

Bainitisieren - eine Maßnahme zur Einsatzoptimierung von hochfesten Bauteilen

Austempering - a Measure to Optimize the Usability of High-Strength Components

Dr.-Ing. Peter Sommer

By Dr.-Ing. Peter Sommer



Von den Hightech-Anwendungen der Luft- und Raumfahrt werden ausgewählte und speziell entwickelte Werkstoffe und Fertigungstechniken geradezu als selbstverständlich vorausgesetzt. Vielfach wird jedoch übersehen, dass Gebrauchsgegenstände des täglichen Lebens mitunter ebenfalls nur dann erfolgreich eingesetzt werden können, wenn die verwendeten Werkstoffe, die Fertigungsverfahren und die Wärmebehandlung einsetz- und kostenoptimiert entwickelt und dokumentiert wurden und eine konstante Fertigungsqualität auch in großen Serien möglich ist. Am Beispiel des Bainitisierens soll ein praktisches Beispiel für eine derartige Einsatzoptimierung vorgestellt werden.

Es existieren zahlreiche Bauteilanwendungen, bei denen eine hohe Härte und hohe Zähigkeit gleichermaßen gefordert sind. Bereits 1968 berichteten Imelmann, Köstlin und Seghezzi (1) über die günstigeren Schlagzähigkeitseigenschaften von bainitischen Gefügen im Vergleich zu angelassenen martensitischen Gefügen bei jeweils gleicher Härte. Das Bild 1 zeigt diesen Zusammenhang an Setzbolzen, die aus dem Federstahl C67 gefertigt waren. Im Bereich relativ hoher Härte von 52 bis 56 HRC sind die Schlagzähigkeitswerte des bainitisch umgewandelten Gefüges doppelt so hoch wie die martensitischen und angelassenen Gefüge.

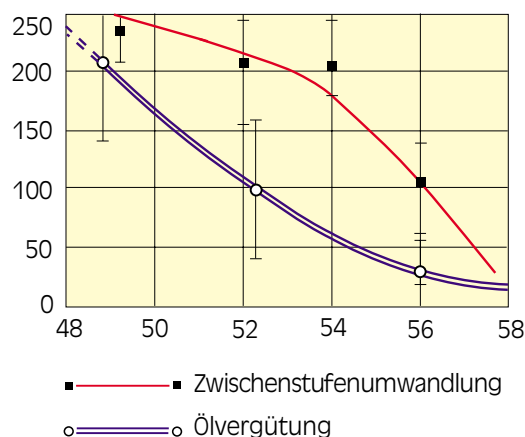
High-tech applications in aviation and space technology virtually take selected and specially developed materials and production techniques for granted. However, in many cases it is overlooked that consumer goods for everyday use can occasionally only be utilized successfully, if the materials they are made of, the production processes and the heat treatment methods have been developed and documented considering the applications and costs and that a constant production quality is assured in high volume production, as well. The following presents a practical example of austempering for such an optimization of usability.

There are numerous component applications demanding equally high levels of hardness and strength. As early as 1968, Imelmann, Köstlin and Seghezzi (1) reported on the more favorable impact resistance properties of bainitic microstructures in comparison to tempered martensitic microstructures at the same respective hardness. Fig. 1 shows this association with the example of powder actuated fasteners made from spring steel C67. In the relatively high hardness range of 52 to 56 HRC the impact resistance values of the bainitic transformed microstructure are twice as high compared to the martensitic and tempered microstructures.

This fundamental association of high strength at simultaneously high hardness has resulted in numerous optimized applications, particularly since the low tendency towards warping provides another favorable characteristic. However, austempering of components is coupled to narrow production limits and cannot be realized with every component. The following metallographic view of the conversion processes are intended to shed more light on this aspect.

