

Hochtemperaturlöten in Einkammer-Vakuumöfen

von **Björn Eric Zieger**

Für die Fertigung diverser Produkte hat sich das Vakuumlöten im Chargenbetrieb gegenüber den konventionellen Fügeverfahren durchgesetzt. Auch bei der Großserienfertigung von kupfergelöteten Plattenwärmetauschern wird das Vakuumverfahren eingesetzt. Der dichtgepackte Chargenaufbau hat hohe Ansprüche an die Ofenanlagentechnik um ein Höchstmaß an Produktivität, Reproduzierbarkeit und Effizienz zu erzielen.

High temperature brazing in single chamber vacuum furnaces

Compared to conventional soldering techniques the batch type vacuum brazing has established for various products. Also for the mass production of copper brazed plate heat exchangers the vacuum process is used. The compacted load assembly has highest demands on the furnace technology to achieve maximum reproducibility and efficiency.

Die DIN 8505 beschreibt das Löten als ein thermisches Verfahren zum stoffschlüssigen Fügen und Beschichten von Werkstoffen, wobei eine flüssige Phase durch Schmelzen eines Lotes (Schmelzlöten) oder durch Diffusion an den Grenzflächen (Diffusionslöten) entsteht. Die Solidustemperatur der Grundwerkstoffe wird nicht erreicht. Beim konventionellen Löten wird das flüssige Lötgut durch Wärmeabfuhr unterkühlt und es erfolgt eine thermische Erstarrung (Bindung) [1].

VAKUURLÖTEN

Im Gegensatz zum konventionellen Löten wird beim Vakuumlöten die Arbeitstemperatur solange gehalten, bis durch Diffusion zwischen Grundwerkstoff und flüssigem Lot das Lotgut bei Löttemperatur erstarrt. Das Hochtemperatur-Vakuumlöten hat sich für das Fügen hochbeanspruchter Konstruktionen aus unterschiedlichsten Materialien bestens bewährt. Typische Großserienbauteile, die in der Inhouse-Fertigung vakuumgelötet werden, sind Heißgasturbinen für den Luft- und Raumfahrt- sowie auch stationären Einsatz, temperierte Werkzeuge (Plastic Moulds) und Plattenwärmetauscher. Dienstleister, wie zum Beispiel der Bodycote Standort Menden, welcher etwa zehn Vakuumlötanlagen in unterschiedlichen Ofengrößen und Konfigurationen

betreibt und zu Europas größten Lohnlöttern zählt, reagieren flexibel auf die unterschiedlichen Bauteilanforderungen der Anwender.

Durch die gleichmäßige Wärmeführung im Ofen werden Verformungen der Werkstücke und Wärmespannungen minimiert. Eine Regenerierung der Grundwerkstoffeigenschaften durch geeignete Wärmevor- und -nachbehandlung lassen sich ebenfalls durchführen (Spannungsarmglühen oder Ausscheidungsglühen). Auch das kombinierte Löt-Härten, bei dem die Überdruckgasabschreckung direkt nach Erstarren des Lotes erfolgt und somit ein Aufheizprozess entfällt, hat sich etabliert.

Vorteil des Vakuumhochtemperaturlötens ist, dass durch die Vakuumatmosphäre und dem Einsatz von Inertgas die Oxidation an den Fügestellen verringert werden kann und hierdurch engere Lötspalten vorgesehen werden können. Enge Lötspalte sind erforderlich, um eine hohe Festigkeit der Verbindungen zu erreichen, was bei der Herstellung von hoch beanspruchten Teilen wichtig ist [2].

LOTE

Mit dem Beginn intensiver Arbeiten auf dem Gebiet der Luft- und Raumfahrt wurde die Forderung der Industrie nach hochfesten und oxidationsbeständigen Lötverbindungen



Bild 1: Einkammer-Vakuumofen zum Löten von Plattenwärmetauschern

dungen immer stärker, insbesondere für Verbindungen mit unterschiedlichen Werkstoffen. Zu Anfang erfüllten die Gold-Basis-Lote die Forderungen der Konstrukteure, da sie die nötige Festigkeit, Zähigkeit und Heißgaskorrosionsbeständigkeit gewährleisten. Durch die hohen Kosten der Gold-Basis-Lote wurden diese mehr und mehr durch die Nickel- und Kupfer-Basis-Lote verdrängt, die bei ähnlichen Eigenschaften um ein vielfaches kostengünstiger sind. Darüber hinaus wurden weitere Lote entwickelt und hergestellt, die den unterschiedlichsten Konstruktionen, Lötverbindungen und Anwendungen gerecht werden müssen. Lote können als Formteil, Folie, Paste oder Pulver eingesetzt werden.

EINKAMMER-VAKUUMÖFEN

Allgemeiner Aufbau

Der Einkammer-Vakuumofen (**Bild 1**) ist elektrisch beheizt und nach dem System der kalten Wand – also mit doppelwandigem wassergekühltem Ofenkessel – aufgebaut. Thermische Leerverluste des Ofenarbeitsbereiches werden an das Kühlwasser im Doppelmantel des Ofengehäuses abgeleitet. Das zumeist zylindrische Außengehäuse ist horizontal oder vertikal aufgebaut.

Im Ofengehäuse befinden sich die Heizkammer mit Isolationsauskleidung und Heizungselementen sowie der Gas/Wasser-Wärmetauscher der Schnellkühlereinrichtung. Das Hochleistungsradialgebläse mit Elektromotor ist in der Regel ebenfalls innerhalb des Rezipienten installiert.

Außerhalb des Ofens sind die Vakuumpumpen, der Heizungstransformator und der Schaltschrank installiert [3].

Vakuumausrüstung

Ein erfolgreicher Lötprozess erfordert eine saubere benetzungsfähige Oberfläche. Die Lötstelle muss frei von Oxiden, Fett und Schmutz sein. Der Selbstreinigungseffekt im Vakuum-Lötofen entsteht durch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Oxide und des Metalls. Hiermit wird ein Aufreißen der Oxidhaut bewirkt und dem Lot das Benetzen des Metalls durch Unterwandern der Oxidhaut ermöglicht. Grund- und Lotwerkstoff bestimmen den hierfür erforderlichen Vakuumbereich.

Viele Kupferlötprozesse finden unter Feinvakuumatmosphäre statt. Häufig wird dabei zunächst ein Grobvakuum (Bereich 1.000 - 1 mbar) mit einer Drehschieberpumpe erzeugt, das Feinvakuum (Bereich 1 - 10⁻² mbar) wird dann mit einer Wälzkolbenpumpe erzielt.

Bei Lötprozessen mit z. B. Lotwerkstoffen auf Ni-Basis ist häufig auch ein Hochvakuum (Bereich 10⁻³ - 10⁻⁶ mbar) notwendig. Um solche höhere Vakua zu erzielen, können mehrstufige mechanische Pumpenstände oder Hochvakuum-pumpen eingesetzt werden, wie zum Beispiel Diffusionspumpen, Turbopumpen und Kryopumpen.

Heizkammer

Die Erwärmung in Vakuum-Ofenanlagen erfolgt über Heizungssysteme die mit niedriger Spannung und hohen Strömen betrieben werden. Wichtig bei der Beheizung im Vakuumofen ist die gleichmäßige Erwärmung der Charge, um trotz der gewünschten kürzest möglichen Aufheizsequenzen ein Überhitzen oder Überzeiten der zu lötenden Bauteile zu vermeiden. In der Praxis haben sich heute für die meisten Prozesse standardmäßig einzonige Heizungen durchgesetzt. Für besondere Anwendungsfälle werden auch mehrzonige Heizungen ausgeführt. Dies können neben einer Tür- und Rückwandheizung auch Mittenheizungen oder die Kombination aus beidem sein.

Die Heizkammern vieler Vakuumöfen für die Wärmebehandlung sind mit einer Graphitisolation ausgekleidet. Die Heizkammern können rechteckig oder rund ausgeführt sein. Bei speziellen Anwendungen mit Forderung einer kohlenwasserstofffreien Atmosphäre oder Forderungen sehr hoher Vakua werden auch Heizkammern mit ganzmetallischer Isolation eingesetzt. Bei diesen Heizeinsätzen werden als Isolation mehrere, hintereinanderliegende Strahlschilde aus Molybdän und / oder hitzebeständigen Werkstoffen eingesetzt. Die Höhe der Anwendungstemperatur bestimmt die Anzahl an Strahlschilden und deren Werkstoff. Auch diese Heizkammern können wahlweise rechteckig oder rund ausgeführt sein.

Schnellkühlsystem

Bei der Hochdruckgasabschreckung wird die Ofenanlage mit Schutzgas (in der Regel Stickstoff oder Argon) auf einen vorwählbaren Druck geflutet. Eine Kühlventilatoreinheit,

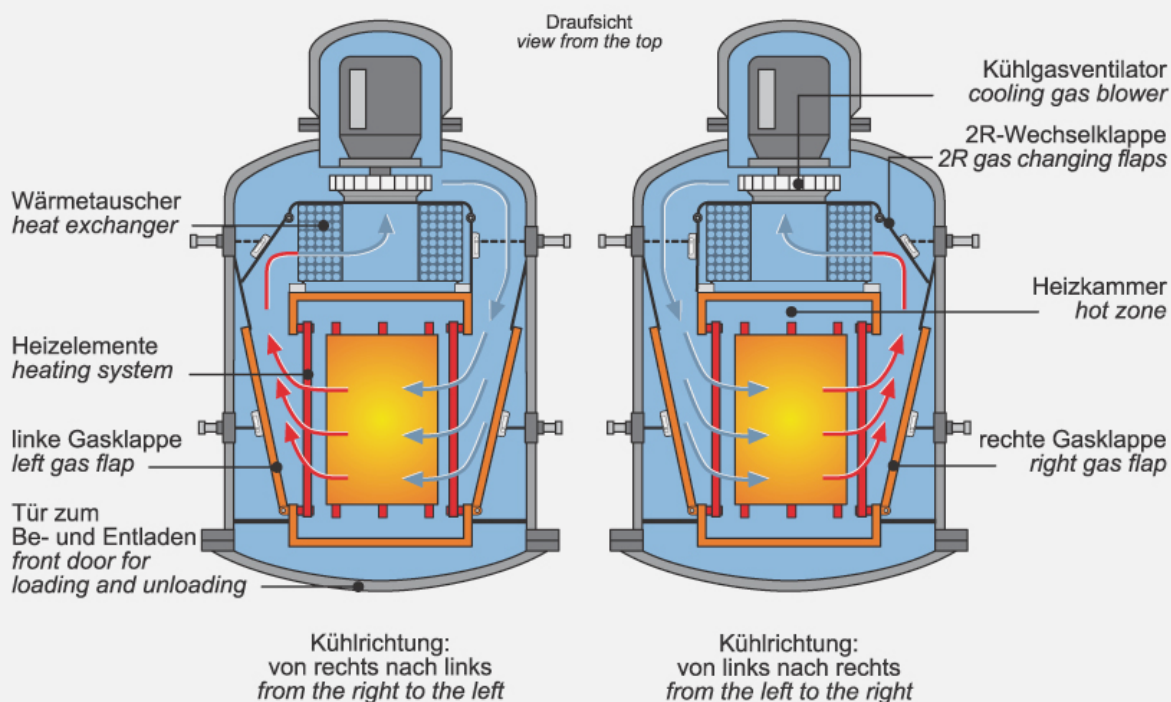


Bild 2: Prinzipbild Wechselseitig horizontale Kühlgasdurchströmung bei einem Einkammer-Vakuumofen

bestehend aus einem Drehstrommotor und einem Ventilatorrad, bewegt einen Kühlgasstrom, der die komplette Charge durch geöffnete Heizraumklappen oder Düsen durchströmt. Hierbei wird die Wärmeenergie der Charge aufgenommen und über das Schutzgas an einen Gas-Wasser-Wärmetauscher in der Vakuumofenanlage abgeführt [4].

Für einen Großteil der typischen Vakuumofen-Lötprozesse hat sich das Durchströmprinzip mit Richtungswechsel durchgesetzt. Für eine hohe Kühlgleichmäßigkeit sind große, in ihrer Abmessung der Charge entsprechende Gasein- und Gasaustrittsöffnungen erforderlich. Diese Gasein- und Gasaustrittsöffnungen sind mit speziellen Gasverteiler- oder Düsenelementen ausgestattet.

Die Homogenität der Gasabschreckung kann mit programmierbaren vertikalen und/oder horizontalen Kühlgasrichtungswchseln erhöht werden. Wechselseitig horizontale Kühlgasdurchströmung (**Bild 2**) wird typischerweise z. B. bei der Abkühlung von Platten-Wärmetauscher-Chargen eingesetzt. Hiermit wird ein schnellstmögliches und gleichmäßiges Erkalten der kompletten Charge in allen Bereichen realisiert.

Der Gasrichtungswechsel kann zeit- oder temperaturgesteuert durchgeführt werden, entsprechend den Anforderungen des Lötgutes. Bei temperaturgesteuertem Gasrichtungswechsel kann z. B. über eine programmierbare, an Chargenthermoelementen gemessene Istwert-Temperaturdifferenz kontrolliert werden.

VAKUMLÖTEN VON PLATTENWÄRMETAUSCHERN

Kupfergelötete Wärmetauscher

Kupfergelötete Plattenwärmetauscher (**Bild 3**) bestehen aus mehreren Edelstahlplatten, die mittels Kupferlot zu einer Einheit verlötet werden. Das Plattenpaket mit zwei Endplatten und Anschlüssen bietet einen dauerhaft abgedichteten Wärmetauscher. Der leistungsstarke, kompakte Plattenwärmetauscher bietet eine äußerst hohe Wärmeübertragung bei Temperaturen von minus 180 °C bis plus 200 °C und Betriebsdrücken bis ca. 35 bar. Typische Einsatzfelder sind z.B.:

- Erwärmen und Kühlen reiner Flüssigkeiten
- Verdampfer- und Kondensator-Stationen
- Fernwärme- und Belüftungssysteme
- Solarheizungs- und Klimasysteme
- Wärmepumpen und Wärmerückgewinnungsanlagen.

Prozessführung Vakuumlöten

Der Grundwerkstoff Cr Ni-Stahl wird mit dem Lotwerkstoff Kupfer gefügt. Der typische Prozessverlauf (**Bild 4**) gestaltet sich wie folgt:

- Evakuieren des Vakuum-Kammerofens
- Aufheizen auf Durchwärmtemperatur (ca. 30°C unter Soliduspunkt des Lotes)
- Verharren zur Durchwärmung der kompletten Charge



Bild 3: Kupfergelötete Plattenwärmetauscher, Fabrikat Fa. Sondex

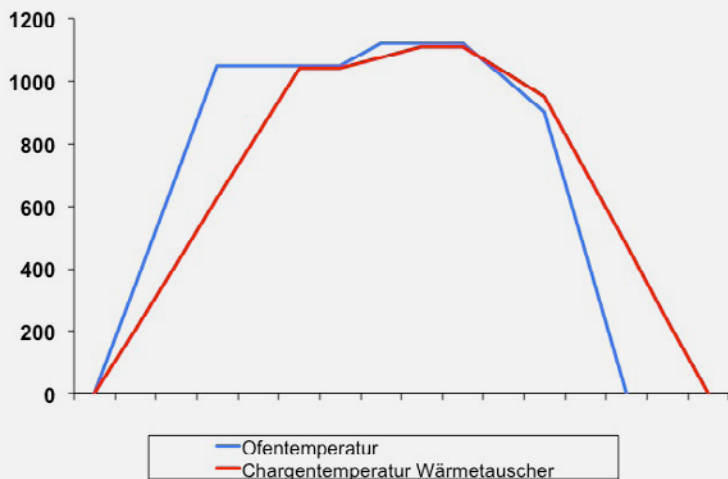


Bild 4: Prinzip Prozessführung Löten von Plattenwärmetauschern

- Aufheizen auf Löttemperatur 1.120 °C
- Verharren zum Erreichen der Löttemperatur in allen Bereichen der Charge
- Vakuumkühlung auf Temperatur unter Soliduspunkt
- Schnellkühlung bis zur Entnahmetemperatur mit Überdruck-Gasdurchströmung.

