

Ist bei verzugsempfindlichen Teilen eine Substitution der Einsatzhärtung durch Nitrieren möglich?

Günter Liebmann

Einleitung. Das als Frage formulierte Thema kann ohne umfangreiche Hinterfragungen, die insbesondere die spezifischen Gebrauchseigenschaften der zur Wärmebehandlung vorgesehenen Bauteile betreffen, kaum zufriedenstellend beantwortet werden.

Mit der steigenden Nachfrage der Kunden nach einer nacharbeitsfreien oder endkonturnahen Wärmebehandlung werden die Lohnwärmebehandler aber immer häufiger mit dieser Frage konfrontiert. Der entscheidende Grund dafür ist die bekannte und immer wieder als hervorragendes Ergebnis ins Feld geführte niedrigere Maß- und Formabweichung beim Nitrieren und Nitrocarburieren im direkten Vergleich mit dem Einsatzhärten und Carbonitrieren.

Maß- und Formänderungen bei der Wärmebehandlung. Grundsätzlich muß zunächst festgehalten werden, daß neben der gewünschten Einstellung von spezifischen Werkstoff und/oder Bauteileigenschaften durch die Wärmebehandlung auch nahezu durchgängig

eine Maß- und Formänderung der Bauteile auftritt. Auch das Einsatzhärten und das Nitrieren bilden hier keine Ausnahme. Als Folge innerer Spannungszustände ergeben sich Abweichungen von der „Sollgeometrie“.

Sie werden summarisch als Verzug negativ registriert und sind in der Großserienfertigung ein entscheidendes Fertigungsproblem, das weltweit die höchsten Zusatzkosten im gesamten Fertigungsablauf verursacht.

Geht es um die Bewertung von Maß- und Formänderungen in Verbindung mit einer Wärmebehandlung, wird in der Regel auch heute noch die Gesamtverantwortung den Wärmebehandlern angelastet.

Es ist bekannt, daß dies nicht richtig ist, findet aber oft wenig Verständnis. Viele Aktivitäten in den USA und in jüngster Zeit auch in Deutschland zielen auf eine gesamtheitliche Lösung des Problems. Ein Lösungsansatz wird in der Bewertung und Betrachtung der Maß- und Formänderungen

Zusammenfassung. Zur Reduzierung von Maß- und Formänderungen kann das Einsatzhärten nicht ohne bauteilbezogene Analysen und gegebenenfalls ergänzende Feldversuche durch das Nitrieren ersetzt werden. Zwei Beispiele aus der Praxis zeigen, daß aber Substitutionen durchaus möglich sind. Erfolgversprechende Ergebnisse werden dann erreicht, wenn eine enge Zusammenarbeit zwischen Bauteilhersteller, Werkstofffachmann und Wärmebehandler zustande kommt.

als „Systemeigenschaft“ gesehen, das heißt, die Beherrschung von Wärmeprozessen muß als komplexes technologisches Gebiet unter Berücksichtigung aller werkstoff-, fertigungs- und wärmebehandlungstechnischen Gesichtspunkte betrachtet werden. Das gilt auch für die Fragestellung, ob und wann eine Substitution der Einsatzhärtung und des Carbonitrierens durch Nitrieren und Nitrocarburieren bei verzugsempfindlichen Werkstücken erfolgversprechend ist. Voraussetzung für eine qualifizierte Entscheidung ist dabei die Kenntnis darüber, welches im spezifischen Fall die entscheidenden verzugsverursachenden Parameter sind und wie auf diese durch die Verfahrenssubstitution mit positivem Ergebnis Einfluß genommen werden kann.

Einsatzhärten und Carbonitrieren.

Das Einsatzhärten ist in der metallverarbeitenden Industrie seit vielen Jahren der vorrangig zur Anwendung kommende Wärmebehandlungsprozeß zur Verbesserung der Funktions- und Gebrauchseigenschaften

