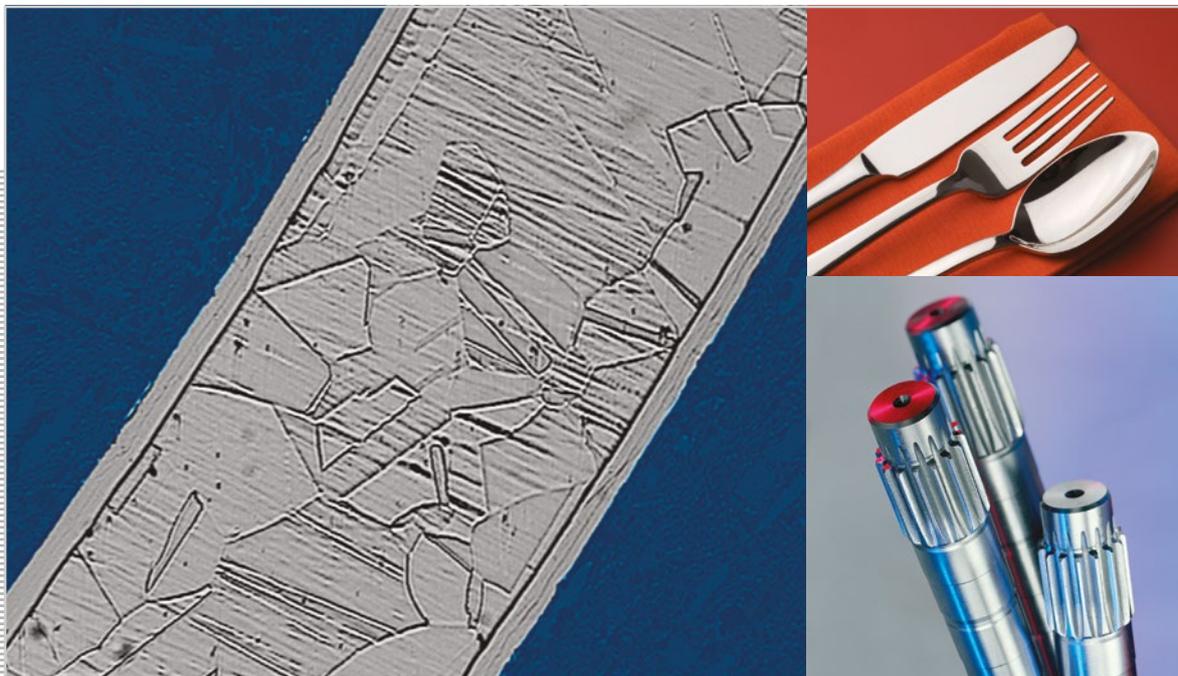


## Oberflächenhärten nichtrostender Stähle



## Euro Inox

Euro Inox ist die europäische Marktförderungsorganisation für nichtrostende Stähle (Edelstahl Rostfrei). Die Mitglieder von Euro Inox umfassen

- europäische Produzenten von Edelstahl Rostfrei,
- nationale Marktförderungsorganisationen für Edelstahl Rostfrei sowie
- Marktförderungsorganisationen der Legierungsmittelindustrie.

Ziel von Euro Inox ist es, bestehende Anwendungen für nichtrostende Stähle zu fördern und neue Anwendungen anzuregen. Planern und Anwendern sollen praxisnahe Informationen über die Eigenschaften der nichtrostenden Stähle und ihre sachgerechte Verarbeitung zugänglich gemacht werden. Zu diesem Zweck

- gibt Euro Inox Publikationen in gedruckter und elektronischer Form heraus,
- veranstaltet Tagungen und Seminare und
- initiiert oder unterstützt Vorhaben in den Bereichen anwendungstechnische Forschung sowie Marktforschung.

### Vollmitglieder

**Acerinox**  
[www.acerinox.com](http://www.acerinox.com)

**Aperam**  
[www.aperam.com](http://www.aperam.com)

**Outokumpu**  
[www.outokumpu.com](http://www.outokumpu.com)

### Assoziierte Mitglieder

**Acroni**  
[www.acroni.si](http://www.acroni.si)

**British Stainless Steel Association (BSSA)**  
[www.bssa.org.uk](http://www.bssa.org.uk)

**Cedinox**  
[www.cedinox.es](http://www.cedinox.es)

**Centro Inox**  
[www.centroinox.it](http://www.centroinox.it)

**ConstruirAcier**  
[www.construiracier.fr](http://www.construiracier.fr)

**Industeel**  
[www.industeel.info](http://www.industeel.info)

**Informationsstelle Edelstahl Rostfrei**  
[www.edelstahl-rostfrei.de](http://www.edelstahl-rostfrei.de)

**International Chromium Development Association (ICDA)**  
[www.icdacr.com](http://www.icdacr.com)

**International Molybdenum Association (IMOA)**  
[www.imoa.info](http://www.imoa.info)

**Nickel Institute**  
[www.nickelinstitute.org](http://www.nickelinstitute.org)

**Paslanmaz Çelik Derneği (PASDER)**  
[www.turkpasder.com](http://www.turkpasder.com)

**Stowarzyszenie Stal Nierdzewna**  
[www.stalenierdzewne.pl](http://www.stalenierdzewne.pl)

**SWISS INOX**  
[www.swissinox.ch](http://www.swissinox.ch)

Oberflächenhärten nichtrostender Stähle  
 Erste Auflage 2015  
 (Reihe Werkstoff und Anwendungen, Band 20)  
 © Euro Inox 2013-2015

