PBF-LB/M and conventionally produced materials affect the diffusion properties in the brazing process. It can be assumed that the fine microstructure of the additively manufactured material increases diffusion of elements of the braze material along the grain boundaries, which leads to an increase in the solidus temperature of the braze alloy and impede its spreading behavior. As part of the study, the wetting behavior of the nickel-based braze alloy Ni 660 on conventionally and additively manufactured IN718 was analyzed and evaluated using light microscopy. In addition, SEM examinations were carried out on cross-sections of the wetting samples and the microstructure was discussed.

1 Einleitung

Additive Fertigungsverfahren (engl.: Additive Manufacturing – kurz: AM) eignen sich insbesondere zur Herstellung geometrisch komplexer Funktionsbauteile, die auf konventionellem Wege gar nicht oder mit sehr viel spanabhebender Bearbeitung gefertigt werden. Durch den schichtlagigen Aufbau der Komponenten bieten die Verfahren eine hohe Ressourceneffizienz und kurze Entwicklungszyklen vor allem im Bereich des Prototypenbaus und Kleinstserien. Aufgrund der relativ niedrigen Aufbauraten sind AM-Verfahren allerdings bei der Produktion großer, einfach geformter Komponenten nur eingeschränkt wirtschaftlich einsetzbar [1].

Eine hybride additive Fertigung, bei der die additiv gefertigten Komponenten auf eine konventionell hergestellte Grundstruktur aufgebracht werden, ist über das Laser-Strahlschmelzen im Pulverbett (PBF-LB/M) sehr aufwendig, da eine Fixierung der Grundkörper durch eine zusätzliche Aufspannung auf der Bauplattform notwendig ist. Zudem muss die Position des Grundkörpers exakt erfasst werden und zur Ausrichtung der digitalen Position der additiven Komponente muss ein Messsystem in die Prozesskette integriert werden. Weiterhin führt der limitierte Bauraum der PBF-LB/M-Anlagen zu Beschränkungen der maximal möglichen Größe der herstellbaren Komponenten [2].

Eine Alternative für die Herstellung hybrider Strukturen ist die Löttechnologie, die es erlaubt, additiv gefertigte Komponenten auf konventionell gefertigte Bauteile zu löten. Hierdurch lassen sich nicht nur innovative Hybridverbunde erzeugen, sondern auch gezielte, lokale Reparaturen an Bauteilen vornehmen.

PBF-LB/M gefertigte Werkstoffe weisen im Vergleich zu konventionellen Werkstoffen bei chemisch gleicher Zusammensetzung jedoch deutliche Unterschiede in der Mikrostruktur auf. Der lasergeschmolzene Werkstoff besitzt aufgrund des schichtweisen Materialaufbaus eine ausgeprägte Anisotropie [3]. Quer zur Aufbaurichtung besteht das Material aus einem heterogenen Gefüge mit langgestreckten, sich überlappenden Schmelzspuren. Diese Schmelzspuren bilden die Belichtungsstrategie des im PBF-LB/M-Fertigungsprozess verwendeten Laserstrahls ab. Parallel zur Aufbaurichtung werden periodisch wiederkehrende und sich überlappende halbkreisförmige Strukturen sichtbar [3, 4]. Üblicherweise besitzen damit die additiv gefertigten Komponenten in dieser Ebene eine im Vergleich zum konventionellen Werkstoff deutlich feinere Mikrostruktur mit kleineren mittleren Korndurchmessern. Die höhere Zahl an Körnern in dem Additivwerkstoff führt zu einer höheren Zahl an der Oberfläche befindlichen Korngrenzen, die sich im Lötprozess auf die Diffusion schmelzpunktsenkender Elemente aus dem Lot an den Korngrenzen des Grundwerkstoffes auswirken kann. Eine Verarmung des Lotes an schmelzpunktsenkenden Elementen im Lot während des Benetzungsvorgangs im Lötprozess, führt zu einem Anstieg der Solidustemperatur des Lotes, wodurch das Fließ- und Ausbreitungsvermögen des Lotes herabgesetzt wird. Dabei ist ein hinreichendes Benetzen des Grundwerkstoffes durch das Lot eine Grundvoraussetzung, damit eine Lötung überhaupt möglich ist. Daher wurde im Rahmen des IGF-Vorhabens 21693 N u.a. das Benetzungsverhalten von den Nickelbasisloten Ni 660 und VZ 2177 auf additiv gefertigtem IN718 bzw. 316L im Vergleich zu konventionell hergestellten Werkstoffen grundlegend untersucht.

