

Kontinuierliche Wärmebehandlung von Aluminiumband – Otto Junkers Abkühlstrategie für Automobilbleche

T. Mertens, G. Valder; Otto Junker GmbH

Der Aluminiumbedarf in der Automobilproduktion steigt. Europa, Japan, China und die USA streben die signifikante Reduktion des CO₂-Ausstoßes von Kraftfahrzeugen an. Zu realisieren ist die Herausforderung durch eine Kombination aus Effizienzsteigerung im Antriebsstrang, Verbesserungen in der Fahrzeugaerodynamik und durch die Reduktion des Fahrzeuggewichts [1]. Die Gewichtsreduktion begründet die Substitution von Stahl durch den erhöhten Einsatz von Aluminiumblech im Bereich der Fahrzeugkarosserie.

Mit dem wachsenden Markt hat die Otto Junker GmbH aus Simmerath bereits seit 2010 einen erheblichen Anteil ihrer F&E-Aktivitäten auf den Bandschwebeöfen mit angeschlossener Quench ausgerichtet. Durch die symbiotische Verknüpfung neuer Erkenntnisse mit gefestigten Erfahrungswerten ist die neue Generation der Otto Junker Bandschwebeanlage entstanden. Zwei Bandschwebeöfen mit angeschlossener Quench sind in Nordamerika angekommen. Während sich die zweite Linie in der Endphase der Inbetriebnahme befindet, hat die erste Linie die Produktion bereits aufgenommen. Das neue Düsenfeld des Ofens bewährt sich in den klassischen Kerndisziplinen Selbstzentrierung, Homogenität des Wärmetransports und der Bandstabilisierung mittels Sinuseffekt. Gleichzeitig konnte die benötigte Ofenlänge aufgrund des hohen Wärmeübergangskoeffizienten im Vergleich zum Wettbewerb um 20 Prozent reduziert werden. Die Außenansicht des Bandschwebeofens ist der aktuellen „Otto Junker News“ (Ausgabe 28) zu entnehmen.

Parallel zum weiterentwickelten Ofenkonzept hat Otto Junker eine neue Abkühlstrategie in den Markt eingeführt. Maßgeblich für die Qualität der Abkühlung ist neben der Genauigkeit die Spannweite, mit der der werkstoffspezifische Temperatur-Zeit-Verlauf im Material eingestellt werden kann. Die kritische (mindestens erforderliche) Abkühlgeschwindigkeit ist aus legierungsspezifischen Zeit-Temperatur-Ausscheidungs-Diagrammen (ZTA) abzuleiten, Tabelle 1.

Somit ist die Zielgröße bekannt: Für den typischen Banddickenbereich von 0,5 bis 5,0 mm sind Abkühlraten von 0,5 bis 300

Aluminium demand for automotive manufacturing is on the increase. Europe, Japan, China and the USA are targeting significant cuts in CO₂ emissions from motor vehicles. This challenge can be addressed via a combination of drive train efficiency improvements, enhanced vehicle aerodynamics, and a reduction in vehicle weight [1]. This weight saving drive is the rationale behind the growing use of aluminium sheet metal as a substitute for steel in auto bodywork.

In line with market growth, Otto Junker GmbH in Simmerath, Germany, has been focusing a major part of its R&D activities on strip flotation furnaces with attached quench since as far back as 2010. The new generation of Otto Junker strip processing lines is the result of innovative thinking combined with established technologies. Two strip flotation furnaces with attached quench have been delivered to North America. While the second of these plants is in the last stages of commissioning, the first one is already in production service. Its new furnace nozzle array system is fully proving its merits in the classical disciplines of automatic centring, heat transfer uniformity, and strip stabilization by the sine-wave effect. It was also possible to reduce the requisite furnace length by 20% compared to competitor designs thanks to the high heat transfer coefficient achieved. For an external view of the strip flotation

Continuous heat treatment of aluminium strip – Otto Junker's cooling strategy for automotive sheet metal

T. Mertens, G. Valder; Otto Junker GmbH

furnace see the current issue of 'Otto Junker News' (No. 28).

