

Vorteile der induktiven Vergütung von Rohr- und Stabmaterial

von **Guido Opezzo, Dirk M. Schibisch**

Das induktive Vergüten, kurz Quench und Temper (Q&T), hat sich mittlerweile vor allem in denjenigen Anwendungsbereichen etabliert, in denen eine präzise, schnelle, flexible und reproduzierbare Wärmebehandlung von Rohr- oder Stabmaterial erforderlich ist. Während die induktive Vergütung bei Stabmaterial bereits seit Jahren erfolgreich eingesetzt wird, ist in den letzten Jahren dieser Prozess auch auf Rohrmaterial erweitert worden. Dabei wurden auch Prozesse für Rohre entwickelt, die einseitig gestaucht sind und damit besondere Anforderungen an den induktiven Erwärmungsprozess stellen.

Benefits of induction heat treatment for tube and bar material

Induction quench and temper (Q&T) has now become firmly established practice, particularly in applications that require precise, fast, flexible and repeatable heat treatment of tubular and bar material. A process in successful use for heat treatment of bar material for many years, induction quench and temper has recently been extended to cover tubular products. The new processes developed include technologies for pipes with upset ends, creating special demands on the induction heating processes used.

Zunächst wurde die induktive Vergütung nur für automobiler Komponenten, wie Stabilisatoren, eingesetzt bei denen eine konsistente Härte und Mikrostruktur längs des Werkstücks für den Kaltbiegeprozess erforderlich ist, die mit den herkömmlichen Verbrennungsöfen nicht erreichbar war.

Nachdem das induktive Vergüten von Stabstahl sich allmählich in der Industrie durchgesetzt hatte, wurde der Prozess auch für Rohrprodukte, wie z. B. für nahtlose Rohre und induktiv längsnahtgeschweißte Rohre, entwickelt. Die Ergebnisse waren im Vergleich zu konventionellen Verfahren in Verbrennungsöfen so überzeugend, dass, auch bedingt durch den boomenden Markt im Bereich der OCTG-Produkte (Oil Country Tubular Goods) zur Öl- und Gasexploration, der induktive Vergütungsprozess für Rohrmaterial sich innerhalb der letzten beiden Jahre vollständig durchgesetzt hat.

PRINZIPIELLER AUFBAU EINER QUENCH & TEMPER-ANLAGE

Eine typische Q&T-Induktionsanlage (**Bild 1**) ist in der Regel für einen Durchsatz von 1 bis 20 t/h ausgelegt. Die Flexibilität des Prozesses erlaubt zudem kleinere Teildurchsätze oder auch höhere Tonnagen. Prinzipiell besteht eine Q&T-Induktionsanlage aus folgenden Komponenten:

- Ein Vereinzelungs- und Beladetisch, auf dem die Bündel aufgelegt, vereinzelt und dann die einzelnen Stangen oder Rohre dem nachfolgenden Rollgang zugeführt werden.
- Ein System aus mehreren speziell gestalteten Rollgängen, die so konstruiert sind, dass die Rohre/Stäbe lückenlos durch sämtliche Wärmebehandlungs-Stufen transportiert werden.
- Mehrere IGBT-Umrichter, welche die elektrische Leistung bei den erforderlichen Frequenzen für die Austenitisie-

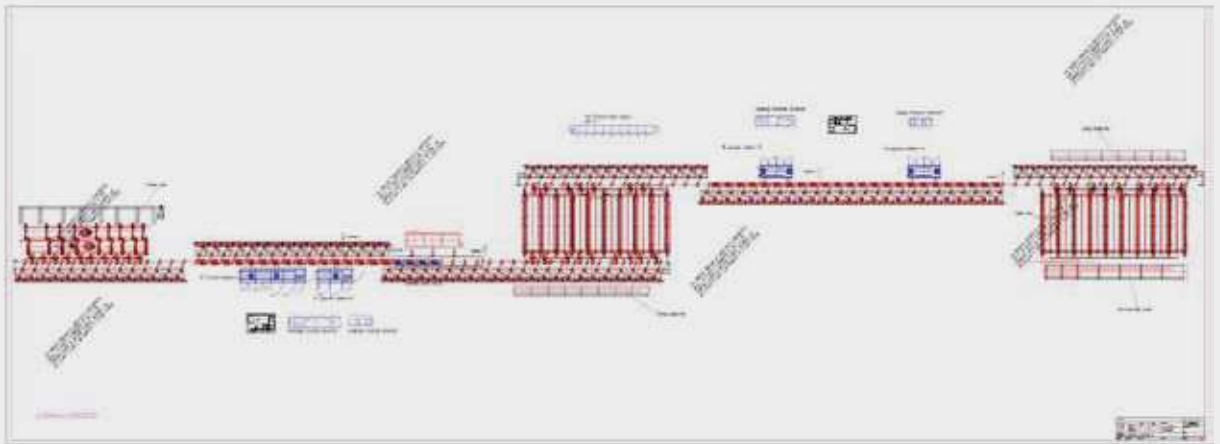


Bild 1:

Aufbau einer typischen Q & T-Induktionslinie Elotherm TemperLine™ für Langprodukte

- Mehrere Induktorstrecken, jeweils bestehend aus einzelnen Heizspulen, durch welche die Rohre/Stäbe laufen, um auf Austenitisierungs-, Anlass- und Durchwärmtemperatur gebracht zu werden.
- Eine Abschreckstation mit speziell gestalteten Sprühköpfen zum Abschrecken des Materials von Austenitisierungsauf Raumtemperatur.
- Ein Kühlbett mit nachfolgendem Sammelbett, um die aus der Anlass- oder Durchwärmzone kommenden Werkstücke in ruhiger Luft abzukühlen und sie danach in geeigneter Weise zu bündeln.

VORTEILE DER INDUKTIVEN VERGÜTUNG

Die induktive Vergütung von Langprodukten ist im Vergleich zu konventionellen Methoden in Öfen mit fossiler Feuerung in mehrfacher Hinsicht für die Betreiber vorteilhaft. Die wesentlichen Unterschiede, die zu nachhaltigen Einsparungen bei der Produktion führen, seien im Folgenden kurz erläutert.

Sehr hohe Flexibilität

Die aktuellen Forderungen nach Reduzierung von Lagermaterial und die Vielzahl unterschiedlicher Materialien führen in den Vergütebetrieben zu einer flexiblen Just-in-Time-Fertigungsstrategie mit kleinen Chargengrößen von nur 30 bis 50 t.

Das bedeutet in vielen Fällen, dass mehrfach täglich Chargen unterschiedlicher Materialabmessungen und -qualitäten bei unterschiedlichen Vergütungstemperaturen wärmebehandelt werden müssen. Hier sind die Grenzen herkömmlicher Verbrennungsöfen schnell erreicht, da diese nicht flexibel auf unterschiedliche Losgrößen reagieren können und Temperaturanpassungen nur sehr langsam zu erreichen sind.

Gerade dann, wenn es um flexible Fertigungslose geht, werden die Vorteile der Induktionstechnik deutlich erkennbar. Bei einem Chargenwechsel lässt sich die gesamte

Induktionsanlage innerhalb weniger Minuten leerfahren und mit minimalem Aufwand auf die nächste Charge neu einrichten. Dafür stehen dem Betreiber Werkzeugschnellwechselsysteme zur Verfügung, die dafür Sorge tragen, dass in wenigen Minuten auf energieeffiziente Erwärmungsspulen mit dem passenden Durchmesser umgerüstet werden kann.

Als weiterer Vorteil für die Induktion ist in diesem Zusammenhang die schnelle und einfache Ermittlung von Wärmebehandlungsrezepten für neue Materialien oder Bauteilgeometrien zu nennen. So können zu minimalen Kosten Testproduktionen oder Qualitätsnachweise für Kunden gefahren werden, die damit ihrerseits einen Wettbewerbsvorsprung erhalten – eine klassische Win-Win-Situation für alle Beteiligten.

Konstanter Durchsatz für alle Abmessungen

Während in einem konventionell beheizten Kammer- oder Durchlaufofen immer der gesamte Ofenraum auf Temperatur gebracht werden muss und damit nur bei Vollauslastung ein guter Effizienzgrad erreicht wird, reagiert eine induktive Vergüteanlage flexibel auf unterschiedliche Losgrößen und Abmessungen. Eine induktive Quench & Temper-Anlage, die beispielsweise für einen maximalen Durchsatz von 13 t/h ausgelegt ist und Werkstücke mit Außendurchmessern von 3 bis 9 Zoll verarbeiten kann, ist in der Lage, diese 13 t/h mit 3-Zoll-Rohren oder mit 9-Zoll-Rohren zu erreichen.

Möglich ist das, weil die Induktion die Wärme direkt im Werkstück erzeugt und diese nicht von außen eingebracht werden muss. Das Langmaterial durchläuft dabei die Induktionsspulen mit der dem jeweiligen Durchmesser angepassten Geschwindigkeit und wird so in wenigen Sekunden auf die materialspezifische Austenitisierungs- oder Anlassstemperatur gebracht bzw. durchwärmt.