#### **Herausgeber**

Euro Inox  
 Avenue des Cerisiers 15, bte. 1  
 1030 Brüssel  
 Belgien  
 Tel. +32 486 50 37 53  
 E-mail: info@euro-inox.org  
 Internet: www.euro-inox.org

#### **Autor**

Alenka Kosmač, Brüssel (B)

#### **Titelfotos**

Expanite, Hillerød (DK) (links)  
 iStockphoto (rechts oben)  
 Bodycote Hardiff, Düsseldorf (D) (rechts unten)

## **Inhalt**

1	Einleitung	2
2	Grundlagen	3
3	Thermochemische Diffusionsverfahren	5
3.1	Aufkohlen	6
3.2	Gasnitrieren	7
3.3	Plasma- und Salzbadnitrieren	10
3.4	Nitrocarburieren	11
3.5	Borieren	13
4	Thermische Verfahren	14
4.1	Induktionshärten	14
5	Kosten	15
6	Zusammenfassung	16
7	Literaturnachweis	17

#### **Urheberrechtlicher Hinweis**

Vervielfältigungen jedweder Art, auch auszugsweise, sind nur mit vorheriger schriftlicher Genehmigung des Herausgebers gestattet.

#### **Haftungsausschluss**

Die in dieser Broschüre enthaltenen Informationen vermitteln Orientierungshilfen. Gewährleistungs- und Schadenersatzansprüche können hieraus nicht abgeleitet werden.

# 1 Einleitung

Im Sichtbereich sind häufig kratzunempfindliche Oberflächen erwünscht.



Nichtrostender Stahl kommt zumeist dort zum Einsatz, wo hohe Korrosionsbeständigkeit wichtig ist. In vielen Endanwendungen werden aber auch harte, kratzunempfindliche Oberflächen erwartet. Hierfür bietet die Oberflächentechnik Lösungen an. Industriell bewährte Verfahren sind verfügbar, um Oberflächenhärte, Kratz- und Verschleißbeständigkeit zu verbessern.

Haupt-Anforderungen an die Oberflächenhärtung [1, 2]:

- Kratzunempfindlichkeit,
- Oberflächenhärte von über 900 HV<sub>0,05</sub>,
- unveränderte Korrosionsbeständigkeit,
- verringerter Reibungskoeffizient,
- Maßhaltigkeit,
- keine oder allenfalls geringfügige Veränderung des Aussehens,
- keine Risse oder Abplatzungen der gehärteten Schicht,
- keine oder nur minimale Veränderung der Oberflächenrauigkeit,
- keine Vorbehandlung,
- keine Nachbehandlung,
- erhöhte Bauteil-Lebensdauer mit geringeren Stillstandzeiten und Kosten sowie
- verbesserte Schweißignung.
- Vermeidung von Kaltverschweißen (Adhäsion)

Geeignete Verfahren optimieren die Oberflächen von Konsumgütern und sorgen dafür, dass Haus- und Küchengeräte, Schneidwaren und stark beanspruchte Gegenstände lange ihr gutes Aussehen und ihre Funktion bewahren. Sie sind auch in industriellen Anwendungen mit besonderen Anforderungen an Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit gefragt. Zu den zahlreichen Einsatzgebieten gehören [1, 2, 3, 4, 5]:

- Konsumgüter,
- Haushaltsgeräte,
- Anlagen für die Nahrungsmittel- und Getränkeherstellung,
- Mobilgeräte,
- das industrielle Handling von Flüssigkeiten,
- Befestigungselemente für Industrie und private Endverbraucher,
- Ventile und Pumpen,
- medizintechnische Geräte,
- meeres-technische Anlagen,
- Fahrzeugkomponenten sowie
- Achsen und rotierende Teile.

*Die Oberflächenhärtung eignet sich für unterschiedlichste Einsatzbereiche – vom Bauwesen bis zur Nahrungsmittelindustrie. Foto: Heat & Surface Treatment, Eindhoven (NL)*



## 2 Grundlagen

Oberflächen lassen sich mit einer Vielzahl von Verfahren härten. Zumeist soll die Verschleißbeständigkeit verbessert werden, ohne den weicheren, zäheren Grundwerkstoff zu verändern, damit das Bauteil den im Betrieb auftretenden Schlagbeanspruchungen widersteht.

Verschleiß bedeutet den physikalischen Abtrag von Materie von einem festen Gegenstand. Es gibt drei Arten von Verschleiß: abrasiven Verschleiß, adhäsiven Verschleiß und Verschleiß durch Ermüdung.

**Abrasiver Verschleiß** liegt vor, wenn zwei Oberflächen aneinander reiben und die härtere die weichere abträgt. Er äußert sich in einer sichtbaren Aufrauhung. Oft kommt es dabei zu einer Kaltverfestigung der Oberfläche.

**Adhäsiver Verschleiß (Haftverschleiß)** wird – ebenso wie der abrasive – dadurch ausgelöst, dass zwei Oberflächen unter Druck aneinander reiben. Die einander gegenüberliegenden Rauigkeitsspitzen erhitzen sich lokal stark, wodurch sie sich verformen und miteinander „verschweißen“ können. Entweder brechen sie auf und lösen sich als Abrieb von der Oberfläche oder sie bleiben unlösbar verschweißt.

