

Hochtemperatur-Wärmebehandlung von Bändern aus Kupferlegierungen im Durchlauf

Berrenberg, T.; Hansen, M. (1)

Für die Wärmebehandlung von Bändern aus Kupferlegierungen im Durchlauf haben sich Anlagen mit schwebender Bandführung als Standard etabliert [1]. Diese Anlagen arbeiten üblicherweise mit einem Wasserstoff-/Stickstoffgemisch als Schutzgas, wobei der Wasserstoffanteil auf 5 Vol% begrenzt bleibt, um die zum Betrieb von Anlagen mit brennbarem Schutzgas erforderliche aufwändige Sicherheitstechnik zu vermeiden. Dank günstigerer Konstruktion, verbesserter Hochtemperaturventilatorentechnik und insbesondere einem neuen, im Hinblick auf die Stabilisierung dünner Bänder verbesserten Düsensystem können diese Anlagen inzwischen bis zu Temperaturen von ca. 850 °C problemlos betrieben werden. Dabei liegt die maximale Dicke der zu glühenden Bänder je nach Bauart der Schwebedüsen bei ca. 0,05 mm bis 3 mm.

Zum Betrieb von Wärmebehandlungsanlagen mit höherem Wasserstoffanteil sind alternative Anlagenkonzepte erforderlich. Zwei in der Praxis bewährte Anlagenkonzepte werden im Folgenden gegenübergestellt.

Schutzgas mit höherem Wasserstoffanteil

Neue metallurgische Entwicklungen, insbesondere bei niedrig legierten Hochleistungs-Kupferlegierungen, verlangen jedoch sowohl höhere Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeiten als auch höhere erreichbare Materialtemperaturen. Dies gilt insbesondere für das Lösungsglügen von ausscheidungshärtbaren Legierungen wie z.B. für CuNiSi-Legierungen [2]. Außerdem hat sich herausgestellt, dass ein höherer Wasserstoffanteil als 5% prozesstechnisch vorteilhaft ist. Durch den höheren Wasserstoffanteil steigt bedingt durch die thermophysikalischen Eigenschaften von Wasserstoff auch die Anlagenleistung, weil sich die konvektive Wärme-

übertragung erhöht. Dies zeigt Bild 1. In dem Diagramm ist für gleiche Düsenaustrittsgeschwindigkeit das Verhältnis des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten in reinem Stickstoff zu dem in einem Wasserstoff/Stickstoffgemisch in Abhängigkeit von der Gastemperatur dargestellt. Man erkennt, dass sich beispielsweise für eine Schutzgasmischung mit 25% Wasserstoffanteil eine Erhöhung

des konvektiven Wärmeübergangs um den Faktor 1,4 gegenüber Stickstoff ergibt. Wollte man diese Steigerung mit üblichem Schutzgas nur durch Erhöhung der Düsenaustrittsgeschwindigkeit erreichen, so wäre eine Geschwindigkeitserhöhung um ca. 60% erforderlich. Um dies zu erreichen, muss jedoch auch die Ventilatorumfangsgeschwindigkeit um 60% angehoben werden, was mit üblichen Heißgasventilatoren bei akzeptablen Ventilatorstandzeiten nicht möglich ist.

Bei der Auswahl eines Anlagenkonzepts ist außerdem zu beachten, dass die Tragkraft bedingt durch die geringe Dichte von Wasserstoff bei schwebender Bandführung erheblich eingeschränkt ist.

Das Diagramm in Bild 2 zeigt für Lösungsglühbetrieb von Cu-Banden Zusammenhang zwischen maximaler Banddicke, die noch schwebend zu führen ist, und Schutzgastemperatur für konventionelles Schutzgas und Schutzgas mit 25% H₂. Das Diagramm bezieht sich auf ein Düsen-

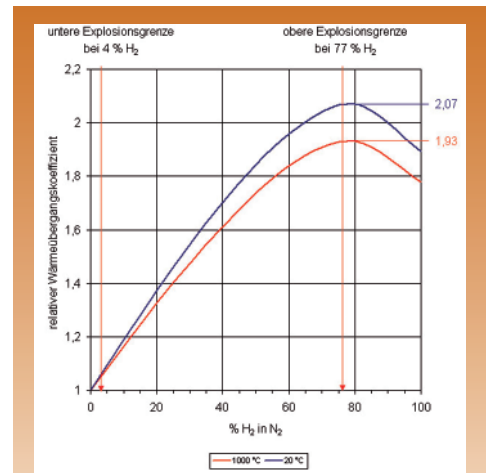


Bild 1: Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient für N₂/H₂-Gemisch in Relation zu reinem N₂ für gleiche Strömungsgeschwindigkeit

alternativen - diese liegen beim Lösungsglügen bei 800 °C und höher und entsprechend weichem Material - ausgezeichnete Bandplanität nach dem Glühen ergibt. Soll daher bei höherem Wasserstoffanteil und noch höheren Temperaturen gegläht werden, so sind andere Ofenkonzepte erforderlich.