Nur die induktive Vergütung erlaubt es dem Betreiber, seine Anlage immer optimal auszunutzen, da unabhängig von den Materialabmessungen mit maximalem Durchsatz

produziert werden kann. Sollten dennoch Teildurchsätze gefahren werden, weil die Produktionslose klein sind, so lässt eine ausgereifte Umrichter-Technologie mit der Elotherm-Zonentechnik iZone™ auch die Abschaltung von bestimmten Spulenstrecken zu. Dadurch wird immer nur die erforderliche, minimale Energie für die Erwärmung einer definierten Materialmenge verbraucht, was sich nicht nur direkt in der Senkung der Produktionskosten, sondern auch bei der Reduzierung der CO₂-Emissionen nachhaltig bemerkbar macht. Gerade die letzten beiden Punkte unterscheiden die Induktionstechnik deutlich von fossil befeuerten Öfen, die in jedem Fall unabhängig von der Chargengrößen bzw. Ofenfüllung immer auf Maximaltemperatur gehalten werden müssen und auch nicht abhängig von Bedarf einfach an oder ausgeschaltet werden können.

Ausgezeichnete Homogenität der Materialhärte und Mikrostruktur

Ein induktiv wärmebehandeltes Werkstück zeichnet sich durch eine sehr homogene Mikrostruktur und Härte aus. Die Auswertung der Rockwellhärte über den gesamten Querschnitt und entlang des gesamten Langproduktes zeigt in der Regel eine Varianz von weniger als 1 HRC.

Bild 2 zeigt ein solches Beispiel der sehr homogenen Mikrostruktur nach induktiver Wärmebehandlung.

Tatsächlich beruhen diese Ergebnisse aber nicht ausschließlich auf dem induktiven Prinzip alleine, sondern im Wesentlichen auf der Kombination aus Prozesstechnik mit einer darauf abgestimmten mechanischen und elektrischen Auslegung der Induktionsanlage. Bei der in diesem Artikel beschriebenen induktiven Vergütungstechnologie durchläuft das Wärmebehandlungsgut sequentiell den gesamten Prozess aus Austenitisieren, Anlassen und gegebenenfalls auch Durchwärmung. Dabei erfährt jeder inkrementale Querschnitt des Langproduktes identische Erwärmungs- und Abschreckbedingungen, da die Durchlaufgeschwindigkeit über den gesamten Prozess konstant ist. Das Ergebnis ist dann die entsprechend hohe Homogenität bezogen auf die Härte und die Mikrostruktur des Materialgefüges.

Hohe Festigkeit und Kerbschlagzähigkeit – auch bei Nickel-Chrom-Stählen

In herkömmlich befeuerten Anlagen findet der Anlassvorgang in einem Temperaturbereich zwischen 400 bis 600 °C über einen langen Zeitraum statt, um über die Gefügeumwandlung nach einer Durchwärmung eine Verringerung der Härte bzw. Zugfestigkeit zu erzielen. Unerwünschter Nebeneffekt ist aber die sogenannte „Anlasssprödigkeit“, welche die Kerbschlagzähigkeit stark reduziert. Dieser Effekt entsteht durch die Ausscheidung und Rekristallisation von Karbiden an den Korngrenzen während der Umwandlung des Mikrogefüges, insbesondere bei den dafür anfälligen Nickel-Chrom-Stählen.



Bild 2: Mikrostruktur eines Stabstahls aus 41Cr4 nach Abschrecken und Anlassen in einer Elotherm TemperLine™ (1000-fach vergrößert)



Bild 3: Mikrostruktur eines kaltgezogenen Rohstabs aus 41Cr4 (160-fach vergrößert)

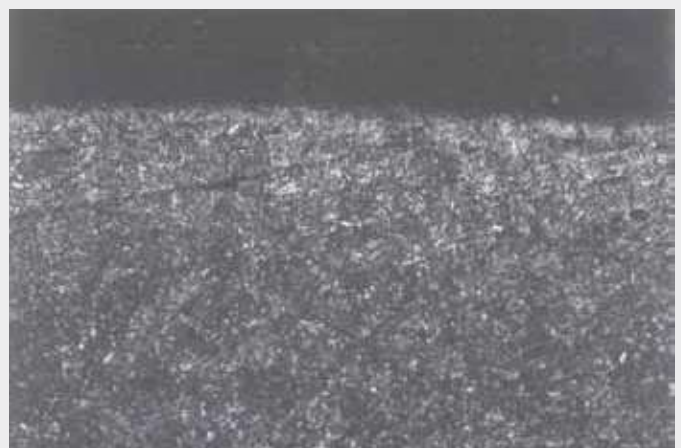


Bild 4: Mikrostruktur des Stabes aus 41Cr4 von **Bild 3** nach induktiver Wärmebehandlung (160-fach vergrößert)

Im Gegensatz dazu steht das induktive Quench & Temper-Verfahren, bei dem der kritische Temperaturbereich zwischen 400 und 600 °C so schnell durchlaufen wird, dass die beschriebene Anlasssprödigkeit gar nicht erst entstehen kann. Die Ausscheidung der Karbide findet nicht statt. Das Material behält seine guten Festigkeitseigenschaften und Kerbschlagzähigkeit ohne spröde zu werden. Deshalb werden zum Beispiel die sicherheitsrelevanten Befestigungselemente auf Offshore-Plattformen zur Öl- und Erdgasförderung mit der beschriebenen Induktionstechnik wärmebehandelt.

Wärmebehandlung ohne Randschichtentkohlung

Durch die lange Verweilzeit des Wärmegutes bei hohen Temperaturen, vor allem im Austenitbereich findet in herkömmlichen Verbrennungsöfen normalerweise eine unerwünschte Randschichtentkohlung des Wärmegutes statt.

Dieser negative Effekt schwächt das Werkstück im oberflächennahen Bereich und führt zu einer inhomogenen Härte über den gesamten Querschnitt des Materials. Eine solche Entkohlung findet beim induktiven Vergüten nicht statt, da der Werkstoff nur für sehr kurze Zeit auf hoher Temperatur bleibt. Als Beispiel dienen die beiden Mikrografien in den **Bildern 3** und **4**. Bild 3 zeigt einen kaltgezogenen Stab aus 41Cr4-Stahl auf dessen Oberfläche man weiße Bereiche (Ferritnester) sieht, die durch Randschichtentkohlung während des Walzprozesses entstanden sind. Die zweite Mikrografie (Bild 4) mit derselben 160-fachen Vergrößerung zeigt denselben Stab nach Durchlaufen des induktiven Q&T-Prozesses in einer Anlage von SMS Elotherm. Es wird deutlich, dass die durch die Wärmebe-

handlung erzeugte martensitische Mikrostruktur nicht zu einer weiteren Entkohlung des Randschichtbereichs beiträgt, sondern im Gegenteil die Ferritnester sogar reduziert.

Durch die extrem kurze Aufheiz- und Verweilzeit auf Austenitisierungstemperatur ist auch die Zunderbildung während der Erwärmung minimiert. So wird nicht nur die Materialausbringung insgesamt höher, sondern vor allem die Lebensdauer der Rollgänge deutlich verlängert. In herkömmlichen Wärmebehandlungsanlagen werden diese Transporteinheiten durch die stark abrasive Wirkung des sprödharten Zunders stark beansprucht und sie verschleiben schnell, so dass die Rollen oft nachgearbeitet bzw. ersetzt werden müssen.

Induktion macht Richt- und Kalibriervorgänge überflüssig

Das Ergebnis eines richtig aufeinander abgestimmten induktiven Vergütungsprozesses sind Langprodukte, deren Geradheit besser als die Normforderung nach API-Richtlinie ist. Die Gründe dafür sind ebenso vielfältig wie komplex und finden sich vor allem im Werkstücktransport sowie der Prozessführung aus Aufwärmen und Abschrecken bzw. Abkühlen.

In den meisten Fällen übertrifft die Geradheit nach dem induktiven Vergüten den Wert vor der Wärmebehandlung, also nach dem Walzprozess und liegt bei weniger als 2 mm pro laufenden Meter des Werkstücks – das alles ohne zusätzliche Richt- oder Kalibrierprozesse. (**Bild 5**). Eben diese sind nämlich als finale Bearbeitungsschritte nach einer Wärmebehandlung in herkömmlichen Öfen notwendig, um überhaupt die Forderungen der API-Norm zu erfüllen.



Bild 5: Nahtlose, dickwandige Rohre nach der induktiven Wärmebehandlung

Die Kostenvorteile des induktiven Verfahrens kommen somit von der Einsparung ganzer Prozesse wie Richten oder Kalibrieren, was sowohl die Investition in die Richtmaschinen nebst entsprechenden Transporteinrichtungen als auch die laufenden Prozesskosten betrifft. In vielen Fällen sind alleine diese Einsparungen größer als die Investition in eine induktive Vergütungsanlage.

