

Modulare Wärmebehandlung beim Nitrieren und Niederdruckaufkohlen (Teil 2)

von **Gerald Hiller, Pierre Bertoni, Marco Jost, Olaf Irretier**

Die Vakuumwärmebehandlung und mit ihr das Vakuumhärten hat in den letzten Jahrzehnten eine immer größere Bedeutung erlangt. Ergänzend dazu stellt seit mehr als 30 Jahren die Niederdruckaufkohlung eine Alternative zu den herkömmlichen Verfahren der Aufkohlung dar. Ihre Verwendung, die lange Zeit durch technische und wirtschaftliche Probleme gebremst wurde, hat sich im Laufe der letzten 15 bis 20 Jahre auch in der Serienfertigung weiter etabliert. Neue Überlegungen und Anwendungen bringen nun auch die Verfahren des Nitrierens und Nitrocarburierens mit der modularen Vakuumhärte-technik zusammen. Der dreiteilige Beitrag stellt die grundlegenden Betrachtungen zur Verfahrens- und Anlagentechnik in Verbindung mit den wirtschaftlichen und umweltrelevanten Faktoren vor. Teil 1 hat die Anlagentechnik vorgestellt (PW 5/2020). Im vorliegenden Teil 2 werden die Grundlagen der betrachteten Wärmebehandlungsverfahren erläutert.

Modular heat treatment for nitriding and low-pressure carburising (part 2)

Vacuum heat treatment and especially vacuum hardening is getting more and more important in last decades. Additionally, low-pressure carburising (lpc) is an interesting alternative to standard case hardening for 30 years. Although lpc was limited by technical and economic aspects for a long while, it was established into industrial quantity production in the last 15 to 20 years. Meanwhile new considerations and applications on nitriding and nitrocarburising implement these technologies in combination with the modular vacuum hardness technology in industry production. This contribution (3 parts) introduces the basic technical and economic aspects on this technology and shows furthermore the advantages on environmentally friendly heat treatment. Part 1 presented the heat treatment plants (PW 5/2020). Part 2 at hand deals with the basics of the heat treatment processes.

Die Vakuumwärmebehandlung wie das Niederdruckaufkohlen oder das Löten aber auch das Nitrieren und Nitrocarburieren metallischer Bauteile wird durch die Parameter Zeit, Temperatur, Druck, Atmosphäre und Abschreckung bzw. Abkühlung bestimmt. Im Sinne der verbesserten Bauteilqualität, der Energieeffizienz als auch der Wirtschaftlichkeit können diese Prozessgrößen entsprechend an die Anforderungen angepasst und optimiert werden. Hier kommt der Industriefertigung nun die entscheidende Aufgabe zu, die Zielgrößen des Wärmebehandlungsprozesses, d. h. wirtschaftliche Herstellung eines

auf eine bestimmte Weise behandelten Bauteils unter dem Gesichtspunkt der Eignung und Einsatzmöglichkeit sowie der maximalen Lebensdauer, zu unterstützen.

Grundlagen der betrachteten Wärmebehandlungsverfahren

Nitrieren und Nitrocarburieren

Oberflächen- und Randschichthärtungen sind von hoher, wertschöpfender Bedeutung für die moderne Fertigung. Eine Steigerung der Randhärte bietet dem Konstrukteur

die Möglichkeit, Verschleiß zu minimieren, die Performance der Bauteile entscheidend zu verbessern sowie Gewichte bei gleicher Leistungsfähigkeit zu reduzieren. In der Praxis haben sich einige thermochemische Diffusionsverfahren etabliert, um eine große Vielfalt von Bauteilen aus unterschiedlichsten Werkstoffen für verschiedenste Anwendungsbereiche im Maschinen- und Anlagenbau, Automobilbau, Werkzeug- und Getriebebau zu härten. Zu den bedeutendsten thermochemischen Verfahren gehören das Einsatzhärten und Carbonitrieren sowie das Nitrieren und Nitrocarburieren. Gemessen am Marktvolumen hat das Einsatzhärten zwar den weitaus größten Anteil, jedoch haben Nitrierverfahren in den vergangenen Jahren stetig an Bedeutung zugenommen.

Bei den Verfahren des Einsatzhärtens wird der Kohlenstoffgehalt der Randschicht der Bauteile durch Aufkohlen in einer Gasatmosphäre oder mittels Vakuumtechnologie (LPC) angehoben, um die Werkstoffe in diesem Bereich durch Abschreckung in flüssigen Medien oder mittels Hochdruckgasabschreckung härten zu können. Die Härtung beruht hier auf dem Mechanismus der Martensitbildung. Der Kohlenstoff wird oberhalb der Ac3-Temperatur im Gefüge interstitiell in Lösung gebracht. Beim nachfolgenden Abschreckvorgang bildet sich der Martensit durch Umklappen der Gitterstruktur vom kubisch flächenzentrierten Austenit in die kubisch raumzentrierte Gefügestruktur. Der Kohlenstoff hat aufgrund der relativ hohen Abschreckgeschwindigkeit nicht genügend Zeit aus dem Gitter heraus zu diffundieren. Die damit einhergehende Verzerrung der Gitterstruktur führt zu erhöhten Druckeigenstressungen im Gefüge, die ursächlich für die Härtesteigerung sind. Für die Härtesteigerung beim Nitrieren ist hingegen nicht die Martensitbildung, sondern der Mechanismus der Ausscheidungshärtung verantwortlich. Der Härteträger ist nicht der Kohlenstoff, sondern der Stickstoff. Die Härtung erfolgt dabei durch Diffusion von Stickstoff in die Randschicht und anschließender Nitridbildung mit den Legierungselementen des Stahls, z. B. mit Aluminium, Chrom, Molybdän, Vanadium, Mangan oder Silizium. Der Ausscheidungsvorgang der Nitride und Karbonitride wird durch die abnehmende Löslichkeit des Stickstoffs bei der Abkühlung noch unterstützt.

Das Nitrieren erfolgt bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen unterhalb der Ac1-Temperatur. Übliche Nitriertemperaturen bewegen sich im Bereich von etwa 500-530 °C. Die Abkühlraten sind i. d. R. eher moderat (Ofenabkühlung). Da die Behandlung nicht mit einer Phasenumwandlung einhergeht und in der Regel eine schroffe Abkühlung (Abschreckung) vermieden wird, tritt auch kein Abschreckverzug auf. Die Nitrierhärtung ist daher ein sehr verzugsarmes Oberflächenhärteverfahren. Auch die Gefahr von Härterissen ist durch die fehlende Abschreckung nicht gegeben. **Tabelle 1** fasst die Eigenschaften von Nitrierschichten zusammen.

Tabelle 1: Eigenschaften Nitrierschichten

Nitrierschicht	
Vorteile	Nachteile
Hohe Härte und Festigkeit	
Hohe Dauerschwingfestigkeit	Relativ dünne Schichten
Gute Gleiteigenschaften	Geringe Zähigkeit und hohe Empfindlichkeit bei Stoßbelastung
Hohe Temperaturbeständigkeit	

Durch die nitrierte, verschleißfeste Oberfläche verbessert sich neben der Verschleißbeständigkeit gegen abrasiven und adhäsiven Verschleiß die Gleiteigenschaft der Oberfläche und die Dauerschwingfestigkeit der Bauteile. Die Oberflächenhärten sind sehr stark werkstoffabhängig. Bei Vergütungs- und Nitrierstählen liegen übliche Härtewerte je nach Vergütungsfestigkeit und Legierungsgehalt zwischen 550 und 850 HV, bei Al-legierten Güten sogar über 1.000 HV. Auch typische Einsatzstähle wie der 16MnCr5 / 20MnCr5 oder der 18CrNiMo7-6 sind aufgrund der vorhandenen Gehalte an Nitridbildnern sehr gut nitrierbar und erreichen recht hohe Härtewerte im Bereich von 700-800 HV. Bei höher legierten Stählen, z. B. bei einigen Werkzeugstählen oder bei rostfreien Stählen, werden je nach chemischer Zusammensetzung sogar Härtewerte von deutlich mehr als 1.000 HV erzielt.

Nitrierschichten sind zudem bis etwa 400 °C dauerhaft temperaturbeständig. Die vergleichsweise geringe Behandlungstemperatur, die einerseits die Verzugarmut bedingt, wirkt sich nachteilig auf die Behandlungszeiten und die einstellbaren Härtetiefen aus. Da die Diffusionsgeschwindigkeit des Stickstoffs auf dem Temperaturniveau von Nitrierbehandlungen vergleichsweise gering ist, sind die Haltezeiten relativ lang und die erreichbaren Nitrierhärtetiefen begrenzt. Übliche Haltezeiten betragen einige Stunden bis zu mehreren Tagen. **Bild 1** veranschaulicht den Aufbau einer Nitrierschicht.

Eine Nitrierschicht besteht aus einer Verbindungsschicht an der Oberfläche, die in der Regel nicht über 20 µm stark ist, und aus der Diffusionszone, in der sich die Nitride ausscheiden. Die Verbindungsschicht kann aus zwei Phasen bestehen, die unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Klassisch bildet sich beim Nitrieren zur Oberfläche hin die sogenannte ε-Phase (Fe_{2,3}N) aus, zum Werkstoffinneren hin die stickstoffärmere γ'-Phase (Fe₄N). Da die Kristallstruktur und der Stickstoffgehalt der beiden Phasen unterschiedlich ist, haben sie auch unterschiedliche Eigenschaften (**Bild 2**).

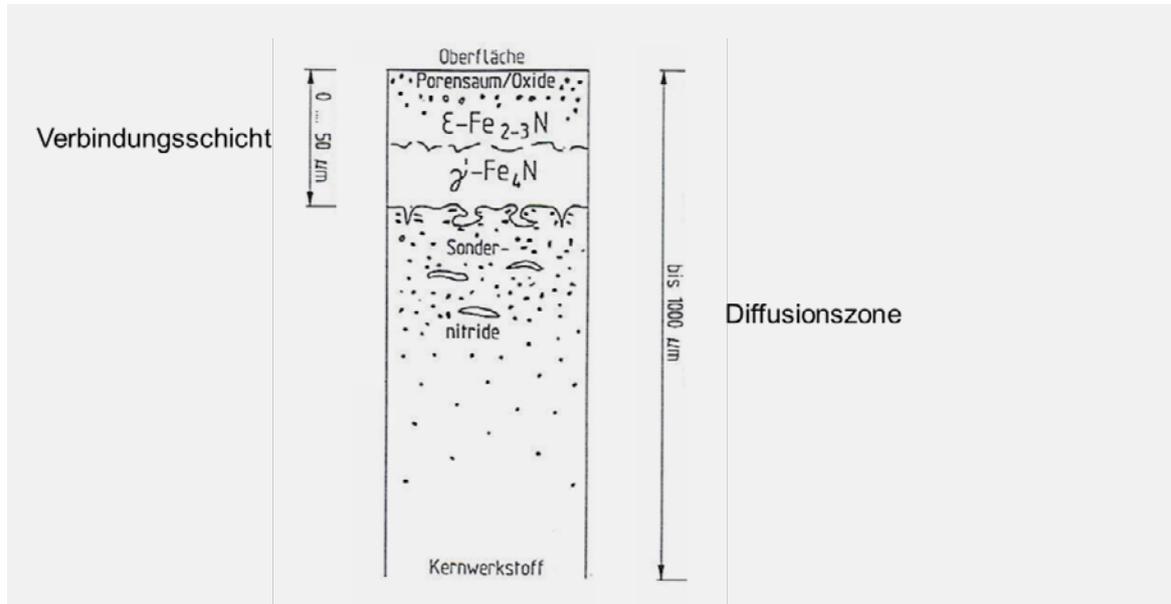
Die ε-Phase ist deutlich härter als γ'-Phase und weist deutlich bessere Gleiteigenschaften auf. Auf der anderen Seite ist die γ'-Phase wesentlich duktiler, wodurch zum Beispiel die Rissneigung bei Belastung vergleichsweise gerin-

ger ist. Heute ist es möglich, die Dicke sowie den Aufbau der Verbindungsschicht über die Regelung definiert zu beeinflussen und so an die Anforderungen der Bauteilbelastung anzupassen.

Die Nitrierhärte geht mit dem Stickstoffkonzentrationsprofil bzw. mit der Ausbildung der Diffusionszone, die auch als Ausscheidungszone bezeichnet wird, einher. Die einstellbare Nitrierhärte ist stark werkstoffabhängig und beträgt in der Regel einige Zehntel bis maximal einen Millimeter. So werden beispielsweise bei Vergütungs- und Nitrierstählen je nach Anforderung Nitrierhärte im Bereich von 0,2-0,6 mm eingestellt. Die Duktilität der Nitrierschicht, insbesondere der Verbindungsschicht, ist relativ gering. Die Stoß- sowie die Thermoschockempfindlichkeit ist recht hoch, wodurch bei entsprechender Beanspruchung die Neigung zur Rissbildung ausgehend von der Oberfläche ansteigt.

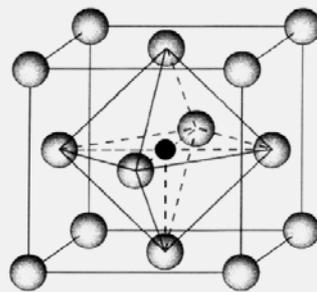
Nitrieren vs. Nitrocarburieren

Die Ausbildung der Diffusionszone ist beim Nitrieren bei den meisten Anwendungsfällen primär, da die damit einhergehende Nitrierhärte als tragende Schicht den Verschleißschutz gewährleistet. Beim Nitrieren wird bei vielen Anwendungsfällen versucht, die Verbindungsschichtbildung zu minimieren und in engen Grenzen zu halten. Dies gilt insbesondere, wenn das Bauteil im Einsatz höheren Flächenpressungen ausgesetzt ist. Die Bestrebung, möglichst verbindungs-schichtarm zu nitrieren, basiert auf der geringen Zähigkeit der Verbindungsschicht. Um eine möglichst hohe Duktilität der Schicht zu erreichen, wird oftmals die Bildung einer möglichst monophasigen γ' -Phase angestrebt und gleichzeitig die Dicke der Verbindungsschicht auf beispielsweise



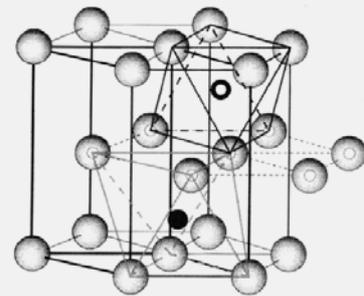
Quelle: Lerche

Bild 1: Aufbau Nitrierschicht (W. Lerche)



γ' -Nitrid (Fe_4N)

- kubisch-flächenzentriertes Gitter
- ferromagnetisch
- N-Löslichkeit 5,7-6,1 %N
- C-Löslichkeit < 0,2 %C
- weicher und zäher als ϵ



ϵ -Nitrid ($Fe_{2-3}N$)

- hexagonale Gitterstruktur
- ferromagnetisch
- N-Löslichkeit 7,7-11,1 %N
- C-Löslichkeit 2-3 %C
- härter und spröder als γ'

Bild 2: Kristallstruktur und Eigenschaften der ϵ -Phase ($Fe_{2-3}N$), zum Werkstoffinneren hin die stickstoffärmere γ' -Phase

max. 5 oder 10 μm begrenzt. Zusätzlich können die Zähigkeitseigenschaften in der Diffusionszone unter Umständen noch durch eine Erhöhung der Abkühlgeschwindigkeit optimiert werden. Die Zunahme der Abkühlgeschwindigkeit geht mit einer feindisperseren Nitridausscheidung einher, was sich positiv auf die Duktilität der Schicht auswirkt.

Eine Variante des Nitrierens ist das Nitrocarburieren. Beim Nitrocarburieren wird der Atmosphäre zur gezielten Erzeugung einer verschleißbeständigen Verbindungsschicht neben dem Behandlungsgas Ammoniak (NH_3) ein Kohlenstoffspendergas wie CO_2 oder CH_4 zugesetzt.

Die Behandlungstemperatur liegt mit ca. 580 °C höher als beim Nitrieren. Die Haltezeiten betragen üblicherweise nur einige Stunden und sind somit oftmals deutlich kürzer als bei den reinen Nitrierbehandlungen. Das Nitrocarburieren kann daher eine vergleichsweise kostengünstige Alternative zum Nitrieren sein, sofern die erzielten Schichteigenschaften für das Belastungsprofil des Bauteils ausreichend sind. Während bei den Nitrierverfahren wie geschildert meist die Ausbildung der Diffusionszone im Vordergrund steht, liegt der Schwerpunkt beim Nitrocarburieren in der Regel auf der Verbindungsschichtbildung. Die Ausbildung der Diffusionszone ist beim Nitrocarburieren oftmals von untergeordneter Bedeutung. Ziel ist die Bildung einer weitgehend monophasigen ϵ -Verbindungsschicht (Fe_{2-3}N), die eine hohe Härte, gute Gleit- und Korrosionsschutzeigenschaften aufweist. Die Dicke der Verbindungsschicht ist in Grenzen einstellbar und liegt normalerweise je nach Anwendungsfall und Werkstoff bei 5 bis 20 μm . Nitrocarburierverfahren werden aus unterschiedlichen Gründen eingesetzt. Sie finden zum Beispiel Anwendung bei Bauteilen aus unlegierten Stählen (z. B. bei Stanzteilen), bei denen aufgrund fehlender Nitridbildner allein durch eine Nitrierbehandlung keine wesentliche Härtesteigerung erzielt werden kann. Zudem ist das Nitrocarburieren immer dann interessant, wenn reiner Gleitverschleiß ohne großen Flächenpressungen unter den Einsatzbedingungen auftritt. Auch bei sehr dünnwandigen und bei verzugempfindlichen Bauteilen kann das Nitrocarburieren eine gute Alternative zum Nitrieren darstellen. In einigen Anwendungsfällen wird das Nitrocarburieren neben der Härtesteigerung der Randschicht auch zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit durchgeführt, wobei die Korrosionsbeständigkeit der ϵ -Verbindungsschicht noch durch eine Nachoxidationsbehandlung verbessert werden kann.

Moderne Nitrieranlagen arbeiten beim Nitrieren und beim Nitrocarburieren mit einer sogenannten Nitrierkennzahlregelung auf Basis einer Wasserstoffsondenmessung, die den Zerfallsgrad des Ammoniaks im Behandlungsraum der Anlage bestimmt und die Frischgaszufuhr der Behandlungsgase gemäß den entsprechenden Vorgaben definiert ausregelt. Mithilfe dieser Regelungen ist es heute möglich, neben der Nitrierhärte die Tiefe den Aufbau der Nitrierschicht, insbesondere im Hinblick auf die Dicke und die Phasenstruktur der Verbindungsschicht, zu beeinflussen und je nach Anforderung definiert an die Bauteilbeanspruchung einzustellen. Somit kann die Schicht durch eine definierte Nitrier- oder Nitrocarburierbehandlung an die Anforderungen an den Verschleißschutz angepasst werden.

Einsatzhärten und Niederdruckaufkohlung

Das Einsatzhärten ist ein thermochemisches Wärmebehandlungsverfahren, welches aus den Teilschritten bzw. Prozessen (1) Aufkohlen, (2) Härten durch Abschrecken

der Bauteile und (3) finalem Anlassen eines Bauteils aus Stahl besteht, um die Bauteileigenschaften und hier insbesondere die Oberflächenhärte durch Martensitbildung zu verbessern bzw. zu steigern.

Dabei wird mit dem Ziel des Einsatzhärtens ein weicher und dem Ursprung entsprechenden duktilen Kern mit vergleichsweise harter Bauteiloberfläche erreicht. Die Kombination aus weichem Kern und harter Oberfläche wird durch einen thermochemischen Behandlungsvorgang, dem Aufkohlen, erreicht. Weitere Zielgrößen des Verfahrens sind die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften z. B. über Steigerung des Verschleißwiderstandes oder auch Verbesserung der Biegebruchfestigkeit (Erhöhung der Dauerfestigkeit).

Beim Einsatzhärten wird das Werkstück in einer Industrieofenanlage über einen bestimmten Zeitraum und entsprechend hoher Behandlungstemperatur einem Aufkohlungsmedium (fest, flüssig oder gasförmig) ausgesetzt. Durch die thermisch bedingte Diffusion des Kohlenstoffs, d. h. den Platzwechselforgängen der Kohlenstoffatome im Stahlatomgitter, wird die Randschicht mit Kohlenstoff angereichert, sodass sich entsprechend der Diffusionsgesetze ein Kohlenstofftiefenverlauf einstellt, der zum Kern hin abnehmend ist und entsprechend unterhalb eines Grenzwertes – der Aufkohlungstiefe – gemäß der Legierungszusammensetzung seinen ursprünglichen Basiskohlenstoffgehalt beibehält. Die bei der Aufkohlung entsprechend dem Kohlenstofftiefenverlauf eingestellten charakteristischen Größen sind Aufkohlungstiefe und Randkohlenstoffgehalt. Die Aufkohlungstiefe und der Randkohlenstoffgehalt werden prozessbedingt und hinsichtlich der gewünschten Bauteileigenschaften und der Bauteilgeometrie eingestellt und betragen in der Regel zwischen 0,1 und 5,0 mm (AT) bzw. 0,5 bis 0,8 Masse-% Kohlenstoff. Gemäß DIN EN 10052 wird als Aufkohlungstiefe der Randabstand von der aufgekohlten Werkstückoberfläche festgelegt, bei dem der Kohlenstoffgehalt den festgelegten Grenzwert von üblicherweise $C = 0,35\%$ erreicht hat. Für den Praktiker gilt hier die grobe Abschätzung/Faustformel, dass eine Aufkohlung über einen Zeitraum von 4 h bei 930 °C eine Aufkohlungstiefe von etwa 1 mm ergibt.

Der Aufkohlungsprozess des Stahls erfolgt entsprechend der Kohlenstoffkonzentration in der sogenannten Austenitphase, d. h. einer Gitterstruktur (kubisch-flächenzentriert) des Stahls, in der eine hohe Diffusionsgeschwindigkeit der Kohlenstoffatome mit zusätzlich hoher Kohlenstofflöslichkeit im Stahl vorliegt. Dieses ist gemäß dem Eisen-Kohlstoff-Diagramm oberhalb des Austenit-Umwandlungspunktes (Ac3) bei Temperaturen zwischen 880 und 950 °C gegeben (siehe hierzu auch Folge 1 „Grundlagen und Anwendungen von Wärmebehandlungs- und Härteverfahren/M. Jost“ in der PROZESSWÄRME Ausgabe 1/2018).

Zur Verwendung kommen dabei in der Regel sogenannte Einsatzstähle, d. h. unlegierte oder niedriglegierte

Stähle, die Kohlenstoffgehalte von 0,10 bis 0,20 % aufweisen (z. B. 16MnCr5, 20MnCr5, 17CrNiMo6). Mit diesem verhältnismäßig geringen Kohlenstoffgehalt können diese Stähle ohne entsprechendes Einsetzen in einer kohlenstoffhaltigen Atmosphäre und anschließendem Abschrecken keine martensitische Härte und signifikante Festigkeitssteigerung erreichen. Durch das Einsatzhärten dieser Stähle ist dann ein Bauteil zu erzielen, welches im Kern eine hohe Zähigkeit, im Randbereich eine hohe Härte und somit hohe Widerstandsfähigkeit gegen Verschleiß aufweist.

Bei Temperaturen von mehr als 950 °C bis etwa 1.050 °C spricht man vom Hochtemperaturaufkohlen, einem aktuell hinsichtlich der Minimierung der Prozesszeiten und somit der Verbesserung der Wirtschaftlichkeit im Fokus stehenden Verfahren.

Die Aufkohlung von Bauteilen erfolgt in einem Medium bzw. einer Atmosphäre mit der Eigenschaft Kohlenstoff über die Werkstückoberfläche in das Bauteil abzugeben. Entsprechend dem 2. Fickschen Diffusionsgesetz ist es daher erforderlich, dass ein Konzentrationsunterschied im kohlenstoffabgebenden Medium gegenüber der mit Kohlenstoff anzureichernden Oberfläche vorliegt. Aufkohlungsverfahren sind das Pulver- oder Granulataufkohlen (fest), das Salzbad aufkohlen (flüssig) und das Gas aufkohlen (gasförmig). Das Aufkohlen im Vakuum bzw. im Unterdruck mit oder ohne Plasmaunterstützung (Niederdruckaufkohlen) ist das neuartigste der Kohlungsverfahren.

Zudem kann es bauteil- und anwendungstechnisch sinnvoll sein, dass nur bestimmte Bereiche einsatzgehärtet und somit zunächst einmal nur partiell aufgekühlt werden sollen. Beim Salzbad aufkohlen ist dieser Prozess relativ einfach durch partielles Eintauchen, d. h. kein komplettes Eintauchen in die Salzschmelze durchzuführen. Beim Gas aufkohlen kann ein partielles Aufkohlen demgegenüber nur durch ein Abdecken der nicht aufzukohlenden Bereiche, z. B. durch Auftragen einer Abdeck- oder Härteschutzpaste, erreicht werden. Auch in Gewindegängen kann es sinnvoll sein, eine Aufkohlung zu vermeiden, um Versprödung des Gewindes zu vermeiden.

Um die beim Einsatzhärten gewünschte martensitische Härtung zu erreichen, ist es erforderlich, dass ein Bauteil nach dem Aufkohlen oberhalb der sogenannten kritischen Abkühlgeschwindigkeit abgeschreckt wird. Die kritische Abkühlgeschwindigkeit hängt dabei von der Werkstoffzusammensetzung, d. h. von der Legierung des verwendeten Stahls ab. Bei Überschreiten der sogenannten unteren kritischen Abkühlungsgeschwindigkeit entsteht erstmals Martensit, beim Erreichen der oberen kritischen Abkühlungsgeschwindigkeit besteht das resultierende Härtungsgefüge aus etwa 99 % Martensit. Die Umwandlung in das martensitische Härtungsgefüge beginnt mit Erreichen der Martensitstart- und endet mit Erreichen der Martensitfinish-Temperatur.

Bei Kohlenstoff-Konzentrationen von größer als 0,6 % ist beim Härten grundsätzlich mit sogenanntem Restaustenit zu rechnen, da die Martensitfinish-Temperatur bei diesen Bauteilen unterhalb der Raumtemperatur liegt und somit der Austenit nicht komplett in Martensit umgewandelt werden kann. Die weitere Umwandlung des Restaustenits kann und sollte durch sogenannte Tiefkühlung erreicht werden, da ansonsten zeitlich verzögert und nicht selten ungewollt und unkontrolliert diese Umwandlung unter Umständen im späteren Einbauzustand erfolgen kann. Die Restaustenitumwandlung ist mit einer Volumenvergrößerung und somit signifikanten Spannungen im Bauteil verbunden, welche zu Maß- und Formänderungen und schlussendlich Rissen und Bauteilversagen führen können.