Nickelbasissuperlegierungen werden seit Jahrzehnten im Rahmen von industriellen Anwendungen löstechnisch verarbeitet [5, 6]. Als Lote kommen üblicherweise Nickelbasislote zum Einsatz. Ihr Benetzungsverhalten auf konventionell hergestellten Werkstoffen ist bereits umfangreich untersucht [7, 8]. Dagegen sind Untersuchungen zur Benetzbarkeit von PBF-LB/M-Grundwerkstoffen durch Nickelbasislote bislang nur vereinzelt vorhanden [9]. In den Untersuchungen von Awayes et al. [10] wurde das Verhalten verschiedener Nickelbasislote im Lötspalt der additiv hergestellten Legierung Haynes 282 analysiert. Dabei wurde das Benetzungsverhalten als eine Erscheinung mituntersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Ausbreitung sowie die Anbindung der Lote stark von der Art der Oberflächenvorbehandlung abhängen. Bei IN718, das ebenfalls im PBF-LB-Verfahren gefertigt wurde, untersuchten Reinkensmeier et al. [11] und Xia et al. [12] die Mikrostruktur der Lötverbindung und berichteten über eine geringe Anzahl an Poren und Bindungsfehlern in der Fügezone. Zusätzlich zeigte die Untersuchung von Reinkensmeier [11], dass im Vergleich zu konventionell hergestelltem IN718 bei dem PBF-LB-Werkstoff eine größere Lötspaltbreite, eine verstärkte Ausbildung spröder Phasen und eine feinere Ausscheidungsstruktur in der Diffusionszone auftraten. Diese Besonderheiten wurden auf die feinkörnige Mikrostruktur der additiv gefertigten Fügepartner zurückgeführt, welche die Benetzungs- und Diffusionsmechanismen beeinflusst.

In diesem Manuskript wird die Nickelsuperlegierung IN718 in Verbindung mit dem Nickelbasislot Ni 660 untersucht. Dabei liegt der Fokus auf dem Benetzungsverhalten unter verschiedenen Bedingungen. Sowohl die Applikationsform des Lotes – ob als Paste oder Folie – als auch die Haltezeit im Vakuumlötprozess werden auf ihre Auswirkungen auf die Benetzungseigenschaften analysiert. Additiv gefertigtes IN718 mit verschiedenen Oberflächenmodifikationen und Wärmebehandlungen wird dabei herangezogen und mit konventionell produziertem IN718 verglichen, um Unterschiede im Verhalten der Lotausbreitung herauszustellen.

2 Experimentelles

Für die Benetzungsuntersuchungen wurden von der Fa. Siemens Energy AG die additiv gefertigten Grundwerkstoffe bereitgestellt. Die PBF-LB/M-Halbzeuge wurden aus dem Ausgangspulver, dessen chemische Zusammensetzung in Tabelle 1 dargestellt ist, mit der Anlage SLM280 von SLM Solutions hergestellt. Die zylindrischen Halbzeuge mit einem Durchmesser von 20 mm wurden im Anschluss auf eine Höhe von 5 mm zugeschnitten (siehe Bild 1). Somit liegt die Fügefläche der Proben senkrecht zur Aufbaurichtung des PBF-LB/M-Werkstoffs.

Die Proben wurden vor den Benetzungsversuchen bei 980°C für 60 Minuten in einer Vakuumatmosphäre lösungsgeglüht. Als Referenzwerkstoff wurde IN718 als Stabmaterial im lösungsgeglühten Zustand bestellt und ebenfalls in die in Bild 1 dargestellte Form zugeschnitten. Die chemische Zusammensetzung des Stabes sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1. Chemische Zusammensetzung der IN718-Grundwerkstoffe in Gewichtsprozent

IN718	Ni	Fe	Cr	Nb	Mo	Co	Ti	Mn	Al
Konventionell	53.95	17.79	19.53	6.39	3.48	0.47	0.55	0.19	0.55
PBF-LB/M	51.00	17.50	19.02	6.43	3.83	0.18	1.03	0.20	0.80

Die Grundwerkstoffe wurden vor den Benetzungsuntersuchungen unterschiedlichen Oberflächenbehandlungen unterzogen. Die Oberflächenvorbehandlungen umfassten verschiedene Schleifprozesse, eine Plasmabehandlung sowie einen Beschichtungsprozess. Dabei wurden die Fügeflächen aller Proben auf eine Oberflächengüte von N3 bzw. N6 entsprechend DIN 3141 geschliffen. Ein Teil der Proben mit der Oberflächengüte N6 wurde zudem einer Plasmabehandlung unterzogen. Hierdurch sollte neben dem Einfluss der Oberflächenrauheit auf die Benetzung auch der Einfluss einer chemischen Aktivierung der Fügefläche untersucht werden. Darüber hinaus wurde ein Teil der Proben mittels Lichtbogenverdampfen PVD-beschichtet. Die Beschichtung erfolgte mit der Anlage Arc-PVD20 der Firma Metaplas Deutschland. Hierbei wurden Proben mit dem N6-Oberflächenzustand mit einer 5 µm dicken Nickelschicht beschichtet, um zusätzlich den Einfluss einer Vernickelung der Fügeflächen, die industriell zur Verbesserung der Lötbarkeit appliziert wird, untersucht [13].

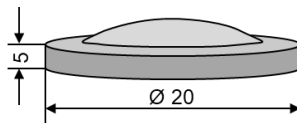


Bild 1. Probengeometrie der Benetzungsproben

Bei dem verwendeten Hartlot handelt es sich um das Nickelbasislot Ni 660 (genormt nach ISO 17672). Der Lotwerkstoff wurde sowohl als Folie als auch als Paste auf die Benetzungsproben appliziert. Bei der Applikationsform als Folie wurde aus der Lotfolie, die eine Dicke von 25 µm aufwies, eine Scheibe mit einem Durchmesser von 3 mm ausgestanzt und diese gestapelt, um eine Gesamtdicke von 50 µm zu erzielen. Die Lotpaste mit einem Binderanteil von 7 Gew.-% wurde über Siebdruck aufgebracht. Hierzu wurde eine Schablone mit einer Dicke von 50 µm und kreisrunder Öffnung mit einem Durchmesser von 3 mm eingesetzt. Da im Vergleich zur Folie bei der Anwendung einer Paste die Gesamtmenge der Lotlegierung bei gleichem Volumen um den Binderanteil herabgesetzt ist, wurde dieser bei der Ergebnisauswertung berücksichtigt.