Minimale Wartungskosten

Im Vergleich zu konventionellen Verbrennungsöfen, die dauerhaft sehr hohen Temperaturen ausgesetzt werden und damit wartungsintensiv sind, werden in induktiven Vergütungsanlagen sämtliche Komponenten wassergekühlt, die in die Nähe des zu erwärmenden Gutes kommen. So sind sowohl die Erwärmungsspulen aus Kupfer, die Rollen der Transporteinheiten, aber auch die Elektrokomponenten des Umrichters bzw. des Kondensatorschrankes wassergekühlt und somit vor thermischer Abnutzung geschützt. Der Instandhaltungsaufwand ist minimal und die Anlage zeichnet sich durch eine sehr hohe Verfügbarkeit aus.

Bereits der Montageaufwand für die Induktionsanlage ist sehr gering, da keine aufwändigen Vorbereitungen des Aufstellplatzes oder Fundamentarbeiten notwendig sind. Danach erfolgt eine prozessbedingte kurze Inbetriebnahme des Systems. So konnte ein Kunde beispielsweise bereits sechs Wochen nach Anlieferung verkaufsfähige, wärmebehandelte Produkte herstellen.

INNOVATIVE LÖSUNGEN FÜR NEUE PRODUKTE

Nachdem gerade in den letzten Jahren mehr und mehr konventionelle Wärmebehandlungsanlagen für Stabstahl- und Rohrmaterial durch die Induktionstechnik ersetzt wurden und die Betreiber die beschriebenen Produktionskosteneinsparungen realisieren konnten, wird jetzt nach Lösungen gesucht, die Vorteile der Induktion auch auf komplexere Bauteile zu übertragen.

Aktuell hat Elotherm eine induktive Lösung entwickelt, die es erlaubt, nahtlose Rohre mit gestauchten Enden so zu erwärmen, dass über eine homogene Erwärmung die gewünschten Materialeigenschaften eingestellt werden. Dieser Prozess ist bei einem Weltmarktführer für OCTG-Produkte (Oil Country Tubular Goods) in dessen neuen Werk in Saudi Arabien bei der Herstellung von Rohren mit

Bild 6: Das Ergebnis des induktiven Quench & Temper-Prozesses von Rohren mit gestauchten Enden – überzeugende Geradheit ohne Richt- oder Kalibrierprozesse



gestauchten Enden und stark beanspruchten Futterrohren für die Ölexploration ab diesem Jahr im Einsatz.

Rohre mit gestauchten Enden

Die besondere Herausforderung für den Induktionsprozess ist der erhebliche Gewichtsunterschied zwischen dem geraden Rohrkörper und den gestauchten Enden, der gemäß der relevanten Spezifikation API 5CT bis zu 65 % betragen kann. Um dennoch eine gleichmäßige Austenitisierungstemperatur und nach dem Anlassen homogene Härte- und Mikrostrukturverhältnisse zu haben, ist eine zusätzliche Erwärmung der gestauchten Enden notwendig. Hierzu sind dem eigentlichen Austenitisierungssystem induktive Vorwärmsspulen vorgeschaltet. Diese Induktionsspulen werden durch separate IGBT-Umrichter gespeist, die eine dem gestauchten Ende angepasste mittlere Arbeitsfrequenz bereitstellen und somit das gestauchte Material induktiv vorgewärmt wird.

Über eine integrierte Positionskontrolle wird die Lage der gestauchten Enden präzise erfasst, obwohl die Rohre lückenlos durch das gesamte System transportiert werden. So wird sichergestellt, dass in den Vorwärmereinheiten tatsächlich nur die gestauchten, also dickeren Rohrbereiche, erwärmt werden und der restliche Rohrkörper nahezu auf Raumtemperatur verbleibt. Die Vorwärmtemperatur kann dabei flexibel in Abhängigkeit des gestauchten Rohrendes eingestellt werden. So vorgewärmt läuft das Rohr in den eigentlichen Austenitisierungsbereich und wird nun gleichmäßig über den gesamten Querschnitt auf Umwandlungs-

temperatur erwärmt. Der anschließende Abschreckvorgang und das Anlassen mit der abschließenden Luftabkühlung auf speziellen Kühlbetten sind dem bereits beschriebenen Prozess dann sehr ähnlich.

