

## Neue Technologie korrigiert Nockenwellenverzug

Gary Doyon, Valery Rudnev, John Maher, Randy Minnick, Glen Desmier – Inductoheat Inc.; Madison Heights, Mich.



Die Induktionserwärmung ist eine bewährte Methode für die Wärmebehandlung verschiedener Automotive-Komponenten, einschließlich Nockenwellen, die der Gruppe der kritischen Motor-/Antriebsstrangkomponenten angehören. Ein neuer Ansatz macht jetzt eine Induktionshärtung der Nockenwellen mit nahezu nicht nachweisbarem Verzug möglich.

Die Nockenwelle eines Motors regelt die Steuerzeiten und die Geschwindigkeit beim Öffnen und Schließen der Einlass- und Auslassventile. Sie besteht aus mehreren Gruppen von Nocken und Lagern (Abb. 1). Anzahl, Größe, Profil, Positionierung und Ausrichtung der Nocken hängen vom Nockenwellentyp sowie von den Motorspezifikationen ab. Abbildung 2 zeigt einige Beispiele für verschiedene Nockenformen. Grauguss und Sphäroguss sowie halbweiche Stähle werden für die Herstellung von Nockenwellen verwendet.<sup>[1]</sup>

Während des Betriebs kann der Nocken Millionen von Zyklen durchlaufen und beträchtlichen Verschleiß- und Kontaktbelastungen unterworfen sein. Eine geeignete Kombination aus Verschleißbeständigkeit und Festigkeit ist von wesentlicher Bedeutung für Nocken, deren Arbeitsflächen eine Induktionserwärmung erfordern. Abgesehen von Festigkeit und

Verschleißbeständigkeit müssen Nockenwellen gerade sein, um einen geräuscharmen und vibrationsfreien Betrieb zu ermöglichen.

### Induktionserwärmung von Nockenwellen

In Abhängigkeit von der Geometrie der Nockenwelle und den Produktionserfordernissen können die Wellen durch Induktion erwärmt werden, wobei die Scan-

Härtung einzelner Nocken oder die statische (Single-Shot-)Härtung eines einzelnen Nockens oder mehrerer Nocken zum Einsatz kommt.

Vertikale und horizontale Konzepte der Induktionshärtung wurden von verschiedenen Herstellern herangezogen. Die Erwärmungszeiten bewegen sich in einem Bereich von 3 - 8 Sekunden, in Abhängigkeit von Materialtyp, ursprünglicher Mikrostruktur und Geometrie.



Fig. 1. Examples of automotive camshafts

Kürzere Erwärmungszeiten sind für abgeschreckte und angelassene sowie für normalisierte Ausgangsmikrostrukturen erforderlich. In der Regel kommen, in Abhängigkeit von der benötigten Einsatzhärtungstiefe und Geometrie, Frequenzen von 3 - 40 kHz zur Anwendung.

### Scan-Härtung

Die Scan-Härtung wird normalerweise bei relativ geringen Produktionsraten und etwas breiteren Nocken angewendet. In Abhängigkeit von den Prozesseigenschaften können Nocken während der Wärmebehandlung gedreht werden. Wenn die Scan-Härtung von Nocken ohne Rotation erfolgt, kann die Erwärmungsfläche des Induktors maschinell bearbeitet werden, um die Nockengeometrie besser aufzunehmen und elektromagnetische Nachbarschaftseffekte zu kompensieren. In diesem Fall sollten Maßnahmen ergriffen werden, um eine geeignete Nockenausrichtung im Verhältnis zum Induktor zu realisieren.

Scan-Induktoren bieten die größte Flexibilität. Sie härten Nocken verschiedener Längen/Breiten bei Anwendung minimaler Energie, da nur ein Teil des Einzelnockens mit einem Induktor mit einer relativ schmalen Kupferfläche erwärmt wird. Dieser Prozess kommt häufig beim Härten großer Nocken zum Einsatz (z. B. Nockenwellen für Schiffe und Züge). Ein komplexer Algorithmus zur Regelung der Energie im Verhältnis zur Scan-Rate und Induktorpositionierung ist normalerweise erforderlich, um Endeffekte zu kompensieren.