**Verschleiß durch Ermüdung** liegt vor, wenn die Oberfläche wiederholt starken Wechselbeanspruchungen ausgesetzt wird und infolgedessen zerrüttet. Abtragsraten sind weniger temperaturabhängig als Korrosionsraten [6].

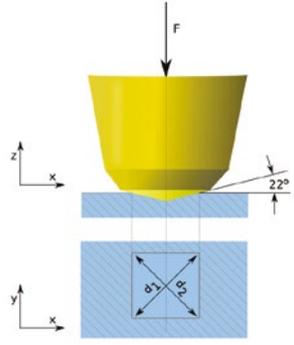
Drei grundsätzlich unterschiedliche Ansätze sind bei den Oberflächenhärtungsverfahren zu unterscheiden:

1. Thermochemische Diffusionsverfahren verändern die chemische Zusammensetzung der Oberfläche und bilden Verbindungen mit härtenden Elementen wie Kohlenstoff, Stickstoff oder Bor. Sie ermöglichen das effiziente Härten ganzer Oberflächen und werden nicht nur zur Behandlung von Einzelteilen eingesetzt, sondern vor allem auch dann, wenn große Stückzahlen vorliegen.
2. Thermische Methoden verändern nicht die chemische Zusammensetzung, sondern die Oberflächenstruktur, d.h. sie erzeugen eine abgeschreckte Oberfläche, ohne ihr zusätzliche Elemente zuzuführen. Sie können sowohl für das Härten vollständiger Oberflächen als auch lokal eingesetzt werden (selektive Oberflächenhärtung).
3. Oberflächenbeschichtungs- oder -modifikationsverfahren beruhen auf dem bewussten Aufbau einer neuen Schicht auf dem Stahl-Substrat.

Tabelle 1 führt verschiedene Verfahrensarten für das Härten von Stahl auf. Diese seit langem gängigen Techniken werden ständig weiterentwickelt und gehören nach wie vor zu den gebräuchlichsten. Die vorliegende Broschüre stellt die wichtigsten für nichtrostenden Stahl eingesetzten Methoden dar (in nachstehender Tabelle kursiv hervorgehoben).

Tabelle 1. Verfahren zur Härtung von Stahloberflächen

Thermochemische Wärmebehandlung	Beschichtung und Oberflächenmodifikation
Aufkohlen	Hartverchromung
Nitrieren	chemisches (außenstromloses) Vernickeln
Nitrocarburieren	thermisches Spritzen
Carbonitrieren	Auftragsschweißen von Hartstoffschichten
Borieren	chemische Gasphasenabscheidung (CVD)
Thermische Diffusion	physikalische Gasphasenabscheidung (PVD) <sup>1</sup>
Thermische Verfahren	Ionenimplantation
Flammhärten	Laserbehandlung
Induktionshärten	
Laserhärten	
Elektronenstrahlhärten	



Vickers-test



Pyramidenförmige Spitze eines Vickers-Härtetesters



Abdruck in einer oberflächen-gehärteten Probe nach einem Vickers-Härtetest. Sowohl die Längendifferenz der beiden Diagonalen als auch die unterschiedlichen Helligkeiten der Flächen sind klassische Indikatoren dafür, dass es sich um eine unebene Probe handelt, die keinen sachgerechten Abdruck entstehen lässt.

Quelle: Wikipedia; Vickers- Härtestest  
Fotos: R. Tanaka (MiteO, Dennis M. Clarke (rechts))

<sup>1</sup> Das PVD-Verfahren wird in der Euro-Inox-Publikation "Färben nichtrostender Stähle" (Reihe Werkstoff und Anwendungen, Band 10, [http://www.euro-inox.org/pdf/map/ColouringStainlessSteel\\_DE.pdf](http://www.euro-inox.org/pdf/map/ColouringStainlessSteel_DE.pdf)) beschrieben.

### 3 Thermochemische Diffusionsverfahren

Die konventionelle thermochemische Behandlung von nichtrostendem Stahl geht mit einem Verlust an Korrosionsbeständigkeit einher, denn Stickstoff und Kohlenstoff reagieren mit Chrom zu Nitriden bzw. Karbiden und entziehen dem Grundwerkstoff dadurch Chrom. Im Falle des nichtrostenden Stahls wurden daher thermochemische Methoden bislang als ungünstig oder allenfalls

als Kompromiss zwischen Korrosionsbeständigkeit und tribologischen Eigenschaften betrachtet [8]. Neuere Verfahren beeinträchtigen die Korrosionsbeständigkeit demgegenüber nicht.