Für die Benetzungsversuche wurden die Proben in einem Hochvakuumofen (Modell EU 80/1H, Schmetz) platziert. Die Benetzungsversuche wurden bei einer Temperatur von 1090 °C mit variierenden Haltezeiten von 15 bzw. 60 min durchgeführt (siehe Abb. 2). In der Aufwärmphase wurden zwei Haltezeiten bei 450 °C und 1015 °C von jeweils 15 min implementiert, um das Ausdampfen des Binders bei Pastenlötungen sicherzustellen und eine homogene Temperaturverteilung in den Proben kurz vor Erreichen der Löttemperatur zu erzielen. Nach Verstreichen der jeweiligen Lötzeit bei 1090 °C wurden die Proben mit einem Argon-Gasüberdruck von 2 bar und einer Lüfterdrehzahl von 3000 min⁻¹ abgekühlt. Nach dem Lötprozess wurde eine zweistufige Lösungsalterung bei 720°C für 8 h und 620°C für 8 h durchgeführt, um die Ausscheidung der Phasen γ' und γ'' sicherzustellen. Für die Abkühlung von 720 °C auf 620 °C zwischen den beiden Alterungsstufen wurden die Proben mittels Vakuumkühlung abgekühlt. Nach dem isothermen Halten bei 620°C wurden die Proben erneut mit einem Argon-Überdruck von 2 bar abgekühlt.

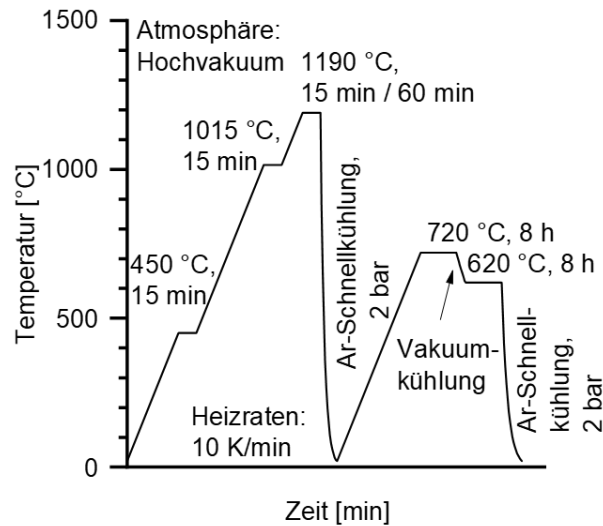


Bild 2. Schematische Darstellung des Temperatur-Zeit-Profiles für die Benetzungsuntersuchungen

Nach den Benetzungsversuchen im Vakuumlötofen wurden von den Proben mit dem Digitalmikroskop Leica DVM6 Draufsichten der Lotausbreitung als 2D-Bilder aufgenommen (siehe Bild3a). Zudem wurden 3D-Bildaufnahmen der benetzten Proben mit dem Digitalmikroskop Alicona Infinite Focus G5 mit Advanced Real3D Rotation Unit erstellt und mit der Software MountainsMap sechs um 60° versetzte Profilverläufe zur Ermittlung des Benetzungswinkels pro Probe durchgeführt (siehe Bild3b) und zudem die Ausbreitungsfläche bestimmt. Je Parametersatz wurden drei Proben analysiert. Zudem wurden von ausgewählten Proben Querschliffe erstellt und die Proben mit dem Rasterelektronenmikroskop JSM 7001F der Firma Jeol untersucht, um Unterschiede in der Mikrostruktur der Benetzungsproben im Grenzflächenbereich zwischen Lot und Grundwerkstoff sichtbar zu machen.