Die Hauptbeschränkungen bei der Anwendung der Scan-Härtung für Automotive-Nockenwellen hängen mit den geringen Produktionsraten aufgrund der Einzelnocken-Verarbeitung und gewissen Schwierigkeiten bei der Umsetzung des erforderlichen Härtemusters von eng positionierten Nocken zusammen. Spritzer beim Abschrecken und unerwünschte lokalisierte Durchwärmungen beim Anlassen sind weitere Probleme.

### Single-Shot-Härtung

Im Gegensatz zur Scan-Härtung kommt die Single-Shot-Härtung mehrerer Nocken häufig zum Einsatz, wenn die Oberflächen kleiner und mittlerer Nockenwellen mit Nocken ähnlicher Größe und Form und identischen oder sehr ähnlichen Axialabständen zwischen den Nocken gehärtet werden müssen.

Die Nockenwellen werden während der Induktionshärtung gedreht. Um den Ausstoß zu erhöhen, werden mehrere Nocken gleichzeitig einer Wärmebehandlung unterzogen. Eine entsprechende Anzahl einwindiger Induktoren wird elektrisch in Reihe verbunden und liefert die erforderliche Erwärmung für mehrere Nocken. Das Spulenkupfer ist oft in Axialrichtung profiliert, um die vorgesehene Leistungsdichteverteilung zu erhalten. Dabei wird auch eine elektromagnetische Interaktion zwischen benachbarten Windungen einbezogen, um Endeffekte angemessen zu kontrollieren und Spezifikationen der Nockengeometrie zu berücksichtigen. Das Abschrecken



Nockengeometrien

kann in das Spulendesign integriert werden oder nach Beendigung des Erwärmungszyklus extern erfolgen. Die Single-Shot-Härtung mit Nockenwellenrotation wird normalerweise mit einer deutlich tieferen Einsatzhärtungstiefe im Vorsprung, verglichen mit dem Basiskreisbereich (dem Fuß), assoziiert, da der Vorsprung des Nockens eine engere elektromagnetische Kopplung mit einem Innendurchmesser des Spulenkupfers aufweist. Die Single-Shot-Härtung erfordert normalerweise eine stärkere Umrichterleistung als die Scan-Härtung. Die gesamte Oberfläche mehrerer Nocken muss bis zu einer beabsichtigten Tiefe austenitisiert werden, um das erforderliche Härtemuster beim nachfolgenden Abschrecken zu realisieren.

### Statische Induktionshärtung (ohne Rotation)

Bei der statischen Erwärmung sind Induktor und Nockenwelle während der Erwärmungs- und Abschreckphasen bewegungslos. Im Laufe der Jahre wurden verschiedene



Abb. 3. CamPro™ Maschine verwendet patentierte Härtungstechnologie ohne Rotation (SHarP-C™ Technologie)



Abb. 4. Einheitlich verteilte präzise Konturhärtungsmuster, produziert durch die CamPro™ Maschine

Induktorausführungen verwendet, um Nocken statisch zu härten. Viele dieser Ausführungen waren den für die Härtung von Kurbelwellen verwendeten Designs sehr ähnlich.

#### **Konventionelle einwindige statische Induktoren**

Konventionelle einwindige Spulen gehörten zu den frühesten Induktoren, die für die Oberflächenhärtung von Nocken zum Einsatz kamen. Der Vorsprung des Nockens wird normalerweise im Induktorbereich positioniert, wo Kupferschienen, die elektrischen Strom von einer Stromquelle transportieren, mit der Induktionsspule verbunden sind. In dieser Region wird ein magnetisches Feld durch eingehende und abgehende elektrische Ströme erzeugt, die in entgegengesetzte Richtungen verlaufen. Dadurch wird ein Flussrandeffekt verursacht.