Concurrently with this improved furnace design, Otto Junker has launched a new cooling technology. Cooling quality depends, apart from accuracy, on the range in which the material-specific temperature / time curve can be set in the product. The critical (minimum required) cooling rate can be derived from alloy-specific time-temperature precipitation (TTP) diagrams, Table 1.

Hence, the target variable is known: for

Table 1: Critical cooling rates of key alloys given in the literature [2, 3]

Alloy	Critical quenching rate in K/s
EN AW-2042	100
EN AW-6060	1.0 (0.42 at 0.69% Mg ₂ Si)
EN AW-6063	1.7 at 0.74% Mg ₂ Si
EN AW-6005A	4.2 (6.25 at 0.9% Mg ₂ Si)
EN AW-6061	11.2
EN AW-6082	11.4 (16.7 at 0.96% resp. 133.3 at 1.65% Mg ₂ Si)
EN AW-7020	0.5
EN AW-7075	100
AA7020	3
AA7150	300

Tabelle 1: Literaturwerte kritischer Abkühlgeschwindigkeiten nach [2, 3]

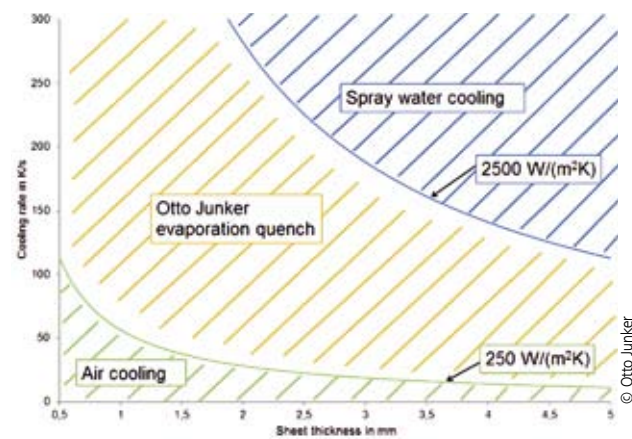


Fig. 1: Control ranges of air, evaporation and spray water cooling / Abb. 1: Regelbereiche der Luftkühlung, Nebelkühlung und Spritzwasserkühlung

the typical strip thickness range of 0.5 to 5.0 mm, cooling rates from 0.5 to 300 K/s are to be realized. However, the resulting range of heat transfer coefficients cannot be covered by air or water spray cooling alone, because only very high or very low cooling rates can be selected with these techniques. The quenching rate must be high enough to keep diffusion-controlled precipitation processes fully suppressed during cooling. If the rate is too high, flatness deviations will occur due to thermal stresses in the strip. These conflicting requirements can only be met by setting the actual cooling rate to a level just barely over the minimum required cooling rate. The requirements are to be summarized in the heat transfer coefficient. Fig. 1 shows the ranges of adjustable cooling rates over the sheet thickness.

Marked in green is the range of heat transfer coefficients achievable by air cooling. The blue curve shows the lower limit of spray water cooling. Between air and spray water cooling, there extends the range of hitherto unattainable heat transfer coefficients. However, this is the very range that is of relevance for the quenching system of a flotation-type strip treatment line. At a necessary cooling rate of, e.g., 200 K/s and a strip thickness of 1.2 mm, the operator would have to accept either strip deformation due to excessively fast cooling or suboptimal material characteristics because of too slow cooling. Otto Junker's evaporation quench addresses just this range.

Compared to conventional spray water cooling, the evaporation quench process affords systemic benefits. In spray water cooling, the water expands uncontrollably over the strip surface upon first coming into contact with the hot strip. With the evaporation quench, on the contrary, small droplets are added into the air stream airflow of the strip flotation system and will reach the strip surface via this route. The droplet-to-wall heat transfer takes place predominantly via evaporation enthalpy and only to a very low degree by convection. The achievable heat transfer coefficient is 2,500 W/(m²K). Related to the strip thickness, this heat transfer coefficient corresponds to a quenching rate of 600 K/(s mm). Following droplet-to-wall contact, the water vapours or non-evaporated droplet portions are entrained by the air stream. Their removal takes place in the return flow areas provided for this purpose between the nozzle boxes, in the cross-strip direction. The system supports a subdivision of the evaporation cooling zones into a large number of separately adjustable control zones.