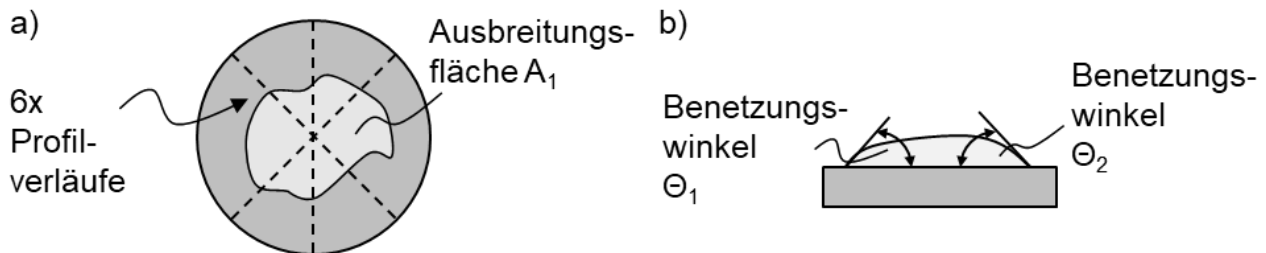


Bild 3. Schematische Darstellung der Ausbreitungsfläche und der Benetzungswinkel

3 Ergebnisse

Bild 4 zeigt die Draufsichten der additiven und konventionellen Benetzungsproben mit den unterschiedlichen Oberflächenmodifikationen bei einer Haltezeit von 15 min und der Lotapplikation „Paste“. Für jeden Parametersatz wurde eine charakteristische Probe ausgewählt. In den lichtmikroskopischen Aufnahmen erscheinen die Grundwerkstoffe dunkel grau und die erstarrten Lote hell mit einer zum Teil metallisch glänzenden Färbung. In den meisten Fällen hat das Lot eine kreisähnliche Form und hat sich im Vergleich zum Ausgangsdurchmesser von 3 mm auf den jeweiligen Grundwerkstoffen ausgebreitet. Unabhängig von der Schleifvorbehandlung der Grundwerkstoffe ist auf der Draufsicht kein Einfluss der Oberflächenbehandlungen auf die Benetzung erkennbar. Gleiches gilt für die zusätzliche Plasmabehandlung der Fügeflächen. Lediglich die Ni-PVD-Beschichtung führt zu einer sichtbar größeren Ausbreitungsfläche des Lotes auf den Grundwerkstoffen. Die beschriebenen Tendenzen sind für beide Grundwerkstoffe gleich. Unterschiede in dem Benetzungsverhalten des Lotes auf dem PBF-LB/M- und dem konventionellen Werkstoff sind aus den Draufsichten nicht zu erkennen.

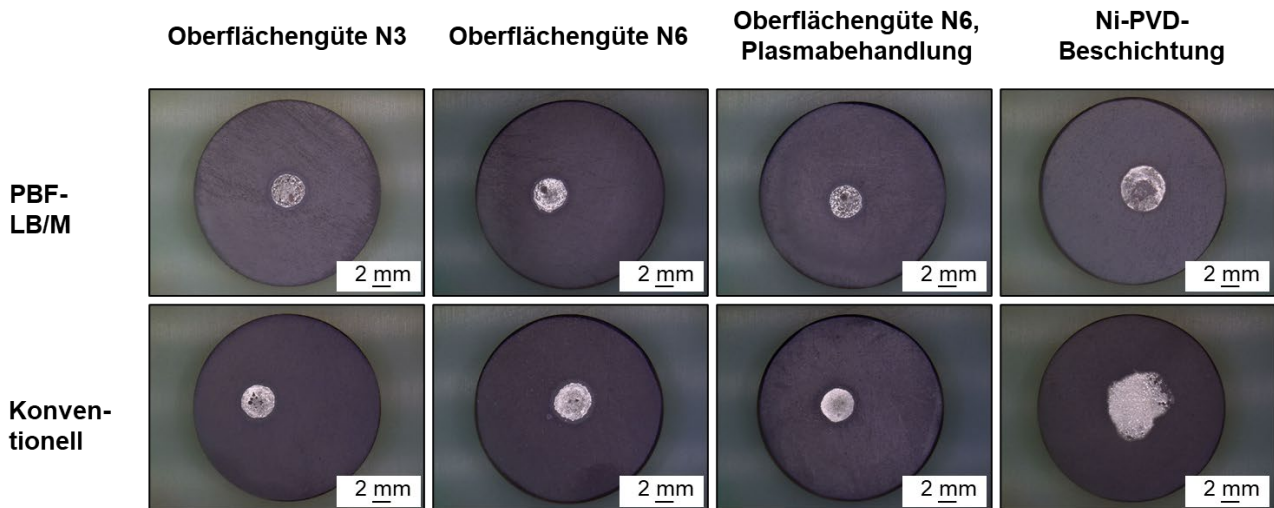


Bild 4. Draufsicht auf die benetzten PBF-LB/M gefertigten und konventionellen IN718-Grundwerkstoffe bei einer Haltezeit von 15 min und Lotapplikation in Form von Pasten

Eine Verlängerung der Haltezeit von 15 auf 60 min führte zu einer deutlichen Zunahme der benetzten Fläche sowohl auf dem PBF-LB/M-gefertigten Grundwerkstoff als auch auf dem konventionellen IN718 unabhängig von der Oberflächenmodifikation. Einzig bei den Nickel-beschichteten Grundwerkstoffen ist die benetzte Fläche kleiner. Im direkten Vergleich zwischen den beiden unterschiedlichen Grundwerkstoffen scheint die Ausbreitungsfläche des Lotes bei einer Haltezeit von 60 min unabhängig von Oberflächenmodifikation größer zu sein als auf dem konventionellen Proben. Dies widerspricht der eingangs genannten These, dass durch die feinere Mikrostruktur und damit an der Fügefläche höheren Korngrenzendichte beim PBF-LB/M-gefertigten Werkstoff eine mögliche Verarmung des Lotes an schmelzpunktsenkenden Elementen zu einem geringeren Fließen des Lotes auf der Werkstoffoberfläche beiträgt. Dieser Effekt wäre bei einer längeren Haltezeit ausgeprägter.