Man hat versucht, diesen Effekt zu nutzen, um die überschüssige Wärmeenergie im Bereich des Nockenvorsprungs, die durch den elektromagnetischen Nachbarschaftseffekt verursacht wird, zu reduzieren. Außerdem wurden

magnetische Flusskonzentratoren im Basiskreisbereich des Nockens eingesetzt, um den Wärmequellenverlust aufgrund eines größeren Spulen-Nocken-Abstands zu kompensieren. Leider führte diese Spulenausführung zu einer unzureichenden Kontrollierbarkeit des Härtemusters, geringer Erwärmungseffizienz und starkem Verzug. Als Folge kommt sie extrem selten zum Einsatz.

#### **Zweischaleninduktor oder geteilter Induktor**

Speziell konstruierte Zweischaleninduktoren oder geteilte Induktoren werden ebenfalls zum Härten von Nockenwellen eingesetzt. Eine Rotation der Nockenwelle ist nicht erforderlich. Das Spulenkupfer ist profiliert, um die Form des Nockens aufzunehmen.

Die Bezeichnung Zweischaleninduktoren ist darauf zurückzuführen, dass diese Induktoren normalerweise an einer Seite ein Scharnier aufweisen. So kann der Wellenzapfen der Nockenwelle in der korrekten Erwärmungsposition geladen werden, während ein gleichmäßiger Luftspalt zwischen Erwärmungsfläche und

Nockenfläche gewahrt wird. Dies trägt dazu bei, den Verzug des Nockens zu minimieren, kurze Erwärmungszeiten anzuwenden und ein konturähnliches Härtungsmuster zu erzeugen. Leider wird die Verwendung von Zweischaleninduktoren vor allem mit den Nachteilen einer kurzen Spulenlebensdauer, unzureichender Zuverlässigkeit und Wartungsfreundlichkeit sowie niedrigen Produktionsraten aufgrund elektrischer Kontaktprobleme in Verbindung gebracht.<sup>[1]</sup>

#### **Neuer technologischer Ansatz**

Eine patentierte Technologie ohne Rotation (SHarP-C™), die für das Härten von Kurbelwellen entwickelt wurde, wird in jüngster Zeit mehr und mehr auch für die präzise Konturhärtung von Nockenwellen effektiv eingesetzt. Der Induktor besteht aus einem oberen (passiven) Induktor und einem unteren (aktiven) Induktor (Abb. 3). Der untere Induktor (der aktiv und mit einer Stromversorgung verbunden ist) ist stationär, während der obere (passive) Induktor beim Laden und Entladen der Kurbelwelle geöffnet

und geschlossen werden kann. Jeder Induktor weist profilierte Bereiche auf, in denen die Nocken für die Wärmebehandlung untergebracht werden können, während der obere Induktor geöffnet ist. Aufgrund der Aktiv/Passiv-Ausführung stellen elektrische Kontaktprobleme, die mit Zweischalenspulen in Verbindung gebracht werden, kein Problem dar.

Nach dem Laden der Nockenwelle in die Erwärmungsposition wird der obere Induktor in eine geschlossene Position geschwenkt, und Strom wird von der Stromversorgung am unteren (aktiven) Induktor angelegt. Der in die untere Spule fließende elektrische Strom induziert umgehend die Wirbelströme, die in den oberen Induktor zu fließen beginnen. Dies wird durch einen Schichtenblock ermöglicht, der als magnetischer Flusskoppler wirkt und den oberen und unteren Bereich elektromagnetisch koppelt, vergleichbar mit einem Transformatoreffekt. Daher wirkt der nicht rotierende Induktor als klassisches durchlaufendes und elektrisch äußerst effizientes Induktionssystem mit einem gleichmäßigen Nocken-Induktor-Abstand auf die Nocken.