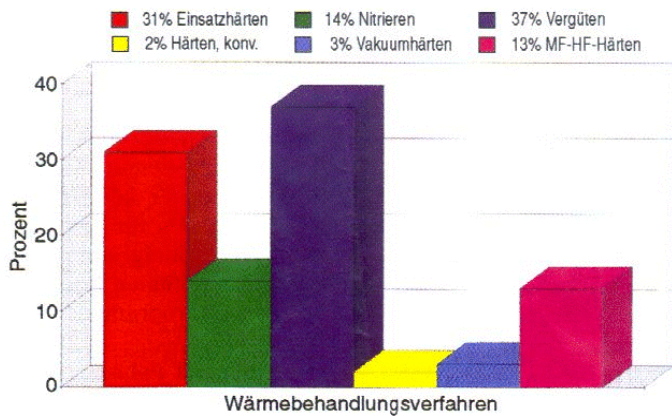


Bild 1. Härtegutdurchsatz der Härterei Reese Weimar im Jahr 2000 gegliedert nach Verfahren

hochbeanspruchter Bauteile im Fahrzeug-, Getriebe-, Motoren- und Maschinenbau. Aus **Bild 1** ist zu entnehmen, daß in der Härterei Reese Weimar im Jahr 2000 31 % des gesamten Härtegutdurchsatzes den Verfahren Einsatzhärten und Carbonitrieren zugeordnet waren. Das deckt sich auch mit Einschätzungen von Edenhofer [1], wonach heute das Einsatzhärten weltweit etwa ein Drittel des Marktanteils aller Wärmebehandlungs-Härteprozesse umfaßt.

Prozeßtechnisch wird zur Erzeugung einer aushärtbaren Randschicht die Bauteiloberfläche mit Kohlenstoff beim Einsatzhärten bzw. mit Kohlenstoff und Stickstoff beim Carbonitrieren gezielt angereichert. Der aktive Prozeß läuft oberhalb A_1 ab. Zur Erzeugung der gewünschten martensitischen Randschicht wird abschließend aus dem Austenitgebiet überkritisch abgeschreckt. Aufgrund dieses Verfahrensablaufs treten Maß- und Formänderungen an den einsatzgehärteten Bauteilen auf, die in der Regel eine spanende Endbearbeitung notwendig machen.

Qualitätsparameter bei der Einsatzhärtung sind die Oberflächenhärte und die Einsatzhärtungstiefe (Eht). In der Praxis sind Einsatzhärtungsschichten von 0,4 bis 3 mm technisch ohne Einschränkungen realisierbar. Bei Einsatzhärtungstiefen > 3 mm sind Verfahrensgrenzen zu beachten. Das Aushärten in der Einsatzhärtungsschicht, in der Höhe durch Anlassen noch variierbar, und der Aufbau von Druckeigenstress in der Randschicht erhöhen die Verschleißfestigkeit, steigern den Widerstand der Bauteiloberfläche gegen Ermüdung und führen zu einer erhöhten Schwingfestigkeit. Die vom Einsatzfall her erforderliche Eht wird im wesentlichen von der zu erwartenden Flächenbelastung der Werkstückoberfläche bestimmt. Bei Wälzverschleißbeanspruchung sollte die Eht

geringfügig größer sein als die Lage des durch die Flächenpressung erzeugten Schubspannungsmaximums in der Randschicht. Für Zahnräder wird die Eht in der Regel modulbezogen festgelegt [2]. Zur Erzielung einer optimalen Dauerschwingfestigkeit sollte sie etwa 15 bis 20 % der Abmaße des maßgebenden Bauteilquerschnitts betragen.

Der Härteverlauf in der Randschicht wird letztlich vom Kohlenstoffverlauf und der Härbarkeit des verwendeten Grundwerkstoffs bestimmt. Das ist insbesondere zu beachten, wenn hohe Kernfestigkeiten gefordert werden. Geeignete Stähle für das Einsatzhärten und Carbonitrieren sind in der DIN 17210 zusammengestellt.

Nitrieren und Nitrocarburieren. Diese Verfahren haben in den letzten 20 Jahren eine rasante Entwicklung genommen. Ursache ist insbesondere, daß mit der industriellen Einführung des Nitrocarburierens zwangsläufig nicht mehr der Einsatz spezieller Nitrierstähle, wie sie in der DIN 17211 zusammengefaßt sind, notwendig ist. Jetzt stehen nahezu alle Eisenwerkstoffe für das Nitrieren/Nitrocarburieren zur Verfügung. Auch Gußeisen mit Lamellengraphit und Kugelgraphit werden erfolgreich nitriert und nitrocarburiert.