Tabelle 2. Typische Merkmale thermochemischer Diffusionsbehandlungen von nichtrostendem Stahl [7, 8]

Verfahren	Bezeichnung der Schicht	Behandlungs-temperatur °C	Typische Schicht-dicke µm	Schicht-härte HV	Verfahrensmerkmale
<b>Nitrieren/Karburieren/Nitrocarburieren</b>					
Gas	Diffundierte Stickstoff- und/oder Kohlenstoffverbindungen	380–600	10–200	750–1600	härteste Schichten durch das Nitrieren von Stahl, geringer Verzug, Flexibilität, gute Reproduzierbarkeit, geringer Verzug, auch für die Behandlung von Kleinteilen und Schüttgut geeignet
Ion	Diffundierte Stickstoff- und/oder Kohlenstoffverbindungen	380–600	10–200	750–1600	enge Schichttoleranzen, Schichtaufbau gut steuerbar, geeignet für große Bauteile, partielle Behandlung möglich, geringer Verzug, gute Prozesskontrolle; hohe Investitionskosten
<b>Andere</b>					
Borieren	Diffundiertes Bor bzw. Borverbindungen	700–1000	10–50	1500 bis über 2800	ergibt eine harte Diffusionsschicht; hohe Prozesstemperaturen können zu Verzug führen; u.U. Verlust an Korrosionsbeständigkeit



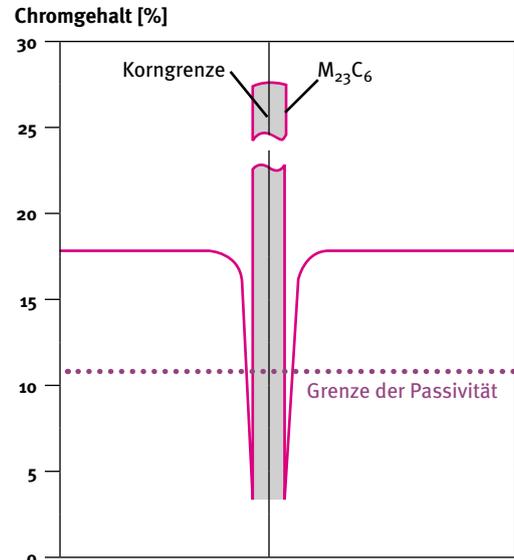
Foto: Heat & Surface Treatment, Eindhoven (NL)

### 3.1 Aufkohlen

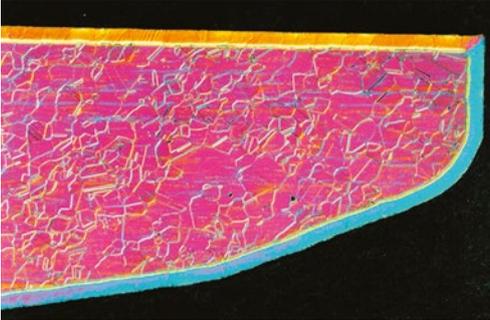
Nichtrostender Stahl lässt sich mit dem Ziel aufkohlen, die Oberflächenhärte zu erhöhen und die Fressneigung zu vermindern. Während des Aufkohlens diffundieren Kohlenstoffatome bei hohen Temperaturen in die Oberfläche und reagieren aufgrund ihrer hohen Affinität zu Chrom mit diesem Legierungsmetall. Dabei kann sich Chromkarbid ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ) bilden. Dieser Vorgang wird als Sensibilisierung bezeichnet. Dabei wird Chrom gebunden und die Korrosionsbeständigkeit nimmt ab. Konventionelle Aufkohlungsverfahren wurden daher durch das Nitrieren abgelöst, bei dem keine Sensibilisierung eintritt [10].

Sensibilisierung findet statt, wenn der Werkstoff auf 600–800 °C erhitzt wird. In diesem Temperaturbereich diffundieren Chrom und Kohlenstoff zu den Korngrenzen hin und bilden Karbide vom Typ  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ . Dabei verarmt der Grundwerkstoff an Chrom, während es sich an den Korngrenzen deutlich anreichert. In den chromverarmten Bereichen ist der Chromgehalt niedriger als in der Ausgangslegierung und macht sie korrosionsanfällig.

Einige industriell bewährte Verfahren härten, ohne die ursprüngliche Korrosionsbeständigkeit zu beeinträchtigen. Voraussetzung ist eine entsprechende Qualität des Grundwerkstoffes. Hierbei werden keine Schichten aufgebracht; vielmehr entsteht eine (mit 2–3 Gewichts-%) kohlenstoffreiche Diffusionszone, die äußerst zäh ist und nicht zur Ablösung oder zu Abplatzungen neigt. Dabei handelt es sich um eine Niedrigtemperatur-Aufkohlung bei ca. 450 °C.



Das Verfahren erhöht die Oberflächenhärte der meisten nichtrostenden Stähle auf etwa 1000–1200  $\text{HV}_{0,05}$ , was etwa dem Fünffachen des Ausgangswertes entspricht. Durch interstitielle Einlagerung von Kohlenstoffatomen entstehen hohe Druckkräfte an der Oberfläche. Mit diesem Verfahren lassen sich alle austenitischen nichtrostenden Stähle behandeln. Bei dem austenitischen nichtrostenden Stahl 1.4401/1.4404 (316/316L) wurde bislang kein Verlust an Korrosionsbeständigkeit festgestellt. Vorheriges Lösungsglühen wird empfohlen. Auch bei nichtrostenden Duplexstählen wird das Verfahren erfolgreich industriell angewandt, ebenso bei ausscheidungshärtenden Stählen. Scharfe Kanten, die Innenflächen von Bohrungen sowie Spalte stellen für das Verfahren kein Hindernis dar [4, 11, 12, 13].