To illustrate the resulting advantage, let us examine the basic mechanics of strip de-

formation. Der daraus resultierende Bereich abzudeckender Wärmeübergangskoeffizienten ist alleine durch den Einsatz der Luftkühlung oder der Spritzwasserkühlung nicht zu realisieren, da damit nur sehr hohe oder sehr niedrige Abkühlraten gewählt werden können. Die Abschreckgeschwindigkeit muss so hoch sein, dass diffusionsgesteuerte Ausscheidungs Vorgänge bei der Abkühlung vollständig unterdrückt werden. Ist die Abkühlrate zu hoch, entstehen Planheitsfehler aufgrund thermischer Spannungen im Band. Diese gegensätzlichen Anforderungen sind nur zu erfüllen, indem die tatsächliche Abkühlgeschwindigkeit nur geringfügig oberhalb der mindestens notwendigen Abkühlgeschwindigkeit einzustellen ist. Die Anforderungen sind im Wärmeübergangskoeffizienten zusammenzufassen. Abb. 1 stellt die Bereiche einstellbarer Abkühlraten über der Blechdicke dar.

Grün dargestellt ist der mittels Luftkühlung einstellbare Bereich der Wärmeübergangskoeffizienten. Die blaue Kurve zeigt die untere Grenze der Spritzwasserkühlung. Zwischen der Luftkühlung und der Spritzwasserkühlung ergibt sich der Bereich bisher nicht erreichbarer Wärmeübergangskoeffizienten. Jedoch ist genau dieser Bereich für die Abkühlrichtung einer Bandschwebelinie relevant. Bei einer notwendigen Abkühlrate von beispielsweise 200 K/s und 1,2 mm Banddicke müsste der Anlagenbetreiber Bandverformungen aufgrund zu schneller Abkühlung oder nicht optimale Werkstoffeigenschaften aufgrund einer zu geringen Abkühlgeschwindigkeit hinnehmen. Die Nebelquench von Otto Junker erschließt genau diesen Bereich.

Im Vergleich zur herkömmlichen Spritzwasserkühlung besitzt die Nebelquench systematische Vorteile. Bei der Spritzwasserkühlung breitet sich das Wasser nach dem ersten Kontakt mit dem heißen Band auf der Oberfläche unkontrolliert aus. In der Nebelquench hingegen werden Tropfen geringerer Größe in den Luftstrom des Bandschwebesystems eingemischt und so auf die Bandoberfläche transpor-

tiert. Der Wärmetransport zwischen Tropfen und Wand erfolgt zum Hauptteil durch die Ausnutzung der Verdampfungsenthalpie und zu einem geringen Anteil konvektiv. Der zu erreichende Wärmeübergangskoeffizient beträgt 2.500 W/(m²K). Bezogen auf die Banddicke entspricht der Wärmeübergangskoeffizient einer Abkühlrate von 600 K/(s mm). Nach dem Tropfen-Wand-Kontakt wird der Wasserdampf oder nicht verdampfte Tropfenanteile über das Strömungssystem abtransportiert. Der Abtransport erfolgt in den dafür vorgesehenen Rückströmbereichen zwischen den Düsenkästen, quer zur Bandrichtung. Das System ermöglicht die Unterteilung der Nebelkühlzonen in eine Vielzahl separat einstellbarer Regelbereiche.

Zur Verdeutlichung des daraus entstehenden Vorteils ist die grundsätzliche Mechanik der Bandverformung zu betrachten. Während der Abkühlung erfährt das Aluminiumband aufgrund der temperaturbedingten Kontraktion zwangsläufig auch eine Veränderung der Bandbreite. Selbst bei einer absolut homogenen Abkühlung in Bandquerrichtung sind mechanische Spannungen im Band unvermeidbar. Das Ziel der Abkühlung muss sein, die Grenze zur plastischen Verformung nicht zu überschreiten. Zunächst ist zu untersuchen, welche Bereiche während der Abkühlung besonders hohen Spannungen unterworfen sind. Die Antwort liefert die numerische Simulation der inneren Bandspannung während des Abkühlvorgangs. Abb. 2 zeigt das Ergebnis.