Erwartungsgemäß kann die Erwärmungsfläche solcher Induktoren problemlos profiliert werden, um das beabsichtigte Härtemuster zu erhalten. Speziell konzipierte Abschreckschlitze kommen zum Einsatz, um den Abschreckprozess sowie das Kühlen des Spulenkupfers zu realisieren.

Die Technologie der Induktionshärtung ohne Rotation bietet

verschiedene grundsätzliche Vorteile, wie etwa deutlich verringerter Verzug, einfache Bedienung, bessere Qualität, überlegene Zuverlässigkeit und Wartungsfreundlichkeit der Ausrüstung sowie eine Reduzierung der Kosten während der Nutzungsdauer. SHarP-C Induktoren bieten Robustheit, Steifigkeit und Wiederholbarkeit und werden an CNC-Maschinen aus einem massiven Kupferblock hergestellt. Das Hartlöten oder Montieren von Komponenten entfällt bei der Herstellung der Induktoren komplett. Dadurch reduziert sich wiederum das Risiko eines Verzugs des Induktors während seiner Herstellung deutlich, und die damit verbundene Abweichung der Härtemuster wird eliminiert.

Dieses neuartige Verfahren eignet sich für die Härtung mehrerer Nocken (Abb. 3). Somit lassen sich hohe Produktionsraten durch gleichzeitige statische Wärmebehandlung mehrerer Nocken erreichen.

### **Deutlich reduzierter Nockenwellenverzug**

Ein messbarer Vorteil der jüngsten Installationen, bei denen dieses neuartige Verfahren zum Einsatz kommt, ist die Möglichkeit, Nockenwellen mit praktisch nicht nachweisbarem Verzug zu härten. In einigen Fällen wird damit das gesamte Richten der Nockenwellen potenziell eliminiert.

Verschiedene Faktoren haben Einfluss auf den Verzug von wärmebehandelten Komponenten, u. a. Materialtyp, ursprüngliche Mikrostruktur, Geometrie, Härteprofil usw. Nockenwellen

weisen eine relativ komplexe Geometrie auf und sind nicht symmetrisch. Einer der kritischen Faktoren, die Einfluss auf den Verzug haben, ist der Umfang der Wärmeerzeugung. Je größer die Menge des erwärmten Metalls ist, desto umfangreicher ist die Dehnung, die wiederum einen stärkeren Verzug bewirkt.

Eine der attraktivsten Eigenschaften dieser Technologie ist ihre Fähigkeit, gleichmäßig verteilte präzise Konturhärtungsmuster zu erzeugen (Abb. 4), obgleich die Nockenwellen zu den geometrisch unregelmäßigen Komponenten gehören. Bei Bedarf kann die Wärmeeinflusszone (WEZ) minimiert werden, um die Metalldehnung weiter zu reduzieren. Dadurch wird offensichtlich auch der Formverzug minimiert, da weniger Energie in die Nockenwelle geleitet wird. Der Kern des Wellenzapfens, der als Formstabilisator fungiert, bleibt während des gesamten Erwärmungszyklus relativ kalt. Wärmemuster sind auf ihre Position begrenzt und in hohem Maße wiederholbar, da weder die Nockenwelle noch die Induktoren sich während der Erwärmung bewegen. Dasselbe Muster wird über viele Zyklen erreicht.

Im Gegensatz zu alternativen Prozessen, wo Axialdruck angewendet wird, um eine Nockenwelle zu drehen, wird während der Wärmebehandlung keine Axialkraft angelegt, weil die Nockenwelle auf V-förmigen Blöcken ruht (Abb. 3).

Eine exakte Spulenformgebung mit CNC-Maschinen und eine Schnellwechsel-Palettenausführung garantieren, dass Spulen nach

einem Induktorwechsel automatisch in Relation zur Nockenwelle ausgerichtet werden. Die nicht mehr benötigte Palette kann auf einfache Weise von der Maschine entfernt werden, indem zwei Schläuche getrennt und einige Klemmen gelöst werden. Daraufhin wird die neue Palette in wenigen Minuten in ihre Position bewegt. Eine genormte Bauweise ermöglicht eine schnelle, fehlerfreie, produktionsbereite Werksinstallation und Inbetriebnahme, wodurch die Abschaltzeiten gegenüber alternativen Prozessen deutlich verringert werden. Damit wird auch eine Umrüstung der Maschine für die Verarbeitung vieler verschiedener Teile möglich.