Mit einer aufgekohlten Schicht lassen sich auch scharfe Kanten gleichmäßig härten. Foto: Bodycote Hardiff, Düsseldorf (D)

### 3.2 Gasnitrieren

Das Gasnitrieren ist ein Oberflächenhärtungsprozess, bei dem Stickstoff in die Oberfläche eingebracht wird, indem der Stahl bei einer geeigneten Temperatur mit einer gasförmigen Stickstoffverbindung, zumeist Ammoniak, in Kontakt gehalten wird. Eine Abschreckung ist für die Entstehung der gehärteten Schicht nicht erforderlich. Die Nitriertemperatur liegt für die meisten Stähle zwischen 500 °C und 550 °C. Während das Nitrieren, ähnlich wie das Aufkohlen, die Korrosionsbeständigkeit herabsetzt, erhöht es die Oberflächenhärte, vermindert den Reibungskoeffizienten und verbessert dadurch die Verschleißfestigkeit. Ebenso wie beim Aufkohlen sollten vor dem Gasnitrieren austenitische nichtrostende Stähle und ferritische Stähle gegläht werden, um verarbeitungsbedingte Spannungen abzubauen. Hierfür sind i.d.R. solche Glühbehandlungen geeignet, wie sie sonst zur Maximierung der

Korrosionsbeständigkeit eingesetzt werden. Martensitische Stähle sollten in vergütetem Zustand vorliegen<sup>2</sup> [9].

Legierungselemente wie Chrom und Molybdän sind beim Nitrieren günstig, da sie Nitride bilden, die bei den Nitriertemperaturen stabil sind. Aufgrund ihrer Chromgehalte lassen sich alle nichtrostenden Stähle in gewissem Maße nitrieren [9]. Allerdings erschwert der hohe Chromgehalt einiger Sorten das Nitrieren. Der Grund: Chrom bildet an der Oberfläche von nichtrostendem Stahl eine Passivschicht, die vor dem Nitrieren (ähnlich wie vor dem Aufkohlen) entfernt werden muss. Sobald die Passivschicht abgetragen ist (sei es durch Trockenstrahlen, nasses Strahlen, Beizen, chemische Reduktion in reduzierender Atmosphäre, Salzschnmelztauchbäder oder herstellereinspezifische Verfahren), wird das Nitrieren wirksam. Positiv ist die üblicherweise hohe Oberflächenhärte zu vermerken. Weitere Legierungselemente, z.B. Nickel, Kupfer oder Mangan, haben allenfalls geringen Einfluss auf die Wirkungsweise des Nitrierens [7]. Für das Gasnitrieren geeignete Stähle sind:

- **Martensitische nichtrostende Stähle.** Die härtbaren martensitischen nichtrostenden Stähle weisen einen hochfesten Kern auf, der Träger der gehärteten nitrierten Schicht ist. Vor dem Nitrieren sollte der Werkstoff gehärtet und bei einer Temperatur von mindestens 15 °C über der Nitriertemperatur angelassen werden.

<sup>2</sup> Weitergehende Informationen über die jeweilige Wärmebehandlung gängiger nichtrostender Stähle finden sich in der englischsprachigen Publikation *Stainless Steels: Tables of Fabrication Parameters, Materials and Applications Series, Volume 17*, [http://www.euro-inox.org/pdf/map/Tables\\_Fabrication\\_Parameters\\_EN.pdf](http://www.euro-inox.org/pdf/map/Tables_Fabrication_Parameters_EN.pdf)

- Austenitische nichtrostende Stähle.** Austenitische Sorten sind die am schwierigsten zu nitrierenden nichtrostenden Stähle, obwohl sie sich durchaus mit Erfolg nitrieren lassen [9]. Zu nitrierende Teile müssen zunächst im geglähten Zustand vorliegen, damit es nicht zu Blasenbildung oder Ablösung der nitrierten Schicht kommt. Zum Nitrieren eignen sich am ehesten stabilisierte oder niedrigkohlenstoffhaltige Sorten, denn schließlich liegt die Nitriertemperatur

mit rund 540 °C im sensibilisierenden Temperaturbereich. Die auf austenitischen nichtrostenden Stählen erzielbare Nitrierschicht ist sehr dünn und geht nur selten über 0.125 mm hinaus. Außerdem beeinträchtigt sie deutlich die Korrosionsbeständigkeit gegenüber den meisten Medien. Austenitische Sorten werden daher nur in ganz besonderen Fällen nitriert, z.B. wenn der Werkstoff nichtmagnetisch und gleichzeitig verschleißbeständig sein muss [14].