Es ist zu erkennen, dass die Spannungen

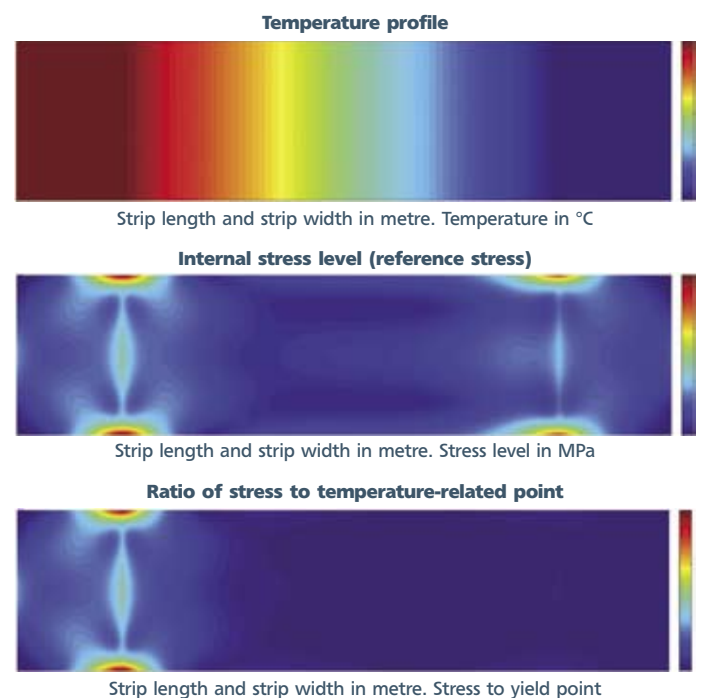


Fig. 2: Numerical simulation of internal stress levels during cooling [4] / Abb. 2: Numerische Simulation der inneren Bandspannung während des Abkühlvorgangs [4]

am Beginn und zum Ende der Abkühlung maximal sind. Verformungskritisch sind jedoch nur die Spannungswerte, welche die Grenze zur plastischen Verformung überschreiten. Die Streckgrenze des Aluminiumbands ist bei hohen Temperaturen und somit zum Beginn der Kühlung besonders gering. Visualisiert man das Verhältnis von Spannung und Streckgrenze wird sichtbar, dass die Streckgrenze nur im Bereich des Kühlstarts überschritten wird. An dieser Stelle wird der Vorteil des in der Otto Junker Nebelquench örtlich variablen Wärmeübergangskoeffizienten deutlich. Der Wärmeübergang kann in der Nebelquench zum Beginn der Abkühlung reduziert werden. Nachdem der „weiche“ Temperaturbereich unterschritten ist, wird die Abkühlgeschwindigkeit übererhöht und somit diffusionsgesteuerte Ausscheidungsvorgänge

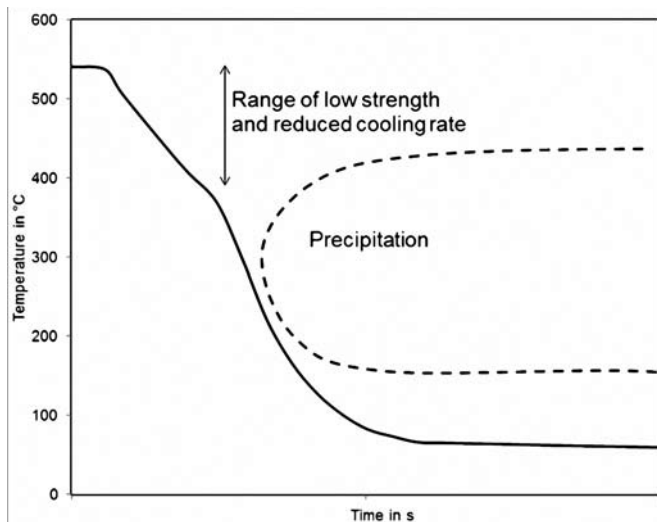


Fig. 3: Time-temperature diagram of a variable-rate cooling process / Abb. 3: Zeit-Temperatur-Verlauf einer Abkühlung mit variierter Abkühlgeschwindigkeit

unterdrückt. Abb. 3 zeigt den qualitativen Temperaturverlauf der Abkühlstrategie.