Evakuieren des Vakuum-Kammerofens

Der Prozess Löten von Wärmetauschern mit Kupferlot findet unter einer Feinvakuumatmosphäre statt. Nach Einbringung

der Charge (Bild 5) wird dabei der gesamte Ofenrezipient mit einer Drehschieberpumpe und einer Wälzkolbenpumpe in den Feinvakuumbereich (ca. 10⁻² mbar-Bereich) evakuiert.

Aufheizen auf Durchwärmtemperatur

Das Aufheizen der kompletten Charge erfolgt in der Regel unter Strahlung. Da der gesamte Chargenaufbau sehr kompakt angeordnet ist, muss für eine gleichmäßige Erwärmung, die Wärmestrahlung von allen Seiten auf die Charge treffen. Die Strahlungserwärmung wirkt immer von dem im äußeren Bereich der Charge zu den in der Mitte der Charge angeordneten Bauteilen und von der Oberfläche zum Kern des einzelnen Wärmetauschers.

Mithilfe von Bauteilthermoelementen kann beim Vakuumlöten ein absolut reproduzierbarer sicherer Prozessverlauf realisiert werden. Der Programmgeber regelt dabei den Prozessverlauf mit Hilfe eines Heizungsthermoelementes und einem oder mehreren Chargenthermoelementen. Das Heizungsthermoelement ist unmittelbar an den Heizstäben positioniert. Chargenthermoelemente können überall in der Charge angeordnet werden.

Aufheizen auf Löttemperatur

Sobald das Thermoelement im Chargenkern das Erreichen der Durchwärmtemperatur signalisiert, also der vollständige Ausgleich der kompletten Charge auf einer Temperatur knapp unter Soliduspunkt des Lotes erfolgt ist, wird vollautomatisch und gleichmäßig auf Löttemperatur geheizt.

Obwohl nur eine relativ geringe Temperaturdifferenz von Durchwärm- auf Löttemperatur zu überwinden ist, wird auch hierbei der äußere Bereich der Charge / des Wärmetauschers zu einem früheren Zeitpunkt die Löttemperatur erreichen als der Kernbereich. Das Chargenthermoelement signalisiert auch in diesem Fall umgehend den vollständigen Temperatenausgleich. Die effektive Haltezeit kann dabei zugunsten von Gefügeeigenschaften des Grundmaterials, möglichen Ausdampfungen und wirtschaftlichster Prozesszeit, auf eine möglichst kurze Zeit reduziert werden.

Vakuumkühlung

Der Lotwerkstoff Kupfer stellt sich mit seinem Schmelzpunkt 1.083 °C in der Lötphase in flüssiger Form dar. Die Chargentemperatur wird mittels Vakuumkühlung auf eine Temperatur unterhalb des Soliduspunktes des Lotes abgesenkt. Die Wärmeenergie wird dabei durch die geschlossene Heizkammer sehr langsam an die kalte Ofenwand – die Innenseite des wassergekühlten, doppelmanteligen Rezipienten – abgegeben. Durch die gezielte, langsame Abkühlung werden unerwünschte Bewegungen des noch flüssigen Lotes und auch Verzüge an den Plattenwärmetauschern vermieden. Dieser Vakuumkühlprozess darf ab einer gewissen Temperatur mittels spezieller Anlagenaus-

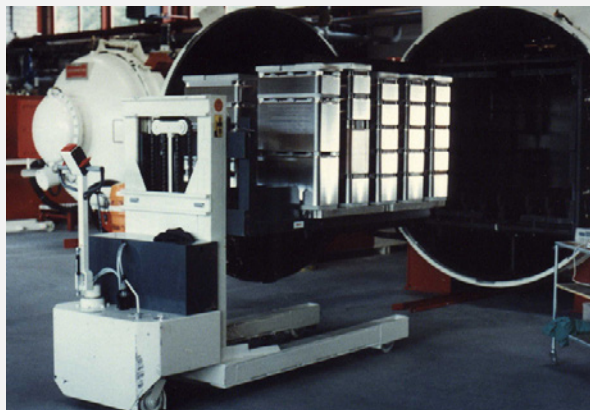


Bild 5: Beschickung eines Einkammer-Vakuuofens mit einer Charge Plattenwärmetauscher



Bild 6: Charge Plattenwärmetauscher

führung moderat forciert werden um diese Prozesssequenz zu verkürzen.