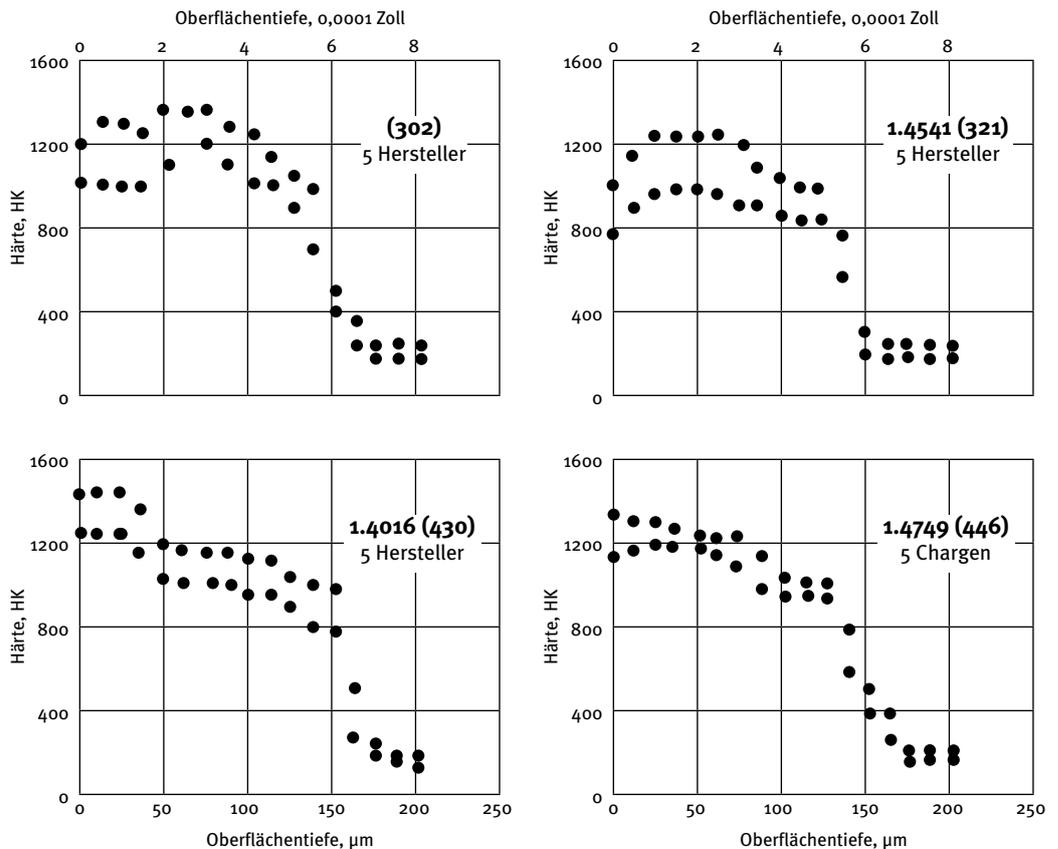


Abbildung 1. Härte in Abhängigkeit von der Schichttiefe für vier nichtrostende Stähle, die vor dem Nitrieren gegläht wurden. Die Glüh­temperatur betrug im Fall der Sorten 302 und 1.4541 (321) 1065 °C, beim Stahl 1.4016 (430) 980 °C und bei der Güte 1.4749 (446) 900 °C. Die Härte ist in Knoop-Werten angegeben [9].

Tabelle 3. Härtebereiche und Schichttiefen bei ausgewählten korrosions- und hochtemperaturbeständigen Stählen [7]

Stahlsorte			Härte HV	Dicke der gehärteten Schicht mm
EN-Nummern-bezeichnung	EN-Namens-bezeichnung	Vergleichbare AISI/ASTM-Sorte		
1.4028	X30Cr13	420	950–1200	0.2 max.
1.4104	X14CrMoS17	-	950–1200	0.2 max.
1.4112	X90CrMoV18	440 B	950–1200	0.2 max.
1.4117	X38CrMoV15	-	950–1200	0.2 max.
1.4301	X5CrNi18-10	304	950–1600	0.2 max.
1.4305	X10CrNiS18-9	303	950–1600	0.2 max.
1.4401	X5CrNiMo17-12-2	316	950–1600	0.2 max.
1.4535	X90CrCoMoV17	-	950–1600	0.2 max.

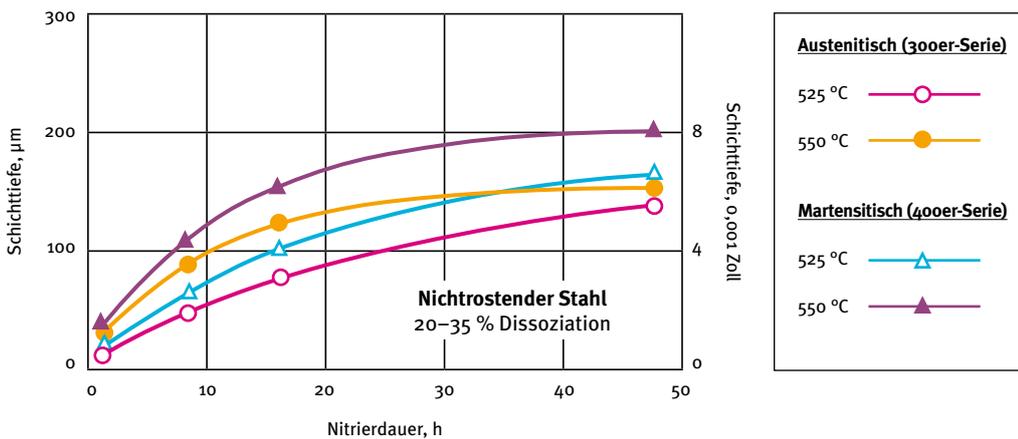


Abbildung 2. Vergleich des Nitrierverhaltens von austenitischen (300er-Serie) und martensitischen (400er-Serie) nichtrostenden Stählen, einstufige Nitrierung bei 525 °C und 550 °C

- Ferritische nichtrostende Stähle.** Ferritische nichtrostende Stähle lassen sich mit üblichen Wärmebehandlungsmethoden nicht härten. Zu den Sorten, die durch Nitrieren bereits erfolgreich gehärtet wurden, zählen 1.4016 (430) und 1.4749 (446).
- Ausscheidungshärtende nichtrostende Stähle.** Sorten wie 1.4542, 1.4548 (17-4 PH), 1.4564, 1.4568 (17-7 PH), 1.4545 (15-5 PH), 1.4980 (A-286) eignen sich zum Nitrieren.