Die Entwicklung der Abkühlstrategie ist dabei nur ein Ergebnis aus der Kombination von numerischer Simulation, Laborexperimenten und der Betriebserfahrung. Die Spannung im Band steigt mit der auf die Bandlänge bezogenen Abkühlrate (Einheit: °C/m) an. Das bedeutet auch, dass die Gefahr der Bandverformung bei einer konstanten, auf die Zeit bezogenen Abkühlrate (Einheit: K/s) mit steigender Bandgeschwindigkeit abnimmt. Anders formuliert: Je höher die Bandgeschwin-

digkeit, desto geringer ist die Verformung.

Unabhängig vom Abkühlverfahren ist der Leidenfrostpunkt hinsichtlich der Bandverformung kritisch. Wird die Leidenfrosttemperatur erreicht, so bricht der zwischen der Kühlflüssigkeit und der heißen Oberfläche befindliche Dampffilm zusammen. Aufgrund des direkten Kontakts zwischen Tropfen und Aluminiumband steigt der Wärmeübergang signifikant an. Ist vor dem Erreichen der Leidenfrosttemperatur bereits eine geringe Temperaturdifferenz im Band vorhanden, wird diese aufgrund des zeitlich differenten Anstiegs im Wärmeübergang erhöht. Abb. 4 (links) zeigt die Problematik und die hohe Temperaturdifferenz bei der bisher üblichen Spritzwasserkühlung.

Grundsätzlich ist der Leidenfrostpunkt während der Spritzwasserkühlung und während der Nebelkühlung sichtbar. Die Nebelkühlung bietet jedoch die Möglichkeit der örtlich begrenzten Abschaltung der Wasserphase. Kurz vor dem Erreichen der Leidenfrosttemperatur wird der Kühlnebel in dem betreffenden Anlagenbereich abgeschaltet und das Band wird mittels reiner Luftkühlung sicher unter die Leidenfrosttemperatur geführt. Anschließend wird die Wasserphase erneut zugeschaltet bis die vorgegebene Bandaustrittstemperatur erreicht ist. Die Temperaturdifferenz und das Verformungsrisi-

ko sind signifikant reduziert (Abb. 4 rechts).

Die Bandtemperatur ist während der Produktion innerhalb der Anlage nicht sicher zu erfassen, muss aber zu jedem Zeitpunkt bekannt sein. Diese Aufgabe übernimmt das physikalische / mathematische Prozessmodell. Das Modell berechnet die Anlagenparameter wie bspw. die Ventilator Drehzahlen im Ofen oder den Pumpendruck in Abhängigkeit des vom Bediener vorgegebenen Zeit-Temperatur-Verlaufs. Nach den Vorgaben des Modells wird die Ofenanlage parametrisiert. Während der Produktion berechnet und dokumentiert das Modell online qualitätsrelevante Parameter wie die Peak-Metal-Temperatur (PMT), die Haltezeit oder die erreichte Abkühlrate. Die Online-Funktion des Modells ermöglicht ebenfalls die Reduktion von Schrott während dem Band- und Rezeptwechsel.

As the aluminium strip cools down, it will necessarily undergo a width change as well due to temperature-related contraction. Even with absolutely homogeneous cooling in the cross-strip direction, mechanical stresses will inevitably form in the metal. The aim must be to reduce the strip temperature without transcending the plastic deformation limit. Let us first examine which strip areas are subject to particularly high stresses during cooling. The answer can be obtained by numerical simulation of the internal stresses occurring in the cooling cycle. The result is shown in Fig 2.

It emerges that stress levels are highest at the start and end of the cooling cycle. However, from a strip deformation viewpoint, only stresses exceeding the plastic deformation limit are critical. The yield strength of aluminium strip is particularly low at high temperatures, i.e., at the onset of cooling. If we visualize the stress-to-yield-point ratio, we will find that the yield point is exceeded only at the start of the cooling operation. This is where the advantage of Otto Junker's evaporation quench, with its locally variably heat transfer coefficient, becomes apparent. In the evaporation quench, the heat transfer can be reduced at the start of the cooling cycle. Once the 'soft' temperature zone has been passed in this manner, the cooling rate is super-elevated so as to suppress diffusion-controlled precipitation processes. Fig. 3 shows the qualitative temperature graph underlying this quenching strategy.