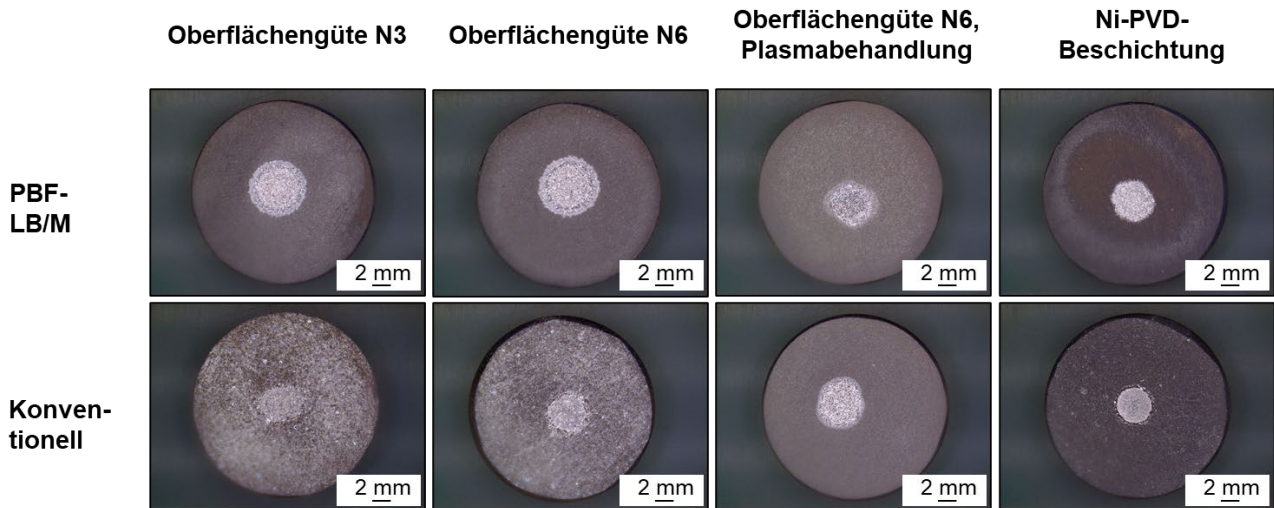


Bild 5. Draufsicht auf die benetzten PBF-LB/M gefertigten und konventionellen IN718-Grundwerkstoffe bei einer Haltezeit von 60 min und Lotapplikation in Form von Folie

Zur besseren Quantifizierung der Ausbreitungsfläche und des Benetzungswinkels, wurden die Kennwerte für beide Werkstoffe mit den unterschiedlichen Oberflächenmodifikationen und Lotapplikationsformen bestimmt und in den Diagrammen in Bild 5 zusammengefasst. Zur Steigerung der statistischen Absicherung wurden die Ergebnisse der Pasten- und Folienlötungen zusammengefasst. Hierzu wurden die Ergebnisse der Lotausbreitung auf die Masse des Metallpulvers bezogen, um eine Vergleichbarkeit der Werte sicherzustellen.

Ni 660 (Folie / Paste) – 1190 °C / 60 Min

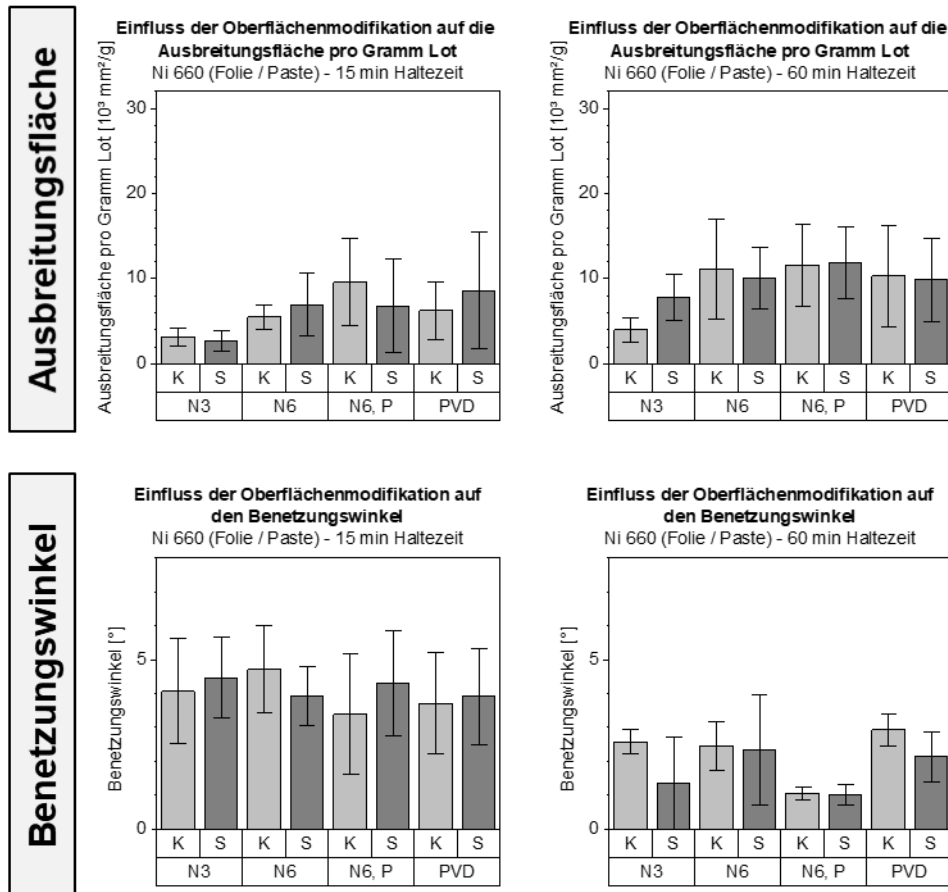


Bild 6. Gemittelte Werte für die Ausbreitungsfläche (oben) pro applizierte Lotmenge in g und für den Benetzungswinkel (unten) für die unterschiedlichen Oberflächenmodifikationen (N3, N6, N6 P (lasmabehandelt), PVD beschichtet) für den additiv gefertigten Werkstoff (S) und für den konventionellen Werkstoff (K) sowie eine Haltezeiten von 15 min (links) und 60 min (rechts)