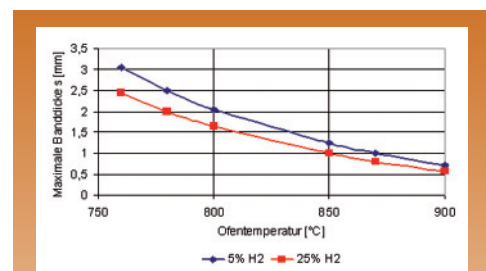


Bild 2: Grenze der Cu-Banddicke für das Lösungsglügen im Bandschweißofen, abhängig von Schutzgastemperatur und -zusammensetzung (Die temperaturbedingte Abnahme der höchst zulässigen Umfangsgeschwindigkeit der Hochtemperaturventilatoren ist berücksichtigt.)

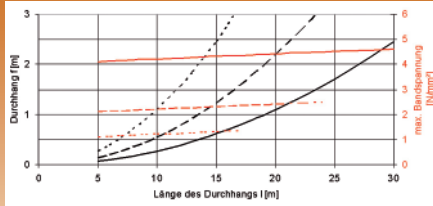


Bild 3: Durchhang und Spannung im Cu-Band in Abhängigkeit von der Spannweite der Kettenlinie

Vertikalofen oder Horizontalofen

Die nächstliegende Lösung ist ein Vertikalofen mit hängender Muffel, wie er aus der Anfangszeit der Durchlaufglühung von Kupferband bekannt und im Bereich der Edelstahlbandglühung bestens bewährt ist [3]. Die Muffel ist dabei von Vorteil, da die erforderliche Wärmeisolierung, es handelt sich zumeist um Keramikfaserisolierung mit hohem Siliziumoxid-Anteil, nicht direkt der Wasserstoffatmosphäre bei hohen Temperaturen ausgesetzt ist. Folglich werden die Probleme vermieden, die sich durch die Reduktion von SiO_2 unter Wasserstoff und bei hohen Temperaturen zu gasförmigem SiO ergeben.

Im Gegensatz zu Blankglühanlagen für Edelstahlbänder [4] haben jedoch Blankglühanlagen mit vertikaler Muffel für Bänder aus Kupferlegierungen gravierende Nachteile.

- Gegenüber Edelstahlbändern haben Bänder aus Cu-Legierungen bei hohen Temperaturen eine wesentlich geringere Festigkeit. Die Bandspannung im Wärmebehandlungsteil sollte 1 N/mm^2 nicht überschreiten.
- Die Emissivität von Cu-Legierungen ist mit 0,03% bis 0,05% gegenüber Edelstahl mit mehr als 0,4% wesentlich geringer. Folglich ist die mittels Strahlung erzielbare Wärmestromdichte zur Erwärmung von Cu-Legierungen gegenüber Edelstahl wesentlich geringer. Daraus resultieren kleinere Aufheizraten und die Durchsatzleistung ist eingeschränkt.

Die Erwärmungsleistung kann sinnvoll nur durch zusätzliche, intensive konvektive Erwärmung gesteigert werden.

- Die in der Regel runde Muffel bietet wenig Platz für eine hochkonvektive Erwärmung. Ventilatoren lassen sich nicht in die Muffel einbauen, da deren Achse gegenüber dem Außengehäuse fix sein muss, die Muffel sich aber in Hängerrichtung bei der Erwärmung erheblich ausdehnt.
- Dünne Bänder, die den Hauptanteil im Produktionsspektrum beim Durchlaufglühen von Cu-Bändern darstellen, bilden beim Hängen häufig Längsfalten, die durch eine nicht gleichmäßige Spannungsverteilung verursacht werden. Im Extremfall können sich die Bänder verdrehen. Die Kräfte, die im Wasserstoffbetrieb durch Beblasung auf das Band wirken, sind zur Stabilisierung des Bandes unzureichend, da der Impuls der auftreffenden Schutzgasströmung wegen der kleinen Dichte des Wasserstoffs gering ist.
- Bei einem Vertikalofen besteht die Gefahr eines Bandrisses als Folge eines plötzlichen Bandstopps. Verursacht wird der Bandriss dadurch, dass sich das gesamte im Ofen befindliche Band bis zum Ofeneintritt auf hohe Temperaturen erwärmt und die in Richtung Ofeneintritt zunehmende Bandspannung im oberen Bereich des Ofens die zulässige Bandspannung übersteigt. Im Normalbetrieb bei fahrendem Band wäre das Band hier noch kälter und damit belastbarer. Die Bandrissgefahr wird noch gesteigert, wenn das Band bzw. die Folie Vorschädigungen im Kantenbereich aufweist. Außerdem muss die Bandführung im vertikalen Teil eine mögliche Verkürzung des Bandes als Folge eines plötzlichen Bandstopps und der damit verbundenen raschen Abkühlung des Bandes in der