The development of this cooling strategy is merely a result of a combination of numerical simulation, laboratory experiments and operating experience. Internal stress levels rise with the cooling rate related to the strip length (unit: °C/m). This implies that at a constant time-related cooling rate (unit: K/s), the strip deformation risk will decrease with growing strip velocity. In other words: the higher the strip speed, the less deformation will occur.

Regardless of the cooling method employed, the Leidenfrost point is critical with regard to strip deformation. Once the Leidenfrost temperature is reached, the vapour layer separating the cooling fluid from the hot surface will break down. As direct contact occurs between the droplets and the aluminium strip, the heat transfer rate increases substantially. If a slight temperature difference had been pre-existing in the strip before the Leidenfrost temperature was reached, it will become more pronounced now as the temperature gradient increases with the heat transfer. Fig. 4 (left-hand side) illustrates the problem and the high temperature difference in con-

Latest News

www.alu-web.de

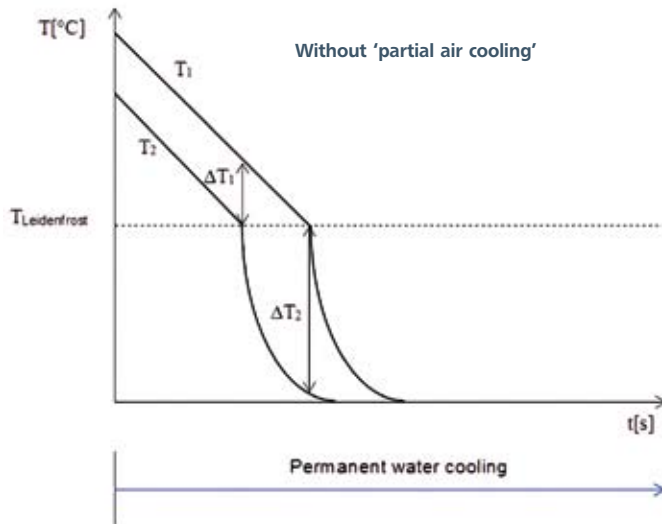


Fig. 4: Comparison of temperature difference using different cooling strategies

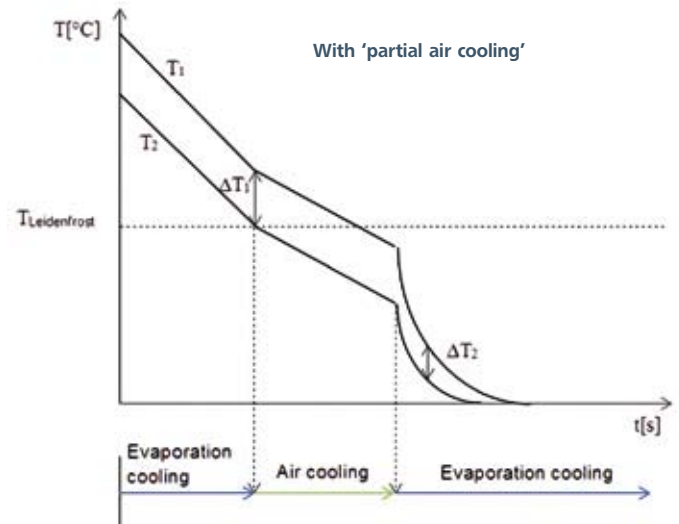


Abb. 4: Vergleich der Temperaturdifferenz bei verschiedenen Abkühlstrategien

ventional spray water cooling.

As a general rule, the Leidenfrost point is identifiable both in spray water and evaporation cooling. However, evaporation cooling provides the option of interrupting the water phase in a locally circumscribed area. Shortly before the Leidenfrost temperature is reached, the cooling mist in the relevant equipment zone is shut off and the strip is passed safely below the Leidenfrost temperature by air cooling alone. Thereafter, the water phase is added again until the specified strip exit temperature is reached. The temperature difference and the deformation risk are reduced significantly in this manner (Fig. 4, right-hand side).

