

Härten und Anlassen von Rohr- und Stangenmaterial – Vorteile der Induktionserwärmung

Hardening and tempering for tubes and bars – Advantages of induction heating technology

Von Guido Opezzo

Die Induktionserwärmung ist bereits seit mehreren Jahrzehnten zu einer wichtigen Technologie in vielen Bereichen geworden, in denen eine präzise, schnelle und zuverlässige Erwärmung von Metallen sowie reproduzierbare Prozesse der Wärmebehandlung im Fokus stehen. Daher ist es nur konsequent, dass die Induktionserwärmung seit langem die am meisten verbreitete Technologie nicht nur zur Erwärmung achssymmetrischer Stahlblöcke vor einer sich anschließenden Umformung oder Warmbearbeitung ist, sondern auch die bevorzugte Technologie ist, wenn es um die gezielte und reproduzierbare Oberflächenhärtung von Stahlbauteilen geht. Die Induktionserwärmung hat sich auch bei der Wärmebehandlung von Vollstangen für die Automobilzulieferindustrie sowie in der Bauindustrie durchgesetzt, schließlich zeichnen sich seit einigen Jahren auch Tendenzen zum Einsatz der Induktionstechnologie für die Wärmebehandlung von nahtlosen und widerstandsgeschweißten Rohren ab.

The Induction Heating Technology has become fundamental since several decades in all the high-tech fields, where a precise, quick, reliable and repeatable heating action is needed on metals. In fact, since long time induction is the most used technology for heating symmetrical-axial steel pieces upstream of the hot forging process. Also for surface hardening of any kind of steel piece, this is one of the mostly preferred technologies. Induction Heating Technology has already become fundamental for automotive and construction industries, as far as solid bars are concerned. In the last couple of years this preference has been extended also to the tubular goods such as seamless and ERW pipes.

Einleitung

Vor vielen Jahren wurde das Verfahren der Induktionserwärmung nur für das Härten und Anlassen von langen Stahlprodukten angewandt, wie z. B. wie Stabilisatorstangen im Automobilbau, wo eine hohe Härte und eine gute Mikrostruktur über das gesamte Material für den Gesamtprozess unabdingbar sind (z. B. für das Kaltbiegen der Stabilisatorstangen). Dies konnte durch herkömmliche Methoden (wie z. B. mit konventionell beheizten Härte- und Anlassöfen) nicht erreicht werden.

Das anfängliche Misstrauen der Automobilbauer und auch in der Bauindustrie gegenüber einer derart „schnellen“ Technologie schwand aber rasch. Mittlerweile wird zum Härten und Anlassen von Vollstangen bis zum einem Durchmesser von etwa 160 mm nur noch das Verfahren der Induktionserwärmung angewandt.

Was für diese positive Entwicklung der Anwendung der Wärmebehandlung für Vollstangen in den letzten Jahren gilt, wurde in den vergangenen Jahren auch für Rohrmaterialien wie nahtlose Rohre

und widerstandsgeschweißte Rohre fortgesetzt. Die Entwicklung auf diesem Gebiet ist aufgrund der beeindruckenden Ergebnisse im Hauptanwendungsgebiet – der Zulieferindustrie für die Erdölindustrie – bemerkenswert.

Eine typische Induktionshärte- und Anlassstrecke (**Bild 1**) mit einem Durchsatz zwischen 4 und 15 t/h besteht im Wesentlichen aus folgenden Baugruppen:

- Sortier- und Beladetisch, der die Bündel mit den Langprodukten sortiert, Rohre und Stangen entsprechend vereinzelt und auf die sich anschließenden Rollgänge befördert;
- ein System von mehreren speziell für diesen Zweck konstruierten Rollgängen, mit denen die Rohre/Stangen über den gesamten Prozess der Wärmebehandlung in einer Reihe transportiert werden;
- ein System von Frequenzumrichtern (IGBT-Basis) zur Stromversorgung und

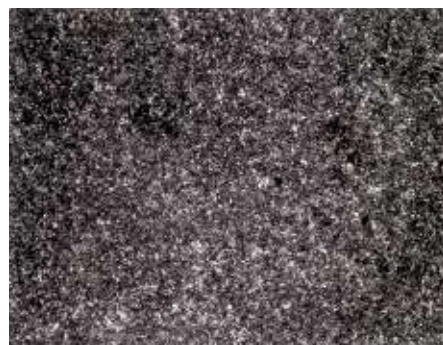


Bild 1: Mikrostruktur einer induktionsgehärteten und -vergüteten Stange 39NiCrMo4 (100fach vergrößert)

Fig. 1: Microstructure of an Induction Hardened & Tempered bar of 39NiCrMo4 (magnified: 100 X)

Lieferung der entsprechenden elektrischen Heizleistung für die Austenitierungs-, Anlass- und Haltestrecken;

- mehrere Sätze Induktorstrecken mit mehreren einzelnen Heizspulen zum Durchlauf der Rohre/Stangen bei ihrer Erwärmung beim Austenitisieren und Anlassen;
- eine Abschreckstation, die im Wesentlichen aus speziell konstruierten Brauseköpfen zur Abschreckung des austenitisierten Materials besteht;
- ein Kühltisch mit nachfolgendem Sammelgestell zum Kühlen des aus der Anlassstrecke kommenden Materials mit ruhender Luft und anschließendem Sammeln in geeigneten Bündeln.

Vorteile der Induktionserwärmung

Das Verfahren der Induktionserwärmung hat für den eigentlichen Prozess des Härtens und Anlassens entscheidende Vorteile gebracht, von denen die Wichtigsten nachfolgend kurz beschrieben werden sollen.

Hohe Flexibilität

Die hohe Flexibilität der Induktionserwärmungstechnologie ist sicher ihr größter Vorteil und daher auch einer der Hauptgründe für ihren Erfolg in der Praxis: heute bestehen die system- und anlagentechnischen Möglichkeiten, einen großen Teil der wärmetechnischen Prozesse auf der Basis der Induktionserwärmung durchzuführen.

Die typische Losgröße der Rohre bzw. Stangen liegt bei den derzeit verwendeten wärmetechnischen Anlagen im Be-

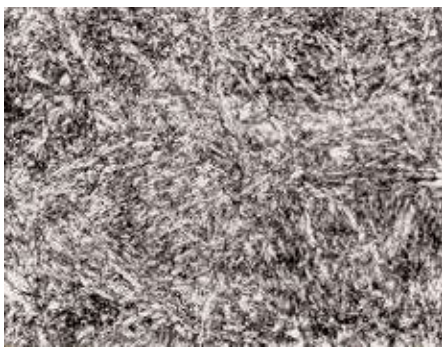


Bild 2: Mikrostruktur einer induktionsgehärteten und -vergüteten Stange 41Cr4 (100fach vergrößert)

Fig. 2: Microstructure of an Induction Hardened & Tempered bar of 41Cr4 (magnification: 100 X)

reich zwischen 30 und 50 Tonnen. Mit anderen Worten: Täglich müssen mehrere verschiedene Materiallosgrößen und Lose verschiedener Stahlqualitäten (bei unterschiedlichen Wärmebehandlungstemperaturen) wärmebehandelt werden.

Der Vorteil der Induktionserwärmung, die mit nur einer einzigen Materialstrecke von Rohren bzw. Stangen arbeitet, besteht darin, dass sie so schnell und flexibel arbeitet, dass die gesamte Strecke innerhalb weniger Minuten geleert und mit einer geringen Stillstandszeit auf die nächste Materialcharge umgerüstet werden kann.

Die konventionelle Ofentechnologie hingegen benötigt längere Zeiten zum Leeren der gesamten Anlage und zum Umstellen der Wärmekammern auf die nächsten Chargen mit anderem Material.

Schlussfolgernd lässt sich also sagen, dass gerade dann, wenn häufig unterschiedliche Chargen für verschiedene Kunden bearbeitet werden müssen, kann die tatsächliche Kapazität von konventionellen Ofenanlagen sehr gering sein (bis weniger als die Hälfte der Nominalkapazität).

Gleicher Durchsatz für alle Rohre/Stangen im gesamten Anlagenbereich

Gleicher Durchsatz für alle Rohre/Stangen im gesamten Anlagenbereich heißt, dass eine Induktionshärte- und Anlassstrecke mit einem maximalen Durchsatz von beispielsweise 13 t/h bei einem Materialaußendurchmesser im Bereich zwischen 3" und 9" sowohl die Rohre mit 3" Durchmesser, die Rohre mit 9" Durchmesser als auch alle Rohrdurchmesser dazwischen mit einer Kapazität von 13 t/h bearbeiten kann.

Dies rührt daher, weil die Induktionserwärmungsstrecke ihre Wärmeenergie direkt in das Material einbringt, wodurch große und kleine Stangen oder Rohre unabhängig von der Geschwindigkeit innerhalb der Induktorstrecke die gleiche Produktionsrate innerhalb der Anlage ermöglichen.

Damit ergibt sich für den Betreiber einer Induktionshärte- und -anlassstrecke die wirtschaftlich interessante Möglichkeit, maximale Produktionswirkungsgrade mit der Anlage zu erzielen und sie unabhängig von den wärmetechnisch zu behandelnden Materialien mit maximalem Durchsatz zu betreiben.

Dieser wirtschaftliche Vorteil ist bei den konventionellen Anlagen zur Wärmebehandlung nicht oder nur eingeschränkt gegeben, da bei solchen Anlagen die Erwärmung des Materials auf der Übertragung von Strahlungswärme auf die Oberfläche des Materials basiert, was einen längeren Erwärmungsprozess zur Folge hat. Zudem ist diese Erwärmungsdauer auch noch von der Größe der Verbrennungskammer abhängig.

Bei konventionellen Anlagen zur Wärmebehandlung ist der anlagenspezifische Vorteil am größten, wenn durch die Anlage großes und schweres Material läuft; dann ist auch der maximale Durchsatz erreicht. Wenn allerdings kleinere oder leichtere Materialien die Anlage durchlaufen, dann ist die Durchtransport-Geschwindigkeit des Materials in etwa die gleiche wie bei großem Material. Da trotz etwa gleicher Geschwindigkeit das metrische Gewicht des kleineren Materials wesentlich geringer ist, sinkt der resultierende Durchsatz der Anlage gegebenenfalls stark.

Homogenes Härtebild und homogene Mikrostruktur

Das in einer Induktionshärte- und -anlassstrecke wärmetechnisch behandelte Material verfügt über eine hohe Homogenität; in der Tat kann die Härte nach Rockwell C (HRC) über die gesamte Materiallänge +/- 1 oder besser sein.

Diese hohe Homogenität gilt auch für die Mikrostruktur. Ein Beispiel für die erzielbare Mikrostruktur zeigt **Bild 2** (39NiCrMo3, 100fach vergrößert) und **Bild 3** (41Cr4, 1000fach vergrößert).

Diese guten Ergebnisse bei der Homo-



Bild 3: Gefügeausbildung bei einer durch Walzen kaltgezogenen Stange 41Cr4 (160fach vergrößert)

Fig. 3: Microstructure of cold drawn raw bar, as rolled 41Cr4 (magnification: 160 X)

Tabelle 1: Vergleichsdaten für eine runde Stahlstange, Material 42CrMo4, 40 mm Durchmesser

Table 1: Comparative data for a round steel bar, material 42CrMo4, 40 mm diameter

Vergleich	Schlagfestigkeit bei 20 °C	Schlagfestigkeit bei -40 °C	Schlagfestigkeit bei -101 °C
ASTM-Standard	> 50 J	> 40 J	> 27 J
Induktionserwärmung	114 J	108 J	44 J

genität sind auf das Prinzip der Induktionserwärmung zurückzuführen. Bei der Induktionserwärmung läuft das Material in allen Teilprozessen (Austenitisierungserwärmung, Abschrecken und Anlassen) durch nur eine einzige Strecke. Damit wird das Material über seinen gesamten Querschnitt mit derselben Wärmemenge versorgt. Der Abschreckeffekt ist unabhängig vom Materialdurchmesser und unabhängig von der Position des Materials in der Induktionsstrecke. Das Material durchläuft alle Vorrichtungen zur Erwärmung und zum Abschrecken mit derselben Geschwindigkeit.

Hohe Festigkeit und Schlagfestigkeit

Eines der nachteiligen Ergebnisse beim Anlassen von Produkten aus Stahl ist bekanntermaßen die sogenannte Anlasssprödigkeit. Bei der Erwärmung von Stahlrohren/-stangen über einen längeren Zeitraum (was normalerweise im Anlassbereich von traditionellen Verbrennungsöfen der Fall ist), kann es im Temperaturbereich zwischen 400 °C und 600 °C zu einer deutlichen Verringerung der Schlagfestigkeit kommen, was aber nicht zwangsweise mit einer wesentlichen Verringerung der Härte oder Zugfestigkeit einhergehen muss. Dieses Verhalten lässt sich mit der Fällung oder Rekristallisierung hauptsächlich von Karbiden vergleichen.

Gerade solche Materialqualitäten, wie Nickelchromstähle, wie sie beim Härten und Anlassen bevorzugt verwendet werden, sind für eine Anlasssprödigkeit besonders anfällig. Diese Erscheinung ist vermutlich auf Umwandlungsprozesse innerhalb des Metallgefüges zurückzuführen, die zu einem Wachstum von sehr dünnen, nadelförmigen Karbidkristallen an den Materialkornkanten geführt haben.

Dieser erwähnte negative Effekt (die Anlasssprödigkeit) tritt nicht auf, wenn zum Anlassen die Induktionserwärmungstechnologie verwendet wird, da dort der kritische Temperaturbereich

aufgrund des physikalischen Charakters der Induktionserwärmung in sehr kurzer Zeit durchlaufen wird. Bei der Induktionserwärmung erreichte Ergebnisse sind bei der Schlagfestigkeit besser als zum Beispiel in den ASTM-Standards gefordert.

Exemplarisch seien hier die Vergleichsdaten für eine runde Stahlstange, Material 42CrMo4, 40 mm Durchmesser in **Tabelle 1** angeführt.

Daher ist es auch nachvollziehbar, dass die in Bohrtürmen (für Erdöl und Erdgas) eingesetzten Schrauben- und Verbindungsstangen vorzugsweise durch Einsatz der Induktionserwärmung gehärtet und vergütet werden.

Keine Entkohlung während der Wärmebehandlung

Bei der Austenitisierungserwärmung mit konventioneller Ofentechnologie kommt es aufgrund der langen Zeit, die das Material einer hohen Temperatur ausgesetzt ist, typischerweise zum Effekt der Entkohlung der Oberfläche. Hierbei handelt es sich um eine nachteilige Erscheinung, durch die das Material



Bild 5: Nahtlose, dickwandige Rohre nach der Induktionshärtung /-vergütung
Fig. 5: Seamless thick wall tubes after induction Hardening & Tempering process

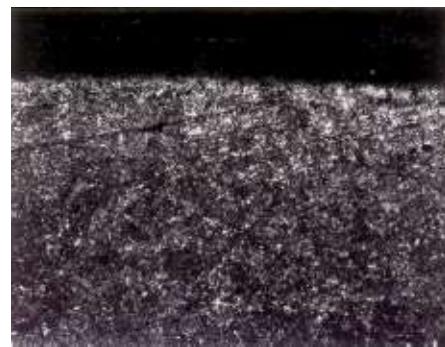


Bild 4: Gefügeausbildung bei der bereits in Bild 4 gezeigten Stange, allerdings nach dem Induktionshärten und -vergüten 41Cr4 (160fach vergrößert)

Fig. 4: Microstructure of the same shown in Fig. 4, after Induction Hardening & Tempering process 41Cr4 (magnification 160 X)

an der Oberfläche beeinflusst wird, worunter schließlich die Homogenität der Härte über dem Materialquerschnitt leidet.

Dieser Effekt der Entkohlung tritt nicht auf, wenn das Härten und Vergüten unter Anwendung der Induktionserwärmung durchgeführt wird, da bei diesem Verfahren das Material aufgrund des Charakters dieser Technologie dem oben genannten kritischen Temperaturbereich nur für sehr kurze Zeit ausgesetzt wird.

Als Beispiel seien die beiden Strukturbilder **Bild 4** und **Bild 5** zum Vergleich angeführt.

Bild 4 zeigt eine unbehandelte, kaltgezogene Stange, Material 41Cr4, bei der an der Oberfläche bereits zu sehen ist, dass der Anteil der Ferritkristalle (die in

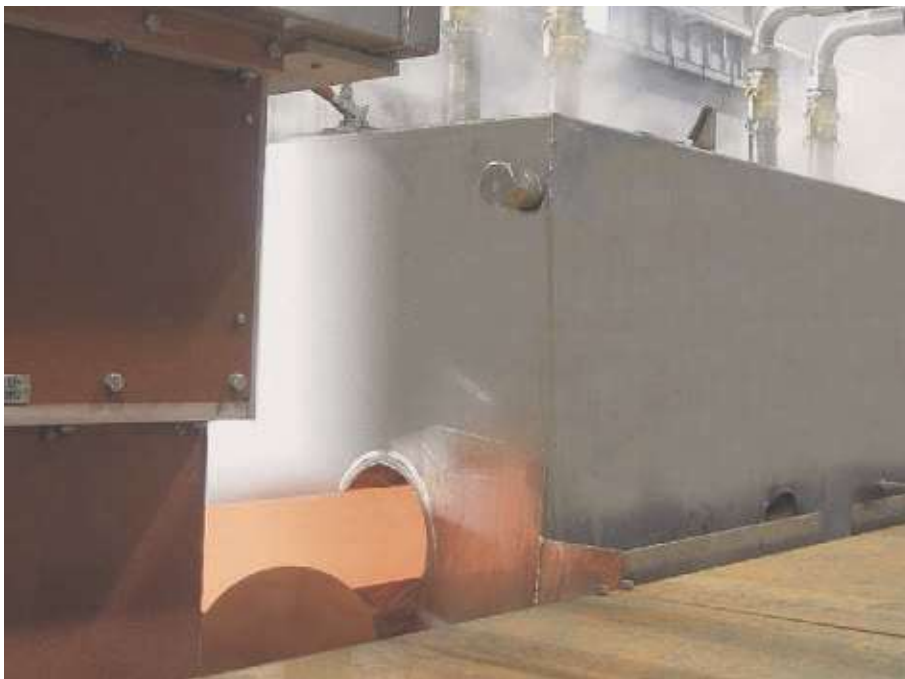


Bild 6: Ein nahtloses, dickwandiges Rohr wird der Abschreckstation einer typischen Induktionshärte- und -vergütungsstrecke zugeführt

Fig. 6: Seamless thick wall tubes entering the Quenching Station in a typical Induction Hardening & Tempering Line

der Abbildung weiß dargestellten Bereiche) aufgrund der Entkohlung infolge des zur Fertigung der Stange angewandten Walzprozesses bereits stark erhöht ist.

Die zweite, mit derselben Vergrößerung dargestellte Gefügestrukturdarstellung (Bild 5) zeigt dieselbe Stange nach dem Induktionshärten und -vergüten. Diese zweite Abbildung zeigt deutlich, dass die durch die Induktionswärmebehandlung erzeugte und vergütete martensitische Gefügebildung nicht die auf der vorangegangenen Abbildung gezeigte Oberflächenentkohlung zeigt wie bei der auf herkömmliche Weise behandelten Stange.

Einfache und schnelle Anpassbarkeit der Strecke an die Anforderungen des Betreibers

Die Festlegung der Einstellungen einer wärmetechnischen Anlage für eine neue Kombination 'Stahlqualität-Rohr-/Stangengröße' mit konventioneller Ofentechnologie ist zeitaufwändig; es gilt für die verschiedenen Härtebereiche, die verschiedenen Zugfestigkeiten oder die unterschiedlichen Streckgrenzen und Umformfestigkeiten verschiedene Prozesstemperaturen einzustellen, was nicht nur viel Zeit erfordert und kosten-

intensiv ist, sondern es ist auch oft schwierig, zuverlässige Informationen zu bekommen.

Bei der Induktionserwärmung sind die für den jeweiligen Endkunden erforderlichen Einstellungen daher vergleichsweise schnell und einfach vollzogen: sobald bei den Rohren bzw. Stangen die volle martensitische Umwandlung erreicht ist, braucht nur noch eine geringe Menge des betreffenden Materials die Leistungseinstellungen für den Anlassrichter zwischen den einzelnen Rohren/Stangen geänderten Abfolge zu durchlaufen! Die nachfolgenden, unmittelbar im Labor durchgeführten Tests sollen zeigen, welche Leistungseinstellungen denjenigen mechanischen Eigenschaften, für deren Erreichung die Wärmebehandlung erforderlich ist, am besten entsprechen.

Dieses einfache und schnelle Verfahren lässt erkennen, dass mit Hilfe der Induktionserwärmung Test- bzw. Probeaufträge mit minimalem Aufwand realisiert werden können.

Hohe Geradheit des Materials nach der Wärmebehandlung

Aufgrund des spezifischen Materialhandlings bei der Induktionserwärmung in Kombination mit der Art und Weise,

wie das Material erwärmt und abgeschreckt wird, sind die bei der Induktionserwärmung nach dem Prozess des Härstens und Vergütens entstehenden Rohre/Stangen sehr gerade.

Eine Bearbeitungsgeradheit von weniger als 2 mm/m ist bei der Induktionswärmebehandlung keine Seltenheit. Das ist oft sogar noch besser als die Geradheit des Ausgangsmaterials (**Bild 6**).

Der Vorteil des Verfahrens besteht hier darin, dass nach der Induktionswärmebehandlung die Rohre bzw. Stangen nicht noch nachgerichtet zu werden brauchen. Das wiederum hat wirtschaftliche Vorteile, da weder Investitionen in Hochleistungsrichtmaschinen notwendig sind (die in der Lage sind, hochfestes, gehärtetes und vergütetes Material zu richten), noch zusätzlichen Produktionsprozesse (Richten) eingeplant werden müssen.

Im Gegensatz dazu ist bei konventionellen Wärmebehandlungsanlagen nach dem Härten und Vergüten immer ein Richten der Rohre bzw. Stangen erforderlich, da die normalerweise erreichbare Geradheit nicht den handelsüblichen Standards entspricht.

Energieverbrauch nur während der eigentlichen Produktion spart zusätzlich Energiekosten

Beim Härten und Vergüten mit dem Induktionsverfahren fallen nur die direkten und unmittelbar mit dem durch Wärmebehandlung des zu bearbeitenden Material verbundenen Energieverbräuche an, da die Induktionswärmeleistungen nur während der eigentlichen Produktion eingeschaltet und nach Abschluss des Produktionsdurchlaufes sofort wieder abgeschaltet werden. Mit anderen Worten: sowie das letzte Rohr/die letzte Stange den Vergütungsinduktor verlassen hat, wird die Induktionswärme abgeschaltet.

Im Gegensatz dazu müssen die konventionellen Wärmebehandlungsanlagen auch dann eingeschaltet bleiben, wenn die aktive Produktion nicht läuft, da in den Verbrennungskammern stets die entsprechende Temperatur aufrechterhalten werden muss. Darüber hinaus brauchen die konventionell beheizten Anlagen nach einer Änderung der Wärmeparameter (d. h. einer Temperaturerhöhung oder -verringern auf Grund geänderter wärmetechnischer Anforderungen) eine definierte Zeit, um den ge-



Bild 7: Anlassinduktoren in einer typischen Induktionshärte- und -vergütungsstrecke im Überblick

Fig. 7: Tempering Inductors overview in a typical Induction Hardening & Tempering Line



Bild 8: Nahtlose, dickwandige Rohre mit dazwischen liegenden Induktionsspulen während des Vergütungsprozesses in einer typischen Induktionshärte- und Induktionsvergütungsstrecke

Fig. 8: Seamless thick wall tubes, in-between Induction heating coils during the Tempering process, in a typical Induction Hardening & Tempering Line

änderten Temperaturbedingungen zu folgen. So hat man also in diesen nichtproduktiven Zeiten trotzdem einen Energieverbrauch, obwohl in dieser Zeit kein Material durchläuft.

Geringe Wartungskosten; keine langen Stillstandszeiten für Wartung

Der Grund dafür, dass die Wartungskosten bei Induktionshärte- und -vergütungsanlagen extrem gering sind, liegt in folgender besonderen Situation:

Alle mechanischen Teile (wassergekühlt), alle Wärmeeinheiten (die Induktorstrecken) und alle im gesamten Prozess verwendeten Komponenten sind kalt und unterliegen daher keiner mechanischen Belastung in Kombination mit hohen Temperaturen, weshalb die Belastung der Anlage selbst insgesamt sehr gering ist. Einen typischen Überblick einer typischen Induktionshärte- und vergütungsstrecke während der Produktion zeigen die **Bilder 7 und 8**. Diese Fotos zeigen deutlich, dass nur die bearbeiteten Rohre heiß sind, während die eigentlichen Anlagenteile kalt sind, keiner thermischen Belastung ausgesetzt sind und daher zuverlässig und langlebig arbeiten.

Daher fallen bei der Induktionserwärmung nur geringe Wartungskosten an, und es gibt auch keine langen Stillstandszeiten aufgrund von Wartung.

Im Gegensatz dazu sind die mechanischen Handling-Systeme bei den konventionellen Ofenanlagen hohen Temperaturen ausgesetzt, unterliegen daher einer hohen Belastung und sind vergleichsweise schnell verschlissen. Zudem müssen die Hitzeschutzwände der Öfen in regelmäßigen Abständen ausgetauscht bzw. repariert werden.

Daher müssen bei konventionellen wärmetechnischen Anlagen längere Stillstandszeiten (u. a. übrigens auch deshalb, weil alle Bauteile im Ofen heiß sind und erst entsprechend abkühlen müssen, ehe Wartungsarbeiten durchgeführt werden können) und hohe Kosten für periodische Wartungsarbeiten in Betracht gezogen werden.

Fazit

Die Automobilindustrie hat bereits bewiesen, dass sie bei der Fertigung von langen Produkten wie Antriebskomponenten und Sicherheitsausrüstungen wie Türsäulen oder Halterungen für Airbags der Härte- und Vergütung durch Induktionserwärmung eindeutig den

Vorzug gibt, was auf die genannten Vorzüge dieser Technologie zurückzuführen ist. Auch die Bauindustrie hat gezeigt, dass sie die Härte- und Vergütung durch Induktionserwärmung bevorzugt; Beispiele dafür sind Maschinen und Ausrüstungen, verschraubte Maschinenteile, Fässer, Kranausleger, usw.

Hauptsächlich aus den technologischen und wirtschaftlichen Vorteilen dieses Verfahrens entscheiden sich Hersteller von Rohren für bohrtechnische Ausrüstungen bei der Auswahl der Materialien für Bohrtürme und Erdölplattformen immer mehr für das Härten und Vergüten durch Induktionserwärmung. Dieser Trend wird durch eine Vielzahl von Induktionsanlagen bestätigt, die in den vergangenen Jahren für derartige Anwendungen weltweit in Betrieb genommen wurden.

Dr.-Ing. Guido Opezzo
SMS Elotherm GmbH,
Remscheid

Tel.: 02191 / 981-0
E-mail:
g.opezzo@sms-elotherm.de