### 3.3 Plasmanitrieren und Salzbadnitrieren

Das Plasmanitrieren ist eine Härtungsmethode, die der Oberfläche eines Werkstücks mittels Glimmentladung elementaren Stickstoff zuführt, der dann weiter in das Material diffundiert. Unter Vakuum wird mit Hochspannung ein Plasma erzeugt, wodurch Stickstoff-Ionen beschleunigt werden und auf die Oberfläche auftreffen. Dieser Ionenbeschuss erhitzt das Werkstück, reinigt die Oberfläche und erzeugt aktiven Stickstoff. Ein Entfernen der Passivschicht ist nicht erforderlich, da sie vor der Nitrierungsphase durch den Ionenbeschuss beseitigt wird. Das Plasmanitrieren ermöglicht eine bessere Steuerung der chemischen Zusammensetzung der harten Schicht und größere Gleichmäßigkeit. Zu den weiteren Vorteilen zählt auch geringerer Verzug als beim konventionellen Gasnitrieren.

Bei den meisten Eisenlegierungen lässt sich die durch Nitrieren entstandene Diffusionszone durch metallographische Verfahren nicht abbilden, weil deren Auflösungsver-

mögen hierfür zu gering ist. Bei nichtrostendem Stahl ist der Chromgehalt jedoch so hoch, dass sich Nitride in einem Umfang bilden, der in geätzten Schlifflinien sichtbar wird. Das Vorliegen von Chromnitriden weist jedoch auch auf einen Verlust an Korrosionsbeständigkeit hin. Dieses Verfahren ist für nichtrostenden Stahl besonders geeignet.

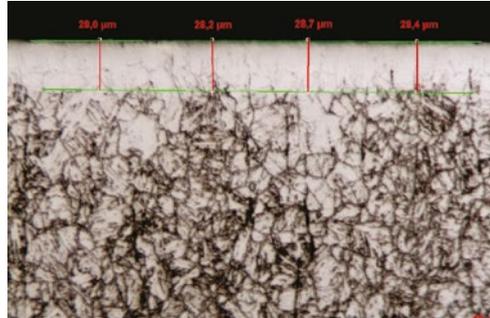
Das Salzbadnitrieren erfolgt in einer stickstoffhaltigen Salzschieme bei Temperaturen über 500 °C, die entweder Cyanide oder Cyanate enthält. Inzwischen gibt es auch cyanidfreie Zusammensetzungen. Allerdings entsteht im aktiven Bad durch chemische Reaktion ein gewisser Cyanidanteil von zumeist bis zu 5 %. Diese Konzentration ist vergleichsweise gering. Solche Zusammensetzungen haben in der Wärmebehandlung weitgehende Akzeptanz gefunden, da sie Umweltrisiken deutlich weiter verringern. Das Salzbadnitrieren reduziert die Korrosionsbeständigkeit in gewissem Umfang, weil die Bildung von Karbiden und Nitriden benachbarten Bereichen der Matrix Chrom entzieht, wie sich auch an Korrosionsdaten ablesen lässt, die den Gewichtsverlust messen. Dabei übertreffen diese Werkstoffe in ihrer Korrosionsbeständigkeit aber weiterhin deutlich die un- und niedriglegierten Stähle [9].

*Bei manchen Bestecken aus nichtrostendem Stahl wird wahlweise eine Oberflächenhärtung angeboten, welche die Verschleißbeständigkeit verbessert. Foto: WMF, Geislingen (D)*