Bild 1: Abhängigkeit der Schlagzähigkeit von der Härte für einen Federstahl ähnlich C67 (nach 1)

Fig. 1: Dependence of impact resistance on the hardness for a spring steel similar to C67 (according to 1)



Dieser Grundzusammenhang einer hohen Zähigkeit bei gleichzeitig hoher Härte hat zu zahlreichen Einsatzoptimierungen geführt, zumal die geringe Verzugsneigung ein weiteres günstiges Merkmal liefert. Doch die Bainitisierung von Bauteilen ist an enge Fertigungsgrenzen gekoppelt und lässt sich nicht

Metallography of bainitic transformation

The bainitic transformation takes place below the perlitic and above the martensitic transformation. Therefore, this intermediate temperature range of the microstructure transformation has been known in the past as intermediate stage. Nowadays, this term is no longer used in science and engineering, it has been replaced exclusively by "bainite" or "austempering".

an jedem Bauteil realisieren. Die metallkundliche Betrachtung der Umwandlungsvorgänge soll dies verdeutlichen.

Metallkunde der bainitischen Umwandlung

Die bainitische Umwandlung erfolgt unterhalb der Perlit- und oberhalb der Martensitstufe. Diese temperaturmäßige Zwischenlage der Gefügeumwandlung hat diesem Gefüge früher auch den Namen Zwischenstufe beschert. Heute wird dieser Begriff in der Wissenschaft und Technik nicht mehr verwendet sondern ausschließlich die Begriffe „Bainit“ bzw. „Bainitisieren“.

Die Umwandlung in der Bainitstufe gehört sicherlich zu den am schwierigsten erklärbaren Gefügeumwandlungen des unterkühlten Austenits, da sehr unterschiedliche Ausbildungsformen des Bainits möglich sind. Nach einer entsprechenden Austenitisierung und Abkühlung auf die gewünschte Umwandlungstemperatur beginnt die Umwandlung mit einer Kohlenstoffdiffusion im Austenit unter Bildung von Carbiden. Als eine isothermische Bainitumwandlung wird dabei verstanden, wenn dieser Prozess erst nach Erreichen der jeweiligen Umwandlungstemperatur einsetzt, ohne dass es zu vorgelagerten Umwandlungen bei höheren Temperaturen gekommen ist. In Bild 2 ist eine entsprechende Temperatur-Zeit-Folge in einem isothermischen ZTU-Schaubild dargestellt. Dabei ist für technische Anwendungen insbesondere die bainitische Umwandlung dicht oberhalb der Martensitstarttemperatur interessant, da sich mit diesem Bainit die günstigsten Eigenschaftskombinationen erzielen lassen.

Der charakteristische S-förmige zeitliche Verlauf der Bainitbildung gehorcht einer Avrami-Funktion, die in Bild 3 auch grafisch dargestellt wurde.

$$Y = 1 - \exp(-b \cdot t^n) \quad (\text{Gl. 1})$$

Y = zum Zeitpunkt t
umgewandelte Bainitmenge

t = Zeit

b, n legierungs- und
temperaturabhängige Koeffizienten

Als technischer Umwandlungsbeginn wird die Bildung von 1 % Bainit und als Umwandlungsende das Vorhandensein von nur noch 1 % nicht umgewandelten Austenits festgelegt.

Für eine sachgerechte Bainitumwandlung ist nicht nur die Vermeidung einer vorgelagerten Umwandlung bei höheren Temperaturen erforderlich, sondern auch das vollständige Umwandeln in der Bainitstufe. Ein frühzeitiges Abbrechen der isothermischen Umwandlung vor Erreichen des Umwandlungsendes verursacht ein Mischgefüge aus Bainit und Martensit. Mischgefüge aus Bainit und Perlit bei zu langsamer Abkühlung auf die Umwandlungstemperatur sind ebenso ungünstig wie Mischgefüge aus Bainit und Martensit, die beim Abkühlen nach nicht ausreichend langer

The transformation in the bainite stage surely is one of the most difficult to explain microstructure transformations of under-cooled austenite, since very different structural formations of bainite are possible. After a corresponding austenization and cooling down to the desired transformation temperature the transformation begins with a carbon diffusion in the austenite under formation of carbides. This process is understood as isothermal transformation, if it commences after the respective transformation temperature has been reached, without the occurrence of previous transformations at higher temperatures. Fig. 2 shows a corresponding temperature-time sequence in an isothermal ZTU diagram. In this respect, the bainitic transformation just above the martensitic temperature is of particular interest for technical applications, since the most favorable property combinations can be achieved with this bainite.

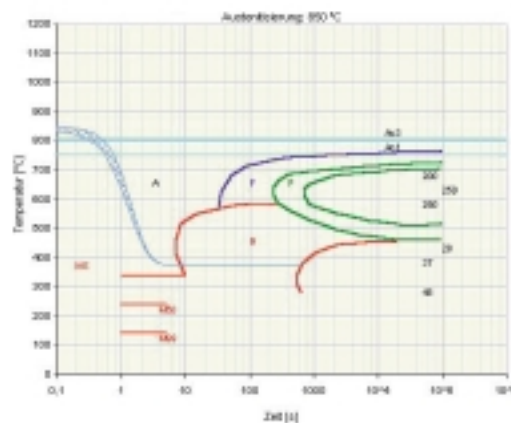


Bild 2: Isothermisches ZTU-Schaubild des Stahles 42CrMo4 mit Temperatur-Zeit-Verlauf einer isothermischen Umwandlung

Fig. 2: Isothermal ZTU diagram of steel 42CrMo4 with temperature-time curve of an isothermal transformation

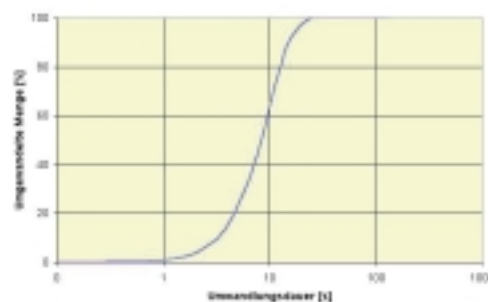


Bild 3: Grafische Darstellung des zeitlichen Umwandlungsverlaufs aus Gl. (1)

Fig. 3: Graphic representation of temporal transformation curve from Gl. (1)

The characteristic S-shaped time curve of bainite formation follows an Avrami function, which is graphically represented in Fig. 3.

$$Y = 1 - \exp(-b \cdot t^n) \quad (\text{Gl. 1})$$

Y = bainite quantity transformed
by time "t".

t = time

b, n = alloy and temperature
dependent coefficients

The technical beginning of transformation is defined as the formation of 1% bainite, while the technical end of transformation is defined as the presence of only 1% of non-transformed austenite.

Bild 4: Typisches Bainitgefüge nach isothermischer Umwandlung dicht oberhalb des Ms-Punktes

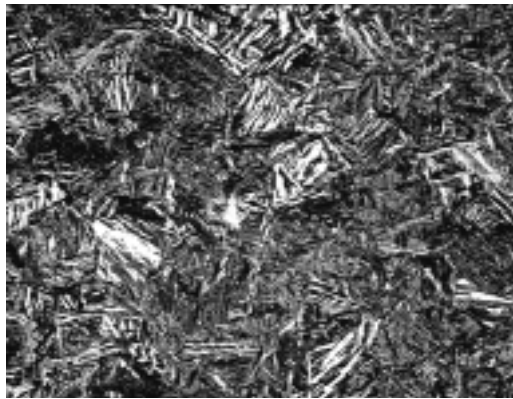


Fig. 4: Typical bainite microstructure after isothermal transformation just above the Ms point

Umwandlungsdauer entstehen. In beiden Fällen sind insbesondere markante Einbußen in den Zähigkeitseigenschaften zu erwarten. Ein vollständig umgewandeltes und optimales Bainitgefüge zeigt das Bild 4.

Analyseneinfluss

Der Kohlenstoffgehalt hat einen deutlichen Einfluss auf die max. Härte des Bainits. So wird mit zunehmendem Kohlenstoffgehalt nicht nur die Härte des Bainits über die höhere Carbidgehaltmenge erhöht, sondern auch über die mögliche Absenkung der Bildungstemperatur. Durch einen zunehmenden Kohlenstoffgehalt sinkt der Martensitstartpunkt, was auch niedrigere Umwandlungstemperaturen erlaubt.

Nachfolgende Tabelle 1 listet die Ms-Punkte für einige unlegierte Stähle mit unterschiedlichen Kohlenstoffgehalten auf.