In der Härterei Reese Weimar wurden nach **Bild 1** im Jahr 2000 14 % des Härtegutdurchsatzes zum Gasnitrieren und Gasnitrocarburieren eingesteuert. Aus dem zu behandelten Teilesortiment kann abgeleitet werden, daß sich das Nitrieren gegenüber der Einsatzhärtung und anderen Verfahren der Randschichttechnik durch eine relativ große Anwendungsbreite auszeichnet, die aus dem spezifischen Aufbau nitrierter Randschichten resultiert. Typische Anwendungen sind Teile von Getrieben und Motoren aus der Fahrzeugindustrie, Antriebsselemente aus dem

Getriebebau, Spindeln und diverse Verschleißteile aus dem allgemeinen Maschinenbau und der Feinwerktechnik sowie Kalt- und Warmarbeitswerkzeuge und Werkzeuge aus der Kunststoffindustrie.

Prozeßtechnisch wird beim Nitrieren/Nitrocarburieren die Werkstückoberfläche mit Stickstoff bzw. Stickstoff und Kohlenstoff in einem Temperaturbereich von 490 bis 580 °C angereichert. Es entsteht ein Verbundwerkstoff, dessen Eigenschaften von der Nitrier- oder Nitrocarburierschicht in Verbindung mit dem eingesetzten Grundwerkstoff bestimmt werden. Die Schicht setzt sich in der Regel aus einer artfremden Randzone, der Verbindungsschicht (Dicke: 0 bis 30 µm) und einer arteigenen Diffusionsschicht zusammen. Die Verbindungsschicht besteht aus Eisennitrid, Eisencarbonitrid und Zementit (beim Einsatz von legierten Stählen aus Nitriden und Carbonitriden der Legierungselemente) und oberflächennahen Poren (Porensaum). Sie wird durch die arteigene Diffusionsschicht abgestützt, die durch eine Ausscheidungshärtung entsteht. Sie besteht aus Nitriden, Carbonitriden, sekundärem Zementit und gelöstem Stickstoff. In der Praxis sind Diffusionsschichtdicken von 0,2 bis 1,2 mm üblich. Qualitätsrelevante Größen sind die Härte, die Dicke und die Ausbildung der Verbindungsschicht (VS) sowie die Härte und die Dicke der Diffusionsschicht. Abnahmeparameter sind in der Regel nur die Oberflächenhärte (HV1/HV5) und die Nitrierhärte (Nht) nach DIN 50190/Teil 3 und in Ausnahmefällen die Dicke der Verbindungsschicht, deren Härte bis zu 1200 HV0,01 betragen kann. Abhängig vom ausgewählten Matrixwerkstoff und dessen Wärmebehandlungszustand können in der Diffusionsschicht Härten von 350 bis 1100 HV1 erreicht werden. Aus dem 2-schichtigen Aufbau der Nitrierschichten resultieren Eigenschaften, die das Gebrauchsverhalten nitrierter Bauteile in vielfältiger Weise positiv beeinflussen. So werden tribologische und chemische Gebrauchseigenschaften vorwiegend durch die Dicke und die Struktur der Verbindungsschicht bestimmt und eine Steigerung der thermischen, mechanischen und zyklischen Belastbarkeit nitrierter Bauteile beruht primär auf der durch die bereits erwähnte Ausscheidungshärtung charakterisierten Diffusionsschicht. Auf der Negativseite steht die relativ große Sprödigkeit der Verbindungsschicht. Ablätterungen, Ausbrüche bis hin zum



Bild 2. Prozessgesteuerter Schachtofenkomplex 1500 x 2000 zum Gasnitrieren und -nitrocarburieren in der Härtereie Reese Weimar

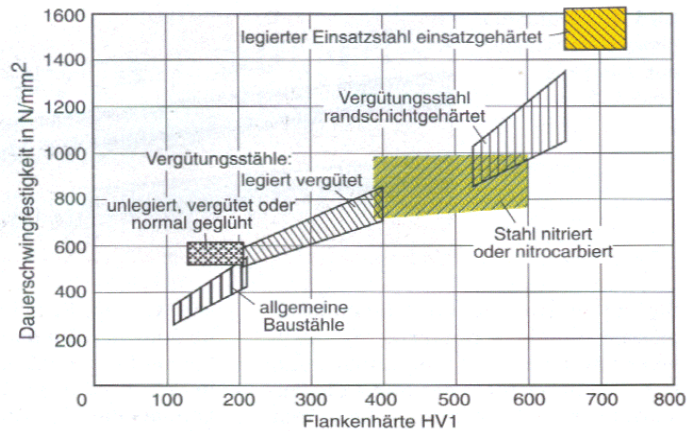
Bruch können die Folge sein. Hieraus ergeben sich Einsatzgrenzen vor allem bei dynamischer Bauteilbeanspruchung und hoher Flächenpressung.