### 3.4 Nitrocarburieren

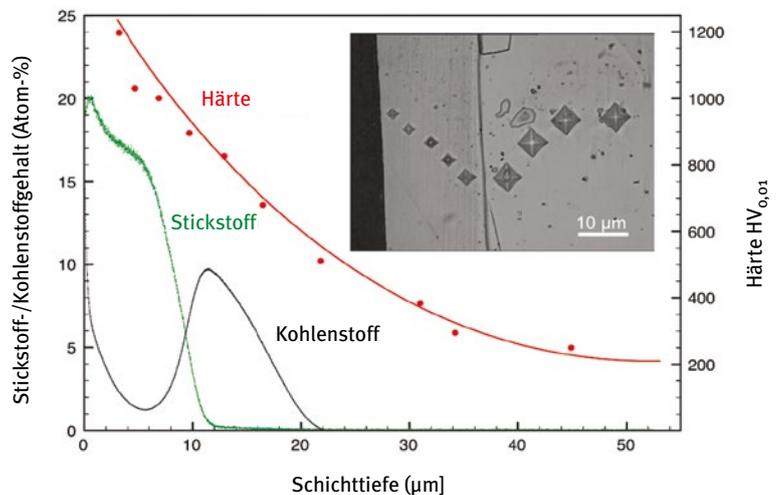
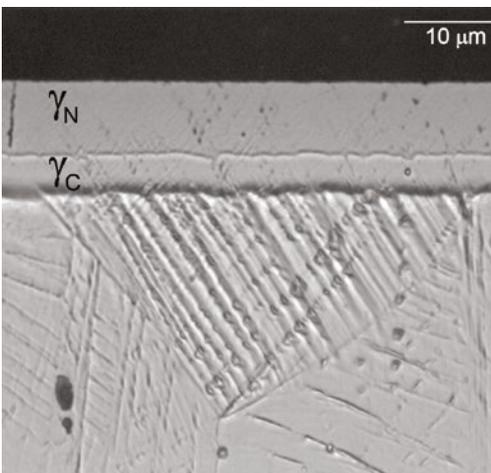
Einige auf Gas oder Plasma basierende Verfahren bringen in die Werkstoffoberfläche Kohlenstoff- und/oder Stickstoffatome ein. Möglich ist das durch die geringe Größe dieser Atome im Vergleich zu den Atomen der Legierungsbestandteile. Wie auch bei den zuvor beschriebenen Verfahren geht die Oberflächenhärtung nicht auf eine Beschichtung, sondern auf die Diffusion von Kohlen- und/oder Stickstoff in die Oberfläche zurück [1, 2, 3]. In nichtrostendem Stahl lösen sich atomarer Kohlen- und/oder Stickstoff in größeren Mengen bei Temperaturen unter ca. 400–500 °C, wobei die ursprüngliche Mikrostruktur expandiert. Die Schichtdicke liegt bei 20–40 µm. Expandierte Austenit-Oberflächen sind vier- bis achtmal härter als der Grundwerkstoff. Bei steigender Härte und Verschleißfestigkeit bleibt die Korrosionsbeständigkeit in vollem Umfang erhalten [15, 16].



Schliffbild eines durch Niedrigtemperatur-Nitrocarburieren behandelten ausscheidungshärtenden nichtrostenden Stahls. Foto: Bodycote Hardiff, Düsseldorf (D)

Der Außenbereich der Schicht ist reicher an Stickstoff und der Innenbereich an Kohlenstoff. Die Dicke der jeweiligen Schicht lässt sich durch die Gaszusammensetzung beeinflussen – z.B. durch Steuerung des Stickstoff- und Kohlenstoffgehalts im Gas. Durch Kombination unterschiedlicher Schichtdicken lassen sich gezielt bestimmte Werkstoffeigenschaften erreichen. Gas- und plasmabasierte Verfahren ermöglichen, je nach Anforderung zu nitrieren, aufzukohlen oder zu nitrocarburieren.

Schnitt durch einen nitrocarburierten nichtrostenden Stahl (links, und Tiefenprofil (rechts). Foto: Expanite, Hillerød (DK)



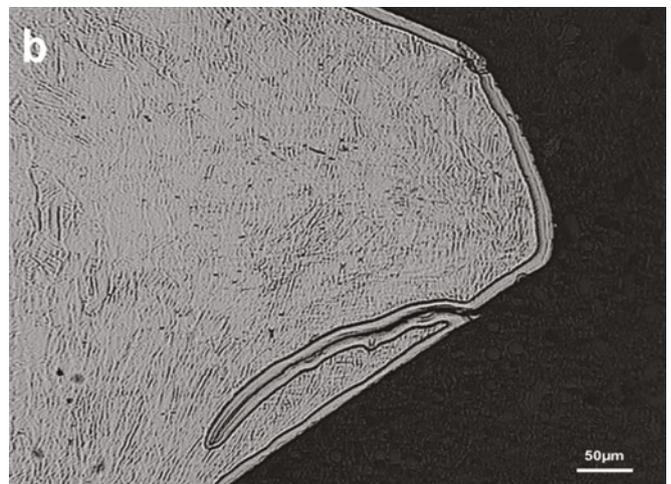
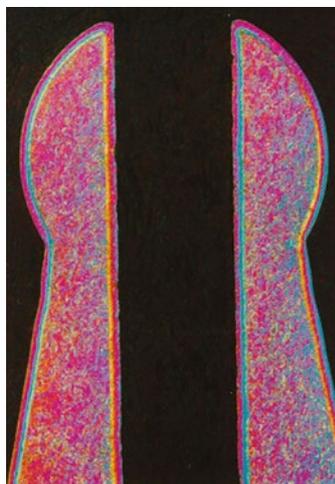
Die Oberflächenhärtung bietet sich auch für Gebrauchsgegenstände wie Uhrengehäuse an. Foto: Askania, Berlin (D)



Auch martensitische nichtrostende Stähle lassen sich nitrocarburieren. Die Sorte 1.4057 (431) ergab bei einer Behandlungsdauer von 75 Minuten eine Schicht von rund 20 µm Dicke mit einer Oberflächenhärte von über 1800 HV. In Abhängigkeit von anderen Verfahrensparametern lässt sich der gehärtete Bereich maßschneidern. So kann z.B. expandierter Austenit erzielt werden, obgleich sich das Prinzip auch auf martensitische und ausscheidungshärtende Stähle anwenden lässt. Aufgrund ihrer sehr hohen Härte sind die Oberflächen praktisch kratz-

beständig [15]. Expandierter Austenit ist eine metastabile Phase, die dazu neigt, zu verfallen, wenn sie längere Zeit erhöhten Temperaturen ausgesetzt wird [16]. Das Nitrocarburieren ist nicht zu verwechseln mit dem Carbonitrieren, einem Hochtemperaturