

GRUNDLAGEN UND ANWENDUNGEN THERMISCHER VERFAHREN:

In regelmäßiger Folge stellen wir Ihnen physikalische und verfahrenstechnische Grundlagen sowie aktuelle Anwendungsbeispiele industrieller thermischer Verfahren vor.

Folge 4: Einsatzhärten

Einsatzhärten als dominierendes Härtungsverfahren

Das Einsatzhärten ist ein Verfahren, das in vielen Herstellungsprozessen metallischer Bauteile seit Jahrzehnten als das dominierende Härtungsverfahren zum Einsatz kommt. Hinsichtlich der Verfahrenstechnik wird beim Einsatzhärten das Aufkohlen im Salz, die Atmosphärentechnik und die Verfahren der Vakuumtechnik unterschieden.

Physikalische und verfahrenstechnische Grundlagen

Das Einsatzhärten ist ein thermochemisches Diffusionsverfahren zur Härtung der Randschicht von Bauteilen. Dabei wird die Randschicht von kohlenstoffarmen Stählen mit Kohlenstoff (C) angereichert und anschließend martensitisch gehärtet. Auf diese Weise erhalten die Bauteile ein Härteprofil, welches dem zuvor eingestellten C-Konzentrationsverlauf folgt.

Durch das Einsatzhärten wird somit eine harte Bauteilrandschicht mit einer höheren Oberflächenhärte erzielt, während der Kern relativ weich und duktil bleibt. Das Verfahren ermöglicht eine ökonomische Umformung und Zerspanung des weichen Werkstoffes vor der Härtung. Durch die Härtung werden dann die benötigten Festigkeitseigenschaften in der Randschicht sowie weitere Verbesserungen der mechanischen Eigenschaften z. B. über Steigerung des Verschleißwiderstandes oder auch Verbesserung der Wechselfestigkeit (Erhöhung der Dauerfestigkeit) erzielt.

Das Einsatzhärten besteht aus den Teilschritten (1) Aufkohlen, (2) Härten durch Abschrecken und (3) Anlassen.

(1) Der Aufkohlungsprozess

Beim Einsatzhärten wird das Werkstück in einer Industriofenanlage über einen bestimmten Zeitraum und entsprechend hoher Behandlungstemperatur einem Aufkohlungsmittel (fest, flüssig oder gasförmig) ausgesetzt. Durch die thermisch aktivierte Diffusion des Kohlenstoffs wird die Randschicht mit Kohlenstoff angereichert. Je nach Legierung, Kohlungsmittel, Haltedauer und Temperatur stellt sich entsprechend der Diffusionsgesetze ein Kohlenstofftiefenverlauf ein, der zum Kern hin bis auf den Basiskohlenstoffgehalt abfällt. Die bei der Aufkohlung eingestellten charakteristischen Größen sind die Aufkohlungstiefe und der Randkohlenstoffgehalt.

Die Aufkohlungstiefe und der Randkohlenstoffgehalt werden im Hinblick auf die gewünschten Bauteileigenschaften in Grenzen variabel eingestellt und betragen

in der Regel zwischen 0,1 und 5,0 mm (AT) bzw. 0,5 bis 0,7 Masse-% Kohlenstoff. Gemäß DIN ISO 2639 wird als Aufkohlungstiefe der Randabstand von der aufgekohlten Werkstückoberfläche festgelegt, bei dem der Kohlenstoffgehalt den festgelegten Grenzwert von üblicherweise $C = 0,35\%$ erreicht hat. Dies entspricht nach dem Härten einer Grenzhärte von 550 HV. **Bild 1** zeigt, wie die Einsatzhärte tiefe CHD gemäß DIN ISO 2639 ermittelt wird.

In erster Linie ist die Temperatur und Haltedauer maßgebend für die Aufkohlung (**Bild 2**), wobei die Temperatur einen deutlich größeren Einfluss auf die Aufkohlungsgeschwindigkeit ausübt. Für den „Praktiker“ gilt hier die grobe Abschätzung/Faustformel, dass eine Aufkohlung

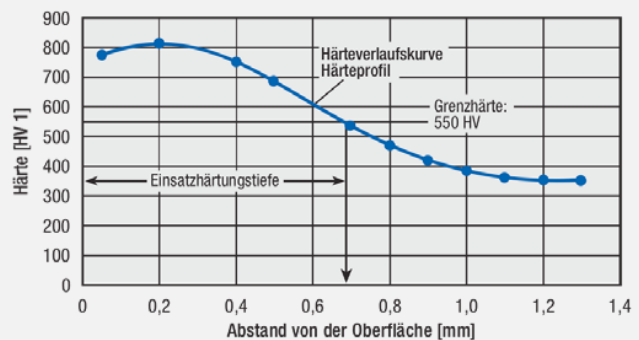


Bild 1: Ermittlung der Einsatzhärte tiefe CHD gemäß DIN EN 10052

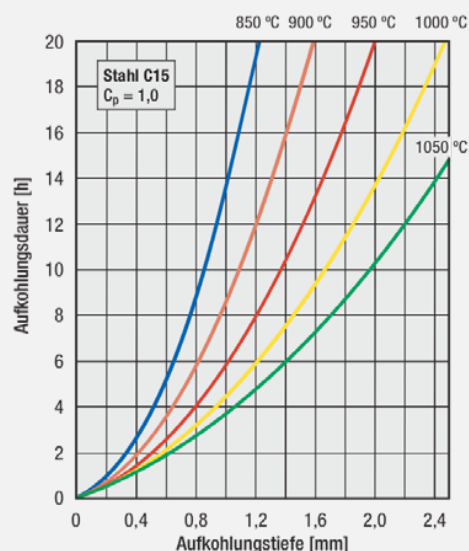


Bild 2: Aufkohlungstiefe in Abhängigkeit von der Aufkohlungsdauer

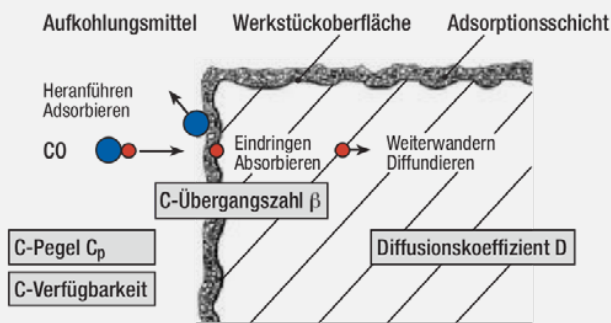


Bild 3: Aufkohlungsprozess

über einen Zeitraum von 4 h bei 950 °C eine Aufkohlungstiefe von etwa 1 mm ergibt.

Der Aufkohlungsprozess des Stahls (Bild 3) erfolgt in Abhängigkeit von seiner Kohlenstoffkonzentration bei relativ hohen Temperaturen, die eine relativ schnelle Diffusion des Kohlenstoffs ermöglichen. Aufgekühlt wird im austenitischen Zustand, in dem eine kubisch-flächenzentrierte Gitterstruktur mit vergleichsweise hoher Kohlenstofflöslichkeit im Stahl vorliegt. Dieses ist gemäß dem Eisen-Kohlenstoff-Diagramm oberhalb des Austenit-Umwandlungspunkt (A_{c3}) bei Temperaturen zwischen 880 und 1.147 °C gegeben [1].

Angewandt wird das Verfahren in der Regel bei den so benannten Einsatzstählen, die Kohlenstoffgehalte von 0,10 bis 0,20 Masse-% aufweisen (z. B. 16MnCr5, 20MnCr5, 17CrNiMo6). Mit diesem verhältnismäßig geringen Kohlenstoffgehalt können diese Stähle ohne ein vorangegangenes Aufkohlen und anschließendes Abschrecken keine ausreichende Härte und signifikante Festigkeitssteigerung

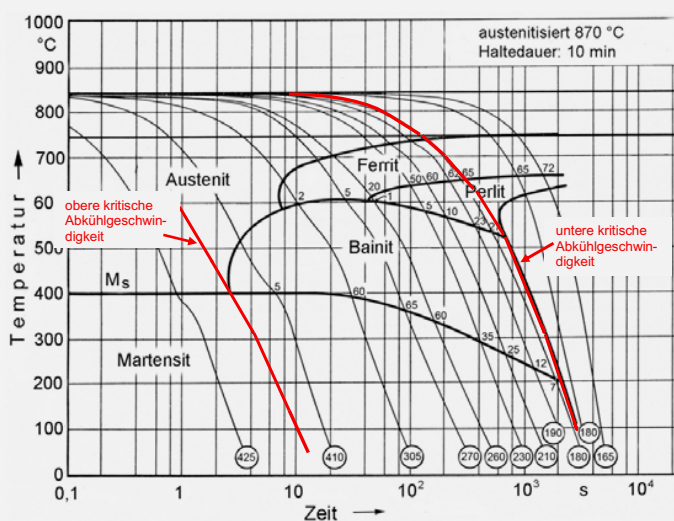


Bild 4: Kritische Abkühlgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt

erreichen. Erst durch das Aufkohlen wird die Randschicht aufhärter, sodass im Randbereich eine hohe Härte und somit eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen Verschleiß bei der Abschreckung erzielt werden kann.

Das Aufkohlen der Werkstücke erfolgt in einem Mittel bzw. einer Atmosphäre, welches Kohlenstoff über die Werkstückoberfläche an das Werkstück abgibt. Entsprechend dem 2. Fickschen Diffusionsgesetz ist es daher erforderlich, dass ein Konzentrationsunterschied im kohlenstoffabgebenden Mittel gegenüber der mit Kohlenstoff anzureichernden Randschicht vorliegt. Zu den Aufkohlungsverfahren zählen das Pulver- oder Granulat-aufkohlen (fest), das Salzbad-aufkohlen (flüssig) und das Gas-aufkohlen (gasförmig). Das Aufkohlen in Vakuumöfen bei Unterdruck mit oder ohne Plasmaunterstützung (Niederdruckaufkohlen), bei dem ebenfalls Gase verwendet werden, ist das neuartigste der Kohlungsverfahren.

Bei Temperaturen von mehr als 950 °C bis etwa 1.050 °C wird in der Praxis vom Hochtemperaturaufkohlen gesprochen, einem aktuell hinsichtlich der Minimierung der Prozessdauer und somit der Verbesserung der Wirtschaftlichkeit im Fokus stehenden Verfahren.

Es kann werkstück- und anwendungstechnisch sinnvoll sein, dass nur bestimmte Bereiche einsatzgehärtet werden und somit „nur“ partiell aufgekühlt werden soll. Beim Salzbad-aufkohlen ist ein Isolieren der Werkstückoberfläche nur durch partielles Eintauchen (kein komplettes Eintauchen in die Salzschnmelze) durchführbar, was prozesstechnisch ungenau und zudem auch nur an den Bauteilenden möglich ist. Beim Gas-aufkohlen kann ein partielles Aufkohlen durch ein Abdecken der nicht aufzukohlenden Bereiche mit einer Abdeck- oder Härteschutzpaste erreicht werden. Auch in Gewindegängen kann es sinnvoll sein, eine Aufkohlung und somit eine Versprödung des Gewindes zu vermeiden.

(2) Der Abschreckvorgang

Um die beim Einsatzhärten gewünschte martensitische Härtung zu erreichen, ist es erforderlich, dass ein Werkstück nach dem Aufkohlen mit einer Mindestgeschwindigkeit abgekühlt wird. Dabei wird zwischen einer oberen und einer unteren kritischen Abkühlgeschwindigkeit unterschieden. Wird nur die untere kritische Geschwindigkeit erreicht, ergibt sich ein Gefüge mit geringem Gehalt an Martensit. Erst bei Erreichen der oberen kritischen Abkühlgeschwindigkeit kann mit einem vollmartensitischen Härtinggefüge gerechnet werden. Entsprechende Daten können aus den spezifischen Umwandlungsschaubildern der verschiedenen Stähle entnommen werden (Bild 4).

Die Umwandlung in das martensitische Härtinggefüge beginnt mit Erreichen der Martensitstart- und endet bei der Martensitfinish-Temperatur (Bild 5). Bei Kohlenstoffkonzentrationen von größer 0,6 Masse-% ist beim Härten grundsätzlich mit dem Verbleib von sog. Restaustenit im

Gefüge zu rechnen, da die Martensitfinish-Temperatur bei diesem C-Gehalt unterhalb der Raumtemperatur liegt und somit der Austenit sich beim Abschrecken nicht komplett in Martensit umwandelt. Die vollständige Umwandlung des Restaustenits kann ggf. durch eine Tiefkühlen erreicht werden. Bei hohen Restaustenitgehalten besteht die Gefahr der zeitlich verzögerten und nicht selten ungewollt und unkontrollierten Restaustenitumwandlung. Die Umwandlung von Restaustenit in nicht angelassenen, relativ spröden Martensit ist mit einer Volumenvergrößerung verbunden. Dies ist ggf. mit signifikanten Spannungen im Bauteil verbunden, welche zu unzulässigen Maß- und Formänderungen und im Extremfall zu Rissen und Bauteilversagen führen können.

Der Abschreckvorgang kann in unterschiedlichen Mitteln durchgeführt werden. Zum einen kann Wasser verwendet werden, dem bestimmte Zusätze beigegeben werden, um die Oberflächenspannung des Wassers und somit das Auftreten des so bezeichneten Leidenfrost-Phänomens (isolierende Dampfhaut auf Bauteiloberfläche beim Abschrecken) zu unterdrücken. Weitere Abschreckmittel sind Öl, Salzschnmelzen, wässrige Polymerlösungen, Luft oder Gase, z. B. Stickstoff (N_2) oder Argon (Ar) (Vakuümhärten). Das am meisten verbreitete Verfahren ist jedoch das Abschrecken in Öl (**Bild 6**).

(3) Das Anlassen

Nach dem Abschreckvorgang ist der Stahl sehr hart (Ansprunghärte oder „glashart“). Er ist in diesem Zustand jedoch so spröde, dass die gehärteten Teile so für technische Anwendungen in der Regel nicht eingesetzt werden können. Daher ist nach dem Abschrecken ein weiterer Prozess, das so bezeichnete Anlassen erforderlich, bei dem in der Randschicht des Werkstücks die gewünschten Gebrauchseigenschaften wie Härte, Zugfestigkeit oder Zähigkeit eingestellt werden. Dabei nimmt mit zunehmender Anlasstemperatur die Härte ab und die Zähigkeit überproportional zu.

Bedeutung im Automobilbau

Das Einsatzhärten ist das dominante Verfahren zur Steigerung der Lebensdauer von Antriebs- und Getriebeteilen. Da durch das Einsatzhärten insbesondere die Funktionseigenschaften dieser Bauteile wie Verschleißwiderstand und Schwingfestigkeit wesentlich verbessert werden, ist dieses Wärmebehandlungsverfahren aus dem Automobilbau nicht wegzudenken, zumal in diesem Bereich große Stückzahlen und komplexe Bauteilgeometrie vorliegen. Daher ist es fertigungstechnisch sinnvoll, ein leicht zu bearbeitendes Ausgangsmaterial zu verwenden (gute spanende Bearbeitbarkeit), das sich zudem auch ergänzend gut umformen lässt, was durch entsprechenden Einsatzstähle gegeben ist.

Aktuelle und zukünftige Entwicklungen

In den letzten Jahren sind eine Reihe neuer Verfahrens- und Anlagenentwicklungen entstanden. Beispielhaft ist hier das

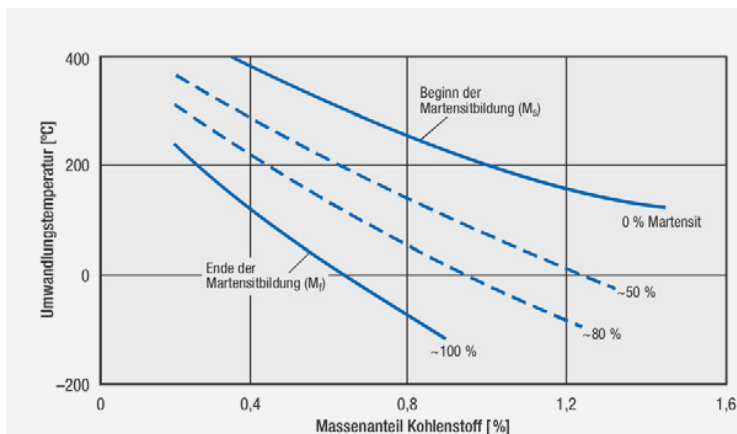


Bild 5: Martensitstart- und Martensitfinish-Temperatur in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt

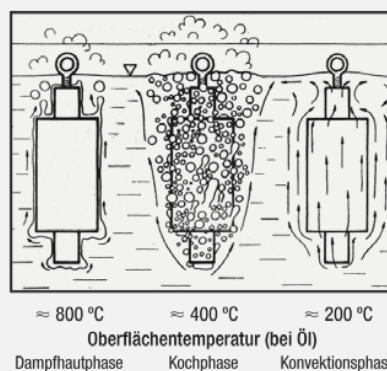


Bild 6: Die drei beim Abkühlen in flüssigen Mitteln auftretenden Phasen des Abkühlvorgangs (K.H. Kopicetz)

Aufkohlen im Vakuum (Niederdruckaufkohlen) mit diversen anlagentechnischen Neuerungen und das Aufkohlen mit anschließendem Press- und Fixturhärten zu nennen. Beide Verfahren werden in zukünftigen Ausgaben der PROZESS-WÄRME vorgestellt.

LITERATUR

- [1] Horstmann, D.: Das Zustandsschaubild Eisen-Kohlenstoff. 5. Auflage. Verlag Stahl-Eisen, 1985
- [2] Merkblatt 452 „Einsatzhärten“ Ausgabe 2008, ISSN 0175-2006. Herausgeber: Wirtschaftsvereinigung Stahl. Autor: Dr.-Ing. Dieter Liedtke
- [3] DIN EN 10084 Einsatzstähle – Technische Lieferbedingungen; Deutsche Fassung EN 10084:2008, Juni 2008
- [4] DIN EN ISO 2639: Bestimmung und Prüfung der Einsatzhärtungstiefe. Deutsche Fassung EN ISO 2639:2002

AUTOR



Dr.-Ing. **Olaf Irretier**
IBW Dr. Irretier GmbH
Kleve
Tel.: 02821 / 7153948
olaf.irretier@ibw-irretier.de