Dieser Abschreckvorgang kann in unterschiedlichen Medien durchgeführt werden. Zum einen kann als Abschreckmedium Wasser verwendet werden, welches in der Regel mit entsprechenden chemischen Zusätzen ergänzt wird, um die Oberflächenspannung des Wassers und somit das Auftreten des sogenannten Leidenfrost-Phänomens (isolierende Dampfhaut auf Bauteiloberfläche beim Abschrecken) zu unterdrücken. Weitere Abschreckmedien sind Öl, Salzbad, wässrige Polymerlösungen, Luft oder Gase, wie z. B. Stickstoff (N₂) oder Argon (Ar) (Vakuumbhärtungen). Das am meisten verbreitete Verfahren ist jedoch das Abschrecken in Öl.

Nach dem Abschreckvorgang ist der Stahl sehr hart (Ansprunghärte oder glashart) und spröde und für technische Anwendungen in der Regel so nicht zu gebrauchen. Daher ist nach dem Abschrecken ein weiterer Glühprozess, das sogenannte Anlassen erforderlich, bei dem der Rand des Bauteils auf die gewünschten Gebrauchseigenschaften wie Härte, Zugfestigkeit oder Zähigkeit eingestellt wird. Dabei kann grundsätzlich festgehalten werden, dass mit zunehmender Anlasstemperatur die Härte ab- und die Zähigkeit zunimmt.

Das Anlassen wird je nach chemischer Zusammensetzung der Legierungen in einem Temperaturbereich von 100 bis 350 °C, bei hochlegierten Stählen bis 600 °C durchgeführt. Einige höher legierte Werkzeugstähle werden nicht mehrfach angelassen, um eine Härtesteigerung durch Bildung des Sekundärhärtemaximums zu erreichen.

Einsatzhärten vs. Niederdruckaufkohlung

Niederdruckaufkohlung in Vakuumöfen bietet eine Reihe an Vorteilen wie z. B. die Vermeidung von Oxidation, die verbesserte Aufkohlungsgleichmäßigkeit und Reproduzierbarkeit, die Reduzierung metallurgischer Toleranzen, wie z. B. Aufkohlungstiefe und Härtesteuerung im Bauteilkern. Zudem steht die Niederdruckaufkohlung im Einklang mit Umweltstandards und reduziert deutlich die Emissionen von CO₂.

Die Reaktionskinetik ist bei der Niederdruckaufkohlung höher als bei herkömmlicher atmosphärischer Aufkohlung, die auf einem CO/CO₂-Gleichgewicht beruht.

Da beim Niederdruckaufkohlungsverfahren der Prozess ohne Kohlenstoffpotential-Regelung betrieben wird, ist in situ eine atmosphärische Kontrolle unnötig und somit das Verfahren einfacher. Die Prozesstemperatur ist zudem höher als bei der atmosphärischen Aufkohlung und beträgt bis zu 1.050 °C. Die Taktzeit kann dadurch gemäß der Diffusionskinetik um bis zu 50 % deutlich reduziert werden.

Im folgenden Teil 3 werden die wirtschaftlichen und umweltrelevanten Faktoren näher betrachtet.

AUTOREN



Gerald Hiller
ECM GmbH
Offenbach-Waldhof
069 / 667788-065
g.hiller@ecmtech-gmbh.de



Pierre Bertoni
ECM Technologies
Grenoble, Frankreich
+33 (0)476 / 4965-60
p.bertoni@ecmtech.fr



Dipl.-Ing. **Marco Jost**
IBW Dr. Irretier GmbH
Düsseldorf
0177 / 23595-36
marco.jost@ibw-irretier.de



Dr.-Ing. **Olaf Irretier**
IBW Dr. Irretier GmbH
Kleve
02821 / 71539-48
olaf.irretier@ibw-irretier.de