Schnellkühlung

Ist sichergestellt, dass die vorgewählte Temperatur unterhalb des Soliduspunktes des Lotes erreicht worden ist – hat das Lot also an allen Positionen sämtlicher Wärmetauscher die feste Phase angenommen – dann kann bis zur Entnahmetemperatur mit Überdruckgaskühlung in einer kürzeren, wirtschaftlicheren Zeit gekühlt werden. Hierzu wird die Ofenanlage mit dem Prozessgas Stickstoff in der Praxis meist auf einen Druck von 1,5 bar (abs.) geflutet. Die Kühlventilatoreinheit erzeugt einen Kühlgasstrom, der die Wärmeenergie der Charge durch die seitlich geöffneten Heizraumklappen an den Wärmetauscher abführt. Um Verfärbungen zu vermeiden, sollte die komplette Charge vor Ofenentnahme eine Temperatur von $< 150\text{ °C}$ erreicht haben. In der Regel wird aus Gründen des Arbeitsschutzes sogar eine Entnahmetemperatur von $< 60\text{ °C}$ angestrebt.

Bei den etablierten Plattenwärmetauscher-Herstellern werden meist Vakuuammeröfen mit dem horizontalem Kühlgasrichtungswechselsystem eingesetzt. Bei dem getürmten Chargenaufbau (**Bild 6**) auf einer massiven Grundplatte wird mit oben aufliegenden Ballastbeschwerden eine notwendige Pressung der Plattenwärmetauscher erzeugt. Mit der horizontalen Gasdurchströmung wird hierbei ein erheblich höherer und gleichmäßiger Wärmeabtransport gegenüber vertikaler Gasdurchströmung realisiert. Mit einem entsprechenden Kühlrichtungswechselsystem kann die Gasstromrichtung zeit- oder temperaturgesteuert geändert werden. Auch hierdurch erfolgt die Kühlung der Charge nochmals gleichmäßiger. Gegenüber einer vertikalen Gasanströmung aus nur einer Richtung kann die Abkühlzeit der Charge bis zum Erreichen der Entnahmetemperatur an allen Positionen der Großseriencharge signifikant verkürzt werden.

FAZIT

Das Hochtemperaturlöten im Einkammer-Vakuuofen hat seine feste Position bei den Fügeverfahren. Zugunsten eines Höchstmaßes an Produktivität, Reproduzierbarkeit und Effizienz ist die Anlagenkonfiguration an die jeweilige Lötapplikation anzupassen. Beim Großserienlöten von Plattenwärmetauschern hat sich der Vakuuofen mit eckiger, graphitisolierter Heizkammer und wechselseitig horizontaler Kühlgasdurchströmung behauptet.

LITERATUR

- [1] Media Hartlöten-Eine Einführung, 1. Auflage, DVS Media 2010 S. 9
- [2] Zieger, B.: Vakuu-Löten. In: 1. Aufl., Praxishandbuch Thermoprozesstechnik Band II, A. von Starck u. a. (Hrsg.), Vulkan-Verlag, Essen 2003, S. 251-253
- [3] Dallo, L.; Zieger, B.: Vakuu-Einkammerofen. In: 2. Aufl., Praxishandbuch Thermoprozesstechnik Band II, H. Pfeifer u. a. (Hrsg.), Vulkan-Verlag, Essen 2011, S. 391-415
- [4] Listemann, P.: Erfahrungen mit Vakuu-Anlagen für die Wärmebehandlung. HTM Haerterei-Techn. Mitt. 43 (1988) 5, S. 304-310

AUTOR



Dipl.-Ing. **Björn Eric Zieger**
 IVA Schmetz GmbH
 Menden
 Tel.: 02373 / 686-184
 bjoern.zieger@tenova.com