Der Aufbau der Verbindungsschicht und die Nitrierhärte tiefe muß in Parallele zum Einsatzhärten den jeweiligen Gebrauchswertforderungen angepaßt werden. So sind auch hier z. B. bei Zahnrädern die Nht-Werte modulbezogen festzulegen. Damit ein Abschieben der Schicht ausgeschlossen wird, sollte das unter Belastung auftretende Schubspannungsmaximum immer innerhalb der Nitrierschicht liegen.

Die relativ geringen Maß- und Formänderungen bei allen Nitrierverfahren beruhen im Wesentlichen auf der Behandlung der Bauteile unterhalb der A_1 -Temperatur. **Bild 2** zeigt einen prozessgesteuerten Schachtofenkomplex zum Gasnitrieren und -nitrocarburieren in der Härtereie Reese Weimar.

Möglichkeiten zur Substitution der Einsatzhärtung durch Nitrieren bei verzugempfindlichen Teilen. Geht es um die Reduzierung von Maß- und Formänderungen bei thermochemischen Oberflächenhärteverfahren, ist das Nitrieren durch den Behandlungsablauf unterhalb der A_1 -Temperatur, also ohne Phasenumwandlung, gegenüber der Einsatzhärtung prädestiniert. Wird aber die Frage nach der Substitution der Einsatzhärtung durch eine Nitrierbehandlung bei verzugempfindlichen Bauteilen gestellt, sollte unbedingt das bauteilspezifische Gebrauchsverhalten gründlich analysiert werden. Im Zweifelsfall sind Feldversuche nicht auszuschließen. Nutzbar für eine Entscheidungsfindung bei der Auswahl von geeigneten Werkstoffen und deren Wärmebehandlung für die Herstellung hochbeanspruchter Getriebekomponenten ist u. a. die Zusammenstellung

Bild 3. Dauerfestigkeit von Zahnrädern in Abhängigkeit von der Flankenhärte nach DIN 3990



von Anhaltswerten für erreichbare Dauerfestigkeiten in Abhängigkeit von der Flankenhärte bei Stirn- und Kegelrädern in der DIN 3990 (**Bild 3**). Dabei zeigt sich die Überlegenheit einsatzgehärteter Bauteile gegenüber nitrierten oder nitrocarburierten. Auch wird noch einmal die Verbesserung der Dauerfestigkeit durch eine Nitrierbehandlung im Vergleich mit nur vergüteten Bauteilen deutlich.

Entscheidend für eine Umstellung vom Einsatzhärten auf Nitrieren ist in vielen Fällen die geforderte Kernfestigkeit der Bauteile. Hier liegt bei den Nitrierverfahren durch die erforderlichen Temperatur-Zeit-Abläufe oftmals das Handicap für eine erfolgreiche Substitution, da bei den notwendigen Nitriertemperaturen und -zeiten bei hoch beanspruchten Bauteilen die geforderte Kernfestigkeit nicht mehr gehalten werden kann. Speziell beim Einsatz von Vergütungsstählen stößt man bald auf Grenzen, wenn — was werkstofftechnisch richtig — eine Lösung über Verwendung anlaßstabilerer Stähle gesucht wird.

Dennoch gibt es immer wieder Beispiele, wo bei verzugempfindlichen Bauteilen eine erfolgreiche Umstellung vom Einsatzhärten auf das Nitrieren gelingt. Zwei typische Fälle aus dem Wärmebehandlungsteilsortiment der Härtereie Reese

Weimar sind Ringe aus 42CrMo4V und Meßspindeln aus 16MnCr5, deren Ausschußquote durch Verzug und Maßänderung beim Härten bzw. Carbonitrieren nicht vertretbar war. Durch eine Umstellung auf eine Gasnitrierbehandlung konnte die Gutausschubquote bei Einhaltung der Gebrauchswertforderungen wesentlich gesteigert werden.