Stahl	Ms-Punkt	max. Bainithärte
C30	420°C	31 HRC
C45	360°C	44 HRC
C75	210°C	60 HRC
C100	180°C	62 HRC*)

Tabelle 1: Max. Härtewerte für Bainitgefüge in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt

***) Aus dem Zweiphasengebiet Austenit-Carbid abgeschreckt.**

Die max. erreichbaren Härtewerte verändern sich kaum, wenn Stähle mit härteerhöhenden Legierungselementen eingesetzt werden. Härteerhöhende Legierungselemente wie z.B. Chrom führen in erster Linie dazu, dass die Abkühlung auf die isothermische Umwandlungstemperatur umwandlungsfrei durchgeführt werden kann.

Wenn eine ausreichend schnelle Abkühlung aufgrund der Bauteilgeometrie bei einem Standardwerkstoff nicht realisiert werden kann, sind insbesondere Cr-legierte Sonderstähle mit Cr-Gehalten unter 1 % verwendbar.

Zu hohe Gehalte in härteerhöhenden Legierungselementen führen nicht nur zu legierungsspezifischen höheren Werkstoffkosten, sondern auch zu einer markanten Verlängerung der Umwandlungsdauer. Bei manchen Werkstoffen ist ein Ende der Umwandlung in technisch sinnvollen Zeiten überhaupt nicht realisierbar. Bei dem Kugellagerstahl

A correct bainite transformation does not only require the prevention of previous transformation at higher temperatures, but also a complete transformation in the bainite stage. An early break-off of the isothermal transformation prior to the end of the transformation causes a mixed microstructure of bainite and martensite. Mixed microstructures of bainite and perlite, caused by excessively slow cooling to the transformation temperature, are just as unfavorable as mixed microstructures of bainite and martensite, which are created during cooling after insufficient duration of transformation. In both cases, particularly pronounced losses in the strength properties must be expected. A completely transformed and optimal bainite microstructure is shown in Fig. 4.

Analysis influence

The carbon content has a significant influence on the maximum hardness of bainite. Hence, with increasing carbon content not only the hardness of the bainite is increased by the higher carbide volume, but also by a possible reduction of the formation temperature. The martensite starting point drops due to increasing carbon content, which also permits lower transformation temperatures.

The following Table 1 lists the Ms points for some unalloyed steels with different carbon contents.

Steel	Ms Point	Max. Bainite Hardness
C30	420°C	31 HRC
C45	360°C	44 HRC
C75	210°C	60 HRC
C100	180°C	62 HRC*)

Table 1: Max. hardness values for bainite microstructures depending on carbon content

***) Quenched from two-phase range austenite-carbide.**

The maximum achievable hardness values hardly change when steels with hardenability increasing alloying elements are used. Hardenability increasing alloying elements, such as chromium, have the primary effect that cooling down to the isothermal transformation temperature can be performed free from transformation.

If it is not possible to realize sufficiently quick cooling due to the geometry of a component made from a standard material, particularly Cr-alloyed special steels with Cr contents below 1% can be used.

Excessively high contents of hardenability increasing alloying elements lead not only to alloy-specific higher material costs, but also to a pronounced extension of the transformation time. With some materials, the end of transformation cannot be realized at all within a technically sensible time. In case of ball bearing steel 100Cr6, the end of bainite transformation at 280°C is reached after a time of approx. 0.5 h. while with steel 90MnCrV8 at the same temperature the end of transformation is reached only after 7.5 h.

100Cr6 wird das Ende der Bainitumwandlung bei 280°C nach einer Zeit von ca. 0,5 h erreicht, während beim Stahl 90MnCrV8 bei gleicher Temperatur das Umwandlungsende erst nach 7,5 h erreicht wird.

Eine spezielle Werkstoffentwicklung zur Erzielung optimaler Verschleiß- und Zähigkeitseigenschaften stellen die Kugelgraphit-Gusswerkstoffe dar, die auch als ADI-Werkstoffe bezeichnet werden. ADI steht für **a**ustempered – **d**uctile – **i**ron. LKW-Federsättel, Bodenbearbeitungsgeräte aber auch Hochleistungsplanetengeräte werden hieraus gefertigt.

Wärmebehandlungsanlagen

Das Austenitisieren vor dem Bainitisieren unterscheidet sich nicht vom Austenitisieren vor dem Härten. Demnach können alle bekannten Erwärmungssysteme eingesetzt werden.

Die notwendige rasche Abkühlung von der Austenitisierungstemperatur auf die Umwandlungstemperatur lässt für diese Art der Wärmebehandlung allerdings nur ein Abschrecken und Umwandeln in einer Salzschnmelze zu. Dabei sind selbst bei dieser raschen Abkühlung nur relativ dünne Bauteilquerschnitte sicher bainitisch umzuwandeln.

Verwendet werden die bekannten AS-Salze, deren Abkühlungsgeschwindigkeit durch geringe Wasserzusätze noch erhöht werden kann. Diese Abschrecktechnologie wird sowohl bei chargenweise als auch bei kontinuierlich arbeitenden Wärmebehandlungsöfen eingesetzt.

Die Abschreckbäder müssen ausreichend groß dimensioniert sein, damit es beim Abschrecken nicht zu einer unzulässig großen Erwärmung der Salzschnmelze kommen kann. Dies hätte unweigerlich eine Einbuße in der maximal erreichbaren Härte zur Folge.

Bauteile mit bainitisch umgewandelten Gefügen werden nach der Umwandlung nicht mehr angelassen.

Kostenbetrachtung

Eine allgemeine Kostenbetrachtung für das Bainitisieren ist sicherlich nicht sinnvoll, da für die Bauteil-Gesamtkosten nicht nur die Wärmebehandlungskosten von Bedeutung sind. Die vor- und nachgeschalteten Bearbeitungen müssen in die Bewertung einbezogen werden.

Aus vielen Einzelprojekten ist jedoch bekannt, dass die bainitische Umwandlung auch kostenmäßig eine beachtenswerte Alternative zum konventionellen Härten und Anlassen ist. Die wichtigsten Einsparungen liegen aber gerade nicht in der Wärmebehandlung, weshalb das Verfahren selbst nicht kostengünstiger durchzuführen ist.

Literatur

(1): W. Imelmann, K. Köstlin und H.D. Seghezzi: *Organisation und Qualitätssicherung bei der Wärmebehandlung von Schüttgut. HTM(23) 1968, Seite 226/232.*

Spheroidal graphite cast iron materials, also known as ADI materials, represent a special material development to achieve optimal wearing and strength properties. ADI stands for austempered ductile iron. Truck spring pivot seats, soil processing equipment, but also high-performance planet gears are made from this material.

Heat treatment plants

Austenizing prior to austempering is no different than austenizing prior to hardening. For that reason, all commonly used heating systems are suitable.

However, the necessary rapid cooling down from the austenizing temperature to the transformation temperature only allows quenching and transformation in a molten salt system for this type of heat treatment. In this process, even with rapid cooling down, only relatively thin component cross-sections can be transformed securely.

Well-known AS salts, whose cooling down speed can even be increased by addition of small amounts of water, are used for this purpose. This quenching technology is used in heat treatment furnaces working with batch quantities as well as continuously.

The quenching tanks must be dimensioned sufficiently large in order to prevent any impermissibly high heating of the molten salt during quenching. This would inevitably lead to a reduction in the maximum achievable hardness.

Components with bainitic transformed microstructures do not need to be annealed after the transformation.

Consideration of costs

A general consideration of the costs of austempering does not make much sense, since heat treatment costs are not a major factor in the total costs of a component. The preparation and follow-up processes must also be taken into consideration in the evaluation.

However, experience from many individual projects has shown that bainitic transformation represents a viable alternative to conventional hardening and annealing. However, the most important savings are not achieved in the heat treatment, and for that reason the process itself cannot be performed more cost-efficiently.

Literature

(1): W. Imelmann, K. Köstlin and H.D. Seghezzi: *Organization and Quality Assurance in Heat Treatment of Bulk Material. HTM(23) 1968, Page 226/232*

INFO: 111