Kühlzone zugneutral kompensieren können.

- Im Fall eines Bandrisses im Heizteil fällt das gesamte Band in den Kühlteil. Das anfangs heiße Band deformiert und verfestigt sich dort und kann nur mit erheblichem Aufwand aus dem Kühlteil entfernt werden.
- Schließlich ist noch die Abdichtung am oberen Bandeintritt problematisch, da an der höchsten Stelle des Erwärmungsteils wie in einem Heißluftballon der Überdruck gegenüber der kalten Umgebung am größten ist.

All diese Gründe waren der Anlass, eine zum Glühen von Cu-Legierungsbändern in Schutzgasatmosphäre mit hohem Wasserstoffanteil günstigere Alternative zu entwickeln. Diese besteht in einem Wärmebehandlungsteil, in dem das Band in einer Kettenlinie mit großem Durchhang geführt wird.

Der Vorteil der Kettenlinie besteht darin, dass die Bandspannung über die gesamte Kettenlinie relativ konstant ist und nur von der Größe des Durchhangs bestimmt wird. Dieser wird berührungslos mit einem robusten Sensor, z. B. in bereits kalter Umgebung am Eintritt in die Kühlzone, gemessen und über die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen ein- und auslaufseitigem Bandantrieb geregelt. Die Bandspannung erreicht in der Mitte zwischen den beiden Umlenkrollen, also in dem Bereich, in dem das Band die höchsten Temperaturen erreicht, den niedrigsten Wert und an den Umlenkrollen den größten (ca. 20% bis 30% größer). Der Bandzug an der austrittseitigen Umlenkrolle ist vollkommen ausreichend, um diese als Bandmittensteuerung auszuführen und das Band zu zentrieren. Eine aufwändige Tänzerrolle, die zur Regelung des insbesondere bei sehr dünnen Bändern kleinen Bandzugs geeignet sein muss, ist nicht erforderlich. Ein gleichmäßiger Zug von 1 N/mm^2 in der Mitte des Durchhangs ist ohne Schwierigkeiten bei einer maximalen Abweichung von $\pm 0,1 \text{ N/mm}^2$ zu erreichen. Im Diagramm Bild 3

sind, abhängig von der Spannweite der Kettenlinie und für verschiedene Bandzüge, die das heiße Cu-Band nicht übersteigen soll, die Durchhänge aufgetragen.

Ein Hauptvorteil des Horizontalofens gegenüber dem Vertikalofen besteht darin, dass selbst sehr dünne Bänder durch die erhebliche Krümmung der Kettenlinie bei großem Durchhang wirksam stabilisiert werden, wobei die Schwerkraftwirkung ein Verdrehen ausschließt. Eine Bildung von Längsfalten oder eine Wölbung in Querrichtung ist ausgeschlossen.

Da der Platz für Einbauten beim Horizontalofen nicht auf die Muffel beschränkt ist, kann die Erwärmung des Bandes neben der Strahlungserwärmung effizient durch Hochkonvektion, d.h. der Kapazitätsstrom von umgewälztem Gas $\dot{m}_{\text{Gas}} \cdot c_p \cdot \text{Gas}$ ist mehr als 20mal so groß wie der Kapazitätsstrom $\dot{m}_{\text{Band}} \cdot c_p \cdot \text{Band}$ des durchgesetzten Bandes, erfolgen. Dies steigert die Leistungsfähigkeit und die Gleichmäßigkeit der Erwärmung. Sollte aufgrund von Bandkantenbeschädigung oder fehlerhafter Bandverbindung trotzdem ein Bandriss im Ofen auftreten, legen sich die Bandteile auf den unterhalb des Bandes befindlichen, entsprechend gestalteten Düsenystemen, Bild 4, ab und können problemlos aus der Anlage herausgezogen werden. Auch das Bändeinziehen mittels Einzugsband oder Einzugsseil ist ähnlich einfach wie bei einem Horizontalofen.