The strip temperature cannot be reliably determined in the equipment while production is ongoing; however, it must be known at all times. A physical/mathematical process model is therefore relied upon to meet this requirement. The model computes equipment parameters such as, e.g., in-furnace fan speeds or pump pressures as a function of the operator-specified time-temperature curve. The furnace system is parameterized as determined by the model. As production continues, the model computes and documents quality-relevant parameters 'online: e.g. the peak metal temperature (PMT), the dwell time, or quenching rate achieved. The model's online function also helps to reduce scrap during strip and recipe changes.

In process engineering terms, the furnace-to-quench transition area requires special attention because of the diverse requirements that collide here. The process steps of heating and cooling must be separated by a sharp dividing line that does not allow any undesirable 'pre-cooling' to occur. At the same time, the strip geometry must be converted from its stable in-furnace sine-wave shape to the cross-

bow that is advantageous from the perspective of the cooling process in the quench. Crossbow refers to the arcuate cross-sectional shape of the strip, with strip edges pointing downwards, which promotes a lateral run-off of water from the surface. The Otto Junker Crossbow Nozzle developed specifically for this purpose generates the requisite pressure profile on the top and underside of the strip. The pressure profile and hence, the degree of crossbow obtained can be selectively controlled via the rotational speed (r.p.m.) of the connected fans.

The overall process of a continuous heat treatment of aluminium strip is made up of numerous sub-processes. A high-quality heat treatment in conjunction with process reliability can only be achieved via the global integrity of all subsystems. This task has been successfully resolved.

References

- [1] Ducker Worldwide: Light Vehicle Metallic Material Market Analyses & Forecast, 2014
- [2] Ostermann, F.: Anwendungstechnologie Aluminium [Aluminium Application Technology], Springer-Verlag, 3. Auflage / 3rd ed., 2014
- [3] Zhang, Y.; Milkereit, B.; Schick, C.; Rometsch, P. A.: Development of continuous cooling precipitation diagrams for aluminum alloys AA7150 and AA7020, Journal of Alloys and Compounds, Vol. 584 (2014) pp. 581-589
- [4] Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik [Department for Industrial Furnaces and Heat Engineering], RWTH Aachen, 2016

Authors

B. Eng., MBA Tobias Mertens, process engineer, Thermoprocessing Plants / Annealing Furnaces, Otto Junker GmbH, Simmerath, Germany.
Dr.-Ing. Günter Valder, chief technology officer, Otto Junker GmbH, Simmerath, Germany.

Prozesstechnisch ist der Bereich zwischen dem Ofen und der Quench aufgrund des Zusammentreffens vielseitiger Anforderungen besonders zu betrachten. Das Abgrenzen der Prozessschritte Heizen und Kühlen ist als scharfer Schnitt ohne das Entstehen der unerwünschten Vorkühlung sicherzustellen. Gleichzeitig muss die Bandform von der stabilen Sinusform im Ofen auf den kühltechnisch vorteilhaften Crossbow in der Quench umgestellt werden. Als Crossbow ist der bogenförmige Querschnitt des Bands mit abwärts geneigten Bandkanten benannt. Die Form begünstigt das seitliche Abfließen des aufgebrauchten Wassers. Die eigens dazu von Otto Junker entwickelte „Crossbowdüse“ erzeugt das benötigte Druckprofil auf der Ober- und Unterseite des Bands. Über die Drehzahl der angeschlossenen Ventilatoren ist die Ausprägung des Druckprofils und damit die Ausprägung des Crossbows gezielt einzustellen.

Der Gesamtprozess der kontinuierlichen Wärmebehandlung von Aluminiumband ist aus einer Vielzahl von Teilprozessen zusammengesetzt. Die hohe Qualität der Wärmebehandlung und die Prozesssicherheit sind jedoch nur durch die globale Integrität aller Teilsysteme zu erreichen. Diese Aufgabe ist erfolgreich gelöst.

Literaturhinweise

Siehe „References“ in der englischen Textversion.

Autoren

B. Eng., MBA Tobias Mertens, Prozessingenieur Thermoprocessinganlagen / Vergütungsanlagen, Otto Junker GmbH, Simmerath.
Dr.-Ing. Günter Valder, Technischer Leiter, Otto Junker GmbH, Simmerath.