Das Ergebnis dieses speziellen induktiven Vergütungsprozesses ist wieder ein Produkt mit sehr guten mechanischen Eigenschaften und homogener Härte sowie Mikrostruktur – entlang des gesamten Rohres und über die unterschiedlichen Querschnitte. In jedem Fall entsteht aber auch bei diesen komplexen und aufgrund der Massenunterschiede innerhalb des Bauteils schwierig wärmebehandelnden Teilen eine Geradheit besser als die API-Vorgabe – ohne zusätzliche Richt- oder Kalibrierprozesse (**Bild 6**).

Futterrohre für extreme Umweltbedingungen

Die Exploration einiger Öl- oder Gasvorkommen erfordert Futterrohre zur Auskleidung des eigentlichen Bohrloches, welche extremen Belastungen standhalten müssen. So verlangen beispielsweise besonders tiefe Bohrlöcher, niedrige Umgebungstemperaturen oder Salzwasser den Einsatz von Futterrohren mit sehr hohen Ansprüchen an die Festigkeit oder Leckagesicherheit. Solche Futterrohre haben typischerweise Außendurchmesser von 5 bis 10¾ Zoll. Dabei sind sie an den Enden ebenfalls gestaucht.

Da die erforderlichen mechanischen Eigenschaften nur durch den induktiven Vergütungsprozess erzielt werden können, hat Elotherm den beschriebenen Induktionsprozess auf Futterrohre mit Stauchdurchmessern bis zu 16 Zoll erweitert.

Dabei ist das mechanische Transportsystem ebenso auf die größeren Massen ausgelegt wie der Prozessteil des induktiven Austenitisierens, des Abschreckens und des Anlassens. Der grundsätzliche Prozess läuft wie bereits beschrieben ab und erzielt ebenso die gewünschte Homogenität der Mikrostruktur zur Sicherstellung der besonderen mechanischen Eigenschaften sowie die entsprechende Geradheit des wärmebehandelten Futterrohres.

FAZIT

Durch die schnelle Aufheizung von Bauteilen durch das Induktionsverfahren ergeben sich für die Hersteller von Langprodukten viele Vorteile, die sich direkt in nachhaltig reduzierten Produktionskosten ausdrücken. Induktiv wärmebehandelte Langprodukte weisen sowohl eine hohe Festigkeit und homogene Härteverteilung auf, als auch eine ausgezeichnete Geradheit ohne zusätzliche mechanische Richtprozesse. Dabei ist eine induktive Quench & Temper-Anlage im Vergleich zu herkömmlichen Verbrennungsöfen nicht nur schnell und einfach zu installieren sowie flexibel auf unterschiedliche Produktionslose umzurüsten, sondern reduziert durch die energieeffiziente, digitale Arbeitsweise auch nachhaltig den CO₂-Ausstoß der gesamten Produktion.

Ein Plus, das zukünftig immer wichtiger wird.

Nachdem zunächst die Hersteller von hochbelasteten automobilen Sicherheitskomponenten und Maschinenbauer die Vorteile induktiv wärmebehandelter Komponenten zu schätzen gelernt hatten, hat diese Technologie aus den gleichen Gründen in den letzten Jahren zunehmend Anhänger unter den Produzenten von Langprodukten gefunden.

Derzeit werden weltweit mehrere induktive Quench & Temper-Anlagen für Stabstahl, Rohre und die erwähnten Produkte mit gestauchten Enden installiert, da die Betreiber damit deutlich flexibler auf schwankende Marktanforderungen bezüglich der Abnahmemengen als auch der benötigten Qualitäten reagieren können.

Zusammengefasst ist es genau diese Flexibilität auf schnell wechselnde Kundenforderungen zu reagieren, die zukünftig die herkömmlichen Verbrennungsöfen zur konventionellen Wärmebehandlung zunehmend weiter verdrängen wird. Darüber hinaus werden die vorhandenen Reserven an fossilen Brennstoffen immer geringer werden, so dass auch die Exploration schwieriger Vorkommen lohnt. Nur die induktive Vergütung erzeugt heutzutage OCTG-Produkte mit ausreichend hoher Festigkeit, die den extremen Bedingungen standhalten.

AUTOREN



Dr. Guido Opezzo
SMS Elotherm GmbH, Remscheid
Tel.: 02191/ 891-553
g.opezzo@sms-elotherm.de



Dipl.-Wirt.-Ing. Dirk M. Schibisch
SMS Elotherm GmbH, Remscheid
Tel.: 02191/ 891-300
d.schibisch@sms-elotherm.de