Bild 4: Düsenystem in einem Durchhangofen für Cu-Band und höhere Temperaturen. Man erkennt das zur Düsenfeldmitte hin verschobene Einzugsband.

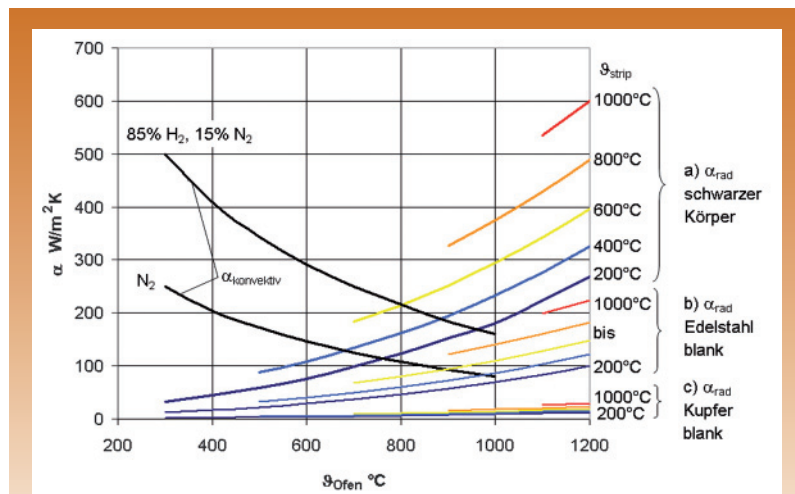


Bild 5: Wärmeübertragung durch erzwungene Konvektion im Vergleich zur Wärmeübertragung durch Strahlung

Ein weiterer großer Vorteil ist, dass ein Bandstopp und die damit verbundene erhebliche Bandverkürzung in der Kühlzone unkritisch ist, weil die Kettenlinie sowohl erhebliche Bandlängenverkürzung als auch eine Bandverlängerung problemlos gestattet.

Schließlich ist noch von Vorteil, dass Bändeintritt und Bändeaustritt jeweils im vertikalen Bandlauf vor und hinter der Umlenkung in die Kettenlinie angeordnet sind, in der gleichen Horizontalebene liegen und den tiefsten Punkt des Ofens bilden. So entsteht für das Schutzgas eine Art „Taucherglocke“, die besonders für Wasserstoffbetrieb - die Dichte von Wasserstoff beträgt schon bei Raumtemperatur nur 1/14 der Dichte von Umgebungsluft - sehr vorteilhaft ist.

Nicht unwesentlich für den Anlagenbetreiber ist auch, dass die Anlage keinen aufwändigen Gebäudeturm mit Turmkran, Aufzug, etc. erfordert, sondern in einer üblichen Industriehalle aufgestellt werden. Auch Wartungsarbeiten gestalten sich bei horizontaler Bauweise wesentlich einfacher.

Wärmeübertragung in Hochglühanlagen für Cu-Bänder

In Vertikalöfen mit Muffel erfolgt die Wärmeübertragung, abgesehen

von der sehr geringen natürlichen Konvektion, aufgrund des Temperaturunterschiedes zwischen Band und Band ausschließlich durch Strahlung der Muffelwand. Dabei spielt der Strahlungsaustauschfaktor

$$\varepsilon = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{Band}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{Muffel}}} - 1}$$

eine wesentliche Rolle. Dies verdeutlicht Bild 5. In dem Diagramm sind die Strahlungswärmeübergangskoeffizienten für den idealen Strahlungsaustausch zwischen schwarzen Körpern mit $\varepsilon_{\text{ges}} = 1$, für blankes Edelstahlband mit $\varepsilon_{\text{ges}} \text{ ca. } 0,45$ und für blankes Cu-Band $\varepsilon_{\text{ges}} = 0,05$ über der Ofentemperatur für verschiedene Bandtemperaturen aufgetragen. Der Wärmeübergangskoeffizient für Strahlungswärmeübertragung nimmt dabei gemäß

$$\alpha = \frac{(T_{\text{Ofen}}^4 - T_{\text{Band}}^4)}{T_{\text{Ofen}} - T_{\text{Band}}}$$