Der direkte Vergleich der Ausbreitungsflächen und der Benetzungswinkel zwischen den additiv gefertigten Grundwerkstoffen mit den jeweiligen Oberflächenmodifikationen mit den dazugehörigen konventionellen Grundwerkstoffen bestätigt die oben beschriebenen Trends aus den Draufsichten. Die ermittelten Werte variieren nur geringfügig und die Unterschiede liegen meist im Bereich der Streuung. Dennoch scheint es, dass bei einer Haltezeit von 15 min der konventionelle Grundwerkstoff eine minimal bessere Benetzung im Vergleich zum Additivwerkstoff aufweist. Wird die Haltezeit auf 60 min erhöht, so nimmt die Ausbreitungsfläche auf allen Proben zu und der Benetzungswinkel nimmt ab. Zudem liegen die Werte der Ausbreitungsfläche des Additivwerkstoffs stets über denen des konventionellen Materials, allerdings sind die Streuungen deutlich größer als die Unterschiede, weshalb kein klarer Trend feststellbar ist.

Um als zusätzlichen Parameter den Einfluss der Wärmebehandlung des Additivwerkstoffs in die Betrachtungen aufzunehmen, wurden Benetzungsversuche mit PBF-LB/M-gefertigten IN718-Grundwerkstoff im as-built Zustand ohne anschließendes Lösungsglühen durchgeführt. Die Draufsichten der Benetzungsproben mit den unterschiedlichen Oberflächenmodifikationen des PBF-LB/M-Grundwerkstoffs im as-built-Zustand sind in Bild 7 den Draufsichten des konventionellen und des Additivwerkstoffs im lösungsgeglühten Zustand für eine Haltezeit von 15 min gegenübergestellt. Zusätzlich sind in den Aufnahmen die jeweiligen Ausbreitungsflächen (A) und die Benetzungswinkel (W) als Zahlenwerte angegeben.

Die lösungsgeglühten, konventionell hergestellten und lösungsgeglühten PBF-LB/M gefertigten Proben weisen wie in den zuvor dargestellten Übersichten nur geringfügige Unterschiede auf. Dagegen ist die Ausbreitungsfläche des Lotes auf dem Additivwerkstoff im as-built-Zustand bei allen Oberflächenmodifikationen signifikant kleiner und die Benetzungswinkel größer als bei dem Konventionellen oder dem lösungsgeglühten Additivwerkstoff. Selbst bei den mit Nickel PVD-beschichteten Proben ist die Ausbreitungsfläche auf dem Additivwerkstoff im as-built-Zustand am geringsten. Folglich scheint die deutlich feinere Mikrostruktur des PBF-LB/M-Werkstoffs direkt nach der Teilefertigung einen nachteiligen Effekt auf die Benetzung und die Lotausbreitung zu haben. Ein der Fertigung nachgelagertes Lösungsglühen führt scheinbar zu einem Angleichen des

Gefüges im Vergleich zum konventionellen Grundwerkstoff, wodurch sich die Benetzungseigenschaften verbessern. Somit scheint das Benetzungsverhalten empfindlich von dem Gefüge des Grundwerkstoffs an der Fügefläche abzuhängen.