### **Verfahren nach der Wärmebehandlung**

Auf die Wärmebehandlung der Nockenwellen folgt das Schleifen/Polieren. Das abschließende Schleifen der Arbeitsflächen der Nockenwelle ist erforderlich, um die Oberflächenrauheit zu minimieren und Maßgenauigkeit der Nocken und Wellenzapfen zu gewährleisten. Komplexe und

miteinander verknüpfte thermo-mechanische und chemische Prozesse finden während des Schleifens der Oberflächen statt. Verschiedene Schleifbedingungen sind möglich: leicht, normal oder stark.

Übermäßige Wärme, die durch ungeeignete Schleifbedingungen entsteht, kann die Leistung der Nockenwelle negativ beeinflussen. Die Verschleißbeständigkeit der Lagerflächen wird durch Veränderung der Mikrostruktur beeinträchtigt, wodurch nützliche Druckeigenspannungen gemindert werden können und eine wünschenswerte Eigenspannungsverteilung auch aufgehoben werden kann.

Erwartungsgemäß ist die erforderliche Schleifintensität eine Funktion der Menge des Materials, das auf dem Teil zurückbleibt, und des Verzugs der Komponente. Daher bietet die Erzeugung eines präzisen Konturhärtungsmusters den Vorteil, dass die Schleifintensität deutlich reduziert werden kann. Das Ergebnis sind bessere Nockenwellen. (Hinweis: Die Menge des Materials, das beim Schleifen von der gehärteten

Einsatzschicht abgetragen wird, hat unmittelbaren Einfluss auf die Lebensdauer des Schneidwerkzeugs, die Robustheit des Gesamtprozesses und die Kosteneffektivität.)

### **Schlussfolgerung**

Die Vorteile dieser patentierten Technologie beinhalten die drei folgenden Hauptaspekte:

1. Weder das Werkstück noch der Induktor bewegt sich während der Wärmebehandlung, wodurch Versatz, Verschleiß oder elektrische Kurzschlusspotenziale verhindert werden.
2. Der Induktor wird an einer CNC-Maschine gefertigt, wodurch exakte Maßgenauigkeit gewährleistet ist.
3. Die Nutzung der SHarP-C™ Technologie in neuesten Installationen hat sich bewährt, um überlegene Geradheit der Nockenwelle sowie hervorragende Härteigenschaften direkt an der Produktionsstraße hervorzubringen. **IH**

### **Referenz**

Ignacio Castro von Arbomex SA de CV stellt fest: „Die SHarP-C Härtungsmaschine hat uns geholfen, den Nockenwellenverzug auf 3-5 µm zu reduzieren, und wir konnten auf das Richten komplett verzichten. Somit belaufen sich unsere Einsparungen allein aufgrund der Eliminierung des Richtens auf etwa \$ 40.000 pro Jahr. Darüber hinaus wurde die Qualität der gehärteten Nockenwellen deutlich verbessert, und unser Ausschuss reduzierte sich auf etwa 1,5 %.“

**Nähere Informationen:** Kontakt Herr Jochen Müller, Vertriebsleiter Inductoheat Europe GmbH

Telefon: +49 7153 504200

E-Mail: [mueller@inductoheat.eu](mailto:mueller@inductoheat.eu)

Internet: [www.inductoheat.eu](http://www.inductoheat.eu)

### **Literatur**

1. G. Doyon, V. Rudnev, J. Maher, *Induction Hardening of Crankshafts and Camshafts*, ASM Handbook, Vol. 4C: Induction Heating and Heat Treating, 2014, S. 172-186.