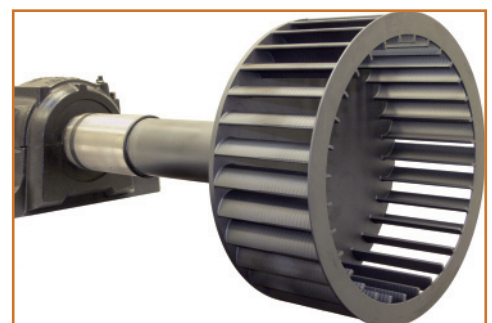


Bild 6: Ventilatorlaufrad aus SiSiC

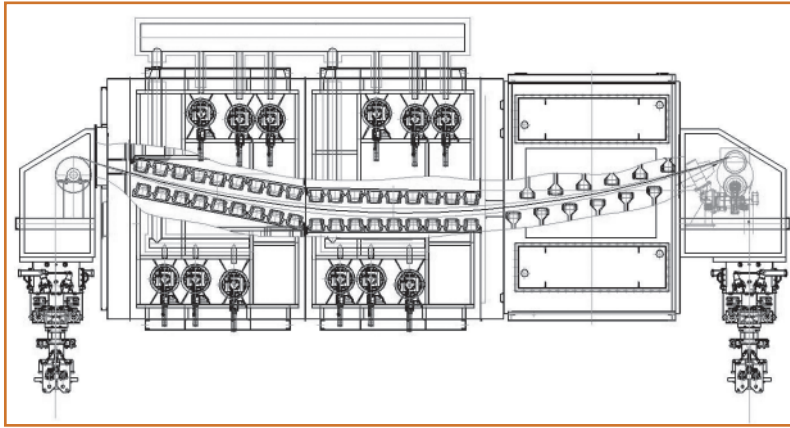


Bild 7: Schema einer Horizontalofenanlage

mit der Bandtemperatur zu. Zum Vergleich ist in dem Diagramm der mittels Hochkonvektionstechnik erzielbare konvektive Wärmeübergang sowohl für H₂-haltiges Schutzgas als auch für Stickstoff aufgetragen. Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient hängt nur von der Ofentemperatur ab.

Man erkennt, dass im Gegensatz zu Edelstahlbändern bei Kupferlegierungsbändern Hochkonvektion bis zu höchsten Temperaturen noch sinnvoll und vorteilhaft ist, auch wenn die Hochkonvektion durch die bei hohen Betriebstemperaturen stark abnehmende zulässige Umfangsgeschwindigkeit metallischer Heißgasventilatoren begrenzt ist. Um diese

Grenze zu durchbrechen, wird zur Zeit in einem gemeinsamen Entwicklungsvorhaben von WSP GmbH und den Firmen Schunk Ingenieurkeramik GmbH sowie WS Wärmeprozess-technik GmbH mit dem Institut für Werkstoffanwendungen im Maschinenbau (IWM) mit Förderung durch das BMWA (Förder-Nr 0327371A) ein Heißgasventilator aus SiSiC entwickelt. Bild 6 zeigt den ersten Prototyp, der zum Einsatz bei Temperaturen bis 1250 °C bei voller Umfangsgeschwindigkeit geeignet ist.

Anlagenausführung

Ein Horizontalofen zum Glühen von Bändern aus Cu und Cu-Legierungen

bei Temperaturen bis max. 1000 °C und unter Schutzgasatmosphäre mit bis zu 100% H₂ ist im Bild 7 dargestellt. Ein ähnlicher WSP-Ofen befindet sich seit ca. 4 Jahren im Produktionsbetrieb [5].

Literatur

- [1] Kramer, Thomas: Heat treatment plants for plate and sheet; in: Handbook of Thermoprocessing Technologies, Vulkan-Verlag, Essen 2005, S. 560 - 568
- [2] Kinder, Joachim; Fischer-Bühner, Jörg: Ausscheidungsuntersuchungen an höherfesten und hochleistungsfähigen CuNiSi-Legierungen; in: METALL 59. Jahrgang, 11/2005, S. 722 - 727
- [3] Tippe, Harald: Neuentwicklung einer kontinuierlichen HICON/H2, Blankglühlinie zum Wärmebehandeln von Buntmetallen; METALL 60. Jahrgang, 6/2006, S. 356 - 358
- [4] Ruiter, Leo: Continuous annealing furnaces for stainless steel strips; in: Handbook of Thermoprocessing Technologies, Vulkan-Verlag, Essen 2005, S. 471 - 477
- [5] Kramer, Carl: Continuous Heat Treatment of Cold Rolled Cu-Alloy Strips at Elevated Temperatures; in: IWCC Technical Seminar, Basel 18.10-21.10.2004

(1) *Dr.-Ing. Thomas Berrenberg, Leiter Thermoprozesstechnik; Dipl.-Ing. Martin Hansen, Leiter Bereich Bandanlagen, WSP GmbH*