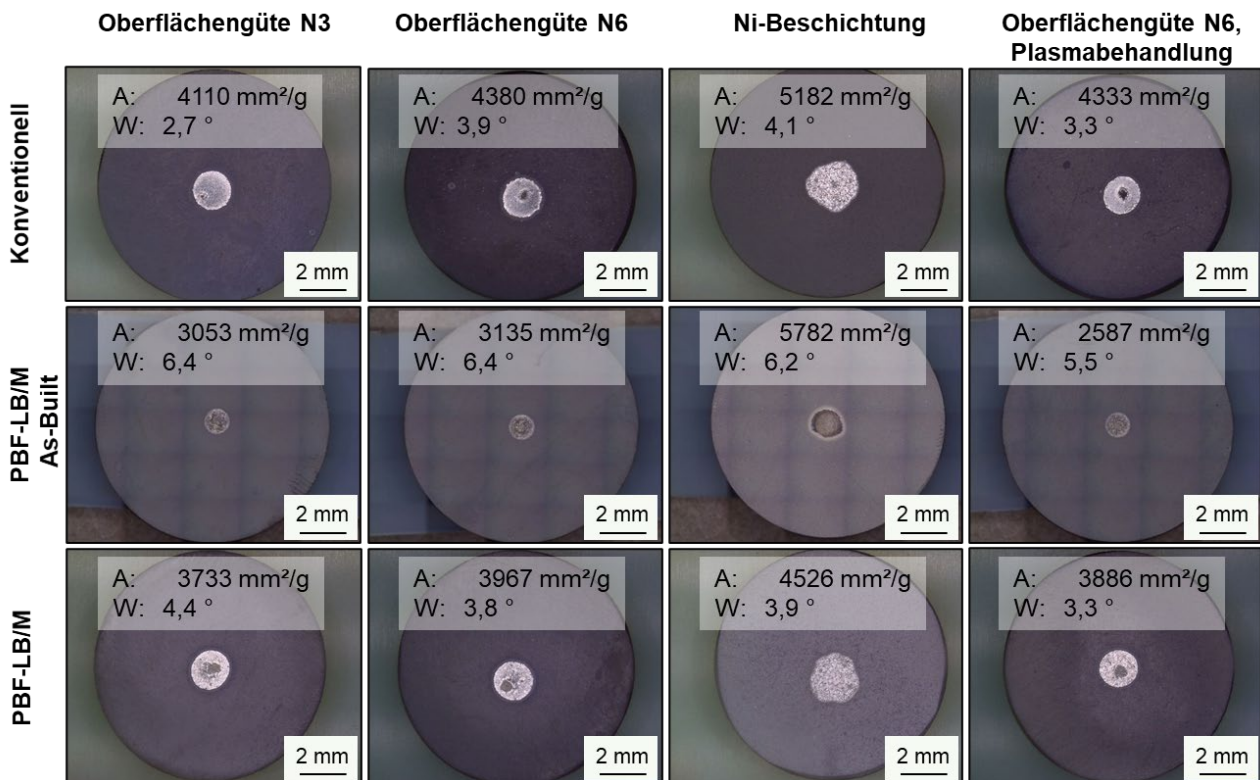


Bild 7. Draufsicht auf die benetzten konventionellen (oben), PBF-LB/M gefertigten as-built- (Mitte) und lösungsgeglühten PBF-LB/M IN718-Grundwerkstoffe bei einer Haltezeit von 15 min und Lotapplikation in Form von Pasten

Aus diesem Grund wurden Querschnitte der as-built und lösungsgeglühten PBF-LB/M-Proben und der konventionellen Probe mit der Oberflächengüte N6 angefertigt und diese rasterelektronenmikroskopisch untersucht (siehe Bild 8). Das sich einstellende Gefüge sowie die Diffusionstiefen der niedrigschmelzenden Elemente aus dem Lot entlang der Korngrenzen der lösungsgeglühten Werkstoffe ähneln sich im Wesentlichen. Dagegen weist die PBF-LB/M gefertigte Probe im as-built-Zustand insbesondere im grenzflächennahen Bereich zwischen Lot und Grundwerkstoff ein tieferes Eindringen des Lotes an den Korngrenzen auf. Zudem führt da engere Netz aus Korngrenzen in dem as-built Additivwerkstoff zu einer höheren Menge an Elementen, die aus dem Lot in den Grundwerkstoff, wodurch möglicherweise die schlechtere Benetzung erklärt werden kann.

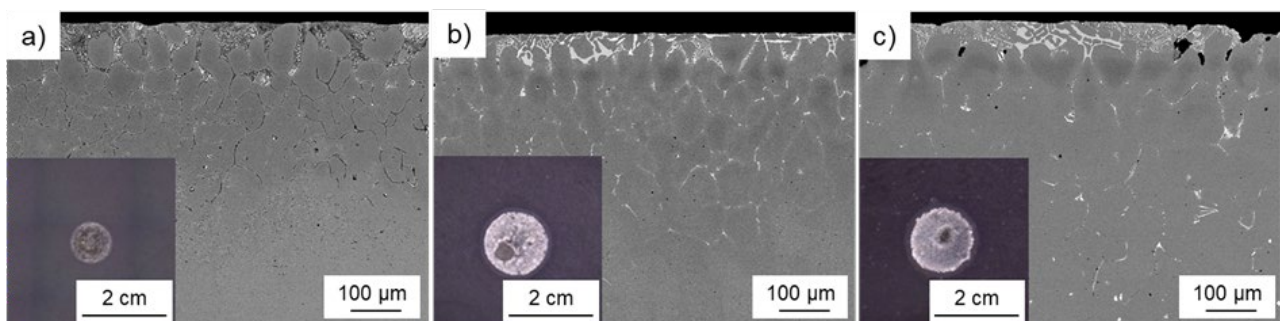


Bild 8. Querschnitte der Benetzungsproben aus IN718 und Ni 660 sowie die Aufnahmen der benetzten Flächen für a) PBF-LB/M „as-built“ sowie für bei 980 °C für 1 h lösungsgeglühte Zustände von b) PBF-LB/M und c) konventionell mit der Oberflächengüte N6.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Das Benetzungsverhalten des Nickelbasislotes NI660 auf PBF-LB/M gefertigtem IN718 bei einer Löttemperatur von 1190 °C mit variierenden Oberflächenvorbearbeitungen und Haltezeiten wurde untersucht und mit konventionell hergestelltem Grundwerkstoff verglichen. Folgende Beobachtungen und Rückschlüsse konnten getroffen werden:

- Die Draufsichten bei den Benetzungsversuchen mit einer Haltezeit von 15 min zeigen eine ähnliche Ausbreitungsfläche des Lotes auf beiden lösungsgeglühten Werkstoffen, unabhängig von Oberflächenmodifikationen oder Schleifvorbearbeitungen. Nur die Ni-PVD-Beschichtung führt zu einer größeren Lotausbreitung. Unterschiede im Benetzungsverhalten zwischen den additiv gefertigten und konventionellen Werkstoffen sind dabei kaum sichtbar und liegen im Bereich der Messwertstreuung.
- Eine Verlängerung der Haltezeit auf 60 min führt zu einem Anstieg der Ausbreitungsfläche des Lotes auf bei beiden lösungsgeglühten Werkstoffen. Ausnahme stellen Nickel-beschichtete Proben dar, die keine wesentliche Veränderung zeigen. Die Ausbreitung des Lotes ist auf den additiv gefertigten Werkstoffen bei längerer Haltezeit tendenziell größer. Die Unterschiede der Messwerte liegen jedoch meist im Bereich der Messstreuung. Daher ist kein signifikanter Trend erkennbar.
- Aus dem Vergleich von „as-built“ und lösungsgeglühten Proben geht hervor, dass die additiv gefertigten IN718-Proben im „as-built“-Zustand eine kleinere Ausbreitungsfläche und größeren Benetzungswinkel als die lösungsgeglühten oder konventionellen Proben aufweisen. Die feinere Mikrostruktur des „as-built“-Werkstoffs wirkt sich scheinbar nachteilig auf die Benetzung aus. Ein nachträgliches Lösungsglühen verbessert die Benetzungseigenschaften dagegen. Die Lösungsglühbehandlung führt offensichtlich zu einem Gefüge, das dem des konventionellen Werkstoffs ähnelt und dadurch bessere Benetzungseigenschaften aufweist.

Folglich zeigen die Ergebnisse, dass das Benetzungsverhalten stark von der Mikrostruktur der additiv gefertigten Werkstoffe abhängt, wobei insbesondere die Lösungsglühbehandlung das Benetzungsverhalten des additiv gefertigten IN718 signifikant verbessert. Um ein weitergehendes Verständnis der Wirkzusammenhänge zwischen der Mikrostruktur und dem Benetzungsverhalten zu erlangen, sind detaillierte Gefügeanalysen der verschiedenen Grundwerkstoffe mit den jeweiligen Oberflächenmodifikationen vor und nach dem Lösungsglühen sowie nach dem Lötzyklus geplant, die mit den Benetzungsergebnissen korreliert werden sollen.

Danksagung

Das Projekt wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Für die Förderung und aktive Mitarbeit der vertretenen Unternehmen in den projektbegleitenden Ausschüssen sei an dieser Stelle gedankt. Der Dank der Autoren gilt auch Ingo Reinkensmeier (Siemens Energy AG), der die in diesem Projekt verwendeten PBF-LB/M-Grundwerkstoffe zur Verfügung gestellt hat.

Schrifttum

- [1] Celik, E.: Additive manufacturing. Science and technology. Berlin, Boston: Walter de Gruyter GmbH 2020
- [2] Langer, L.; Schmitt, M.; Schlick, G.; Schilp, J.: Proc. CIRP, (2022), 112: 358-363.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.09.009>
- [3] DebRoy, T.; Wei, H. L.; Zuback, J. S. et al.: Additive manufacturing of metallic components Process, structure and properties. Progress in Materials Science 92 (2018) 5, S. 112–224
- [4] Saeidi, K.; Gao, X.; Zhong, Y. et al.: Hardened austenite steel with columnar sub-grain structure formed by laser melting. Materials Science and Engineering: A 625 (2015), S. 221–229
- [5] American Welding Society: Brazing Hand Book. 5th Edition (2007). ISBN-10: 0871710463
- [6] Jacobson, M. D.; Humpston, G.: Principles of brazing, 2005, ASM International, ISBN 978-0-87170-812-0
- [7] Christensen, J.; Rorbo, K.: Nickel Brazing Below 1025 C of untreated Inconel 718. Weld. J. (1974), 460-464
- [8] Amato, I; Baudrocco, F; Ravizza, M.: Weld. J. 51 (1972) 7, 341-345.
- [9] Tillmann, W.; Bültena, J.; Wojarski, L.; Zajaczkowski, J.; Donnerbauer, K.; Walther, F.: "Wetting Behaviour of Nickel-based Brazing Alloy BNi-5a on Conventionally Cast and Laser-melted Austenitic Stainless Steel 316L." Journal of Materials Research and Technology (2024).
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.10.228>

- [10] Awayes, J.; Thanhäuser, E.; Reinkensmeier, I.; Fleck, C.: Conference Proceedings of Brazing, high temperature brazing and diffusion bonding, Aachen (2022), 226-234. ISBN: 978-3-96144-182-2
- [11] Reinkensmeier, I.; Blank, R.; Herrmann, O.: Schweißen und Schneiden (2019), 71: 214-220.
- [12] Xia, C.; Zhao, M.; Sun, W.; Li, H.; Liu, P.: Mater. Res. (2019), 22: 1-10.
<https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2018-0348>
- [13] Tillmann, W.; Ulitzka, T.; Dahl L.; Wojarski, L.; Ulitzka, H.; Koymatli, M.: „Application of nickel plating by galvanization on steel surface of brazed cemented carbide-maraging steel joints“, Welding in the world, Bd. 67, Nr. 5, S. 1313–1324, 2023, <https://doi.org/10.1007/s40194-022-01461-8>.