Trotz der Einstufung des Nitrierens als „verzugs- und maßänderungsarmes Härteverfahren“ war bei beiden Teilen eine erfolgreiche Lösung nur durch die exakte Ermittlung der Fertigungsmaße vor dem Nitrieren durch bauteilbezogene Messungen an Vorlaufteilen möglich und von entscheidender Bedeutung für die erfolgreiche großtechnische Realisierung. **Bild 4** zeigt zusammenfassend Ergebnisse aus Vorlaufuntersuchungen an Ringen mit unterschiedlichem Verhältnis von Außen- zu Innendurchmesser. Nitriert wurde bei $510\text{ }^\circ\text{C} / 36\text{ h}$. Die VS-Dicke betrug $22\text{ }\mu\text{m}$ und die Nht lag bei $0,72\text{ mm}$. Interessant ist, daß die Veränderungen der Außendurchmesser immer im positiven Bereich liegen, während die der Innendurchmesser sowohl positiv als auch negativ sein können. Ein Nulldurchgang liegt für die Innendurchmesser bei einem D_A / D_I -Verhältnis von etwa 2. Durch Festlegung der Vorhaltemaße für die

Bild 4. Durchmesseränderung von Ringen beim Gasnitrieren in Abhängigkeit vom Verhältnis D_A/D_I

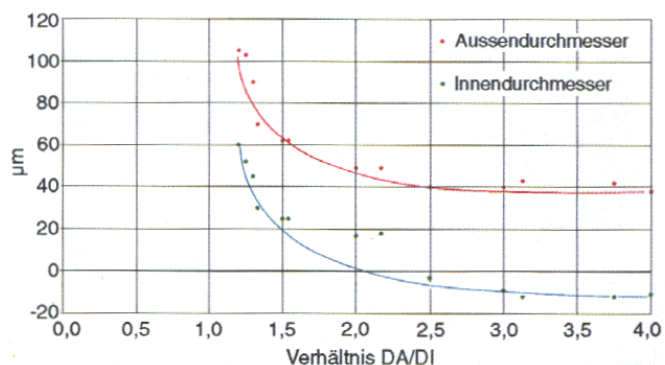
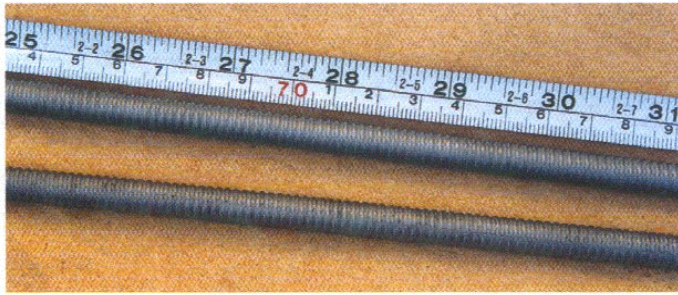


Bild 5. Gasnitrierte Meßspindeln aus dem Stahl 16MnCr5



Ringaußen- und -innendurchmesser für die Serienfertigung, abgeleitet aus dem D_A / D_I -Verhältnis, konnte bei mehr als 90 % der Ringe die Passungstoleranz h8 für den Innendurchmesser gehalten werden.

Mit positivem Ergebnis konnte auch die Umstellung von Einsatzhärten auf Gasnitrieren bei Meßspindeln abgeschlossen werden. Für ein l/d -Verhältnis von 62,5 lag

der Rundlauf nach der Nitrierbehandlung $< 0,2$ mm. Mit einer Vorhaltekorrektur der Länge von $-0,05$ % konnte die Steigungsgenauigkeit im zulässigen Toleranzbereich für eine Finish-Bearbeitung gehalten werden. In der Serienfertigung noch sporadisch auftretende Abweichungen im Längenmaßverhalten lassen bei Bauteilen mit extrem hohem Schlankheitsgrad

den Einfluß einer plastischen Verformung durch den Abbau von Druckspannungen im Rand und mit einer daraus resultierenden Dominanz der im unteren Teil der Nitrierschicht vorhandenen Zugspannungen vermuten. Eine weitere Optimierung wäre eventuell durch die Verwendung eines Stahls mit höherer Streckgrenze als Spindelwerkstoff möglich. **Bild 5** zeigt ein Teilstück der Meßspindel mit der Abmessung 525 x 8 mm. (X 437)

[1] Edenhofer, B.: Härtereitechn. Mitt. 56 (2001) 1, S. 14/22

[2] Liebmann, G.: Antriebstechnik 1996/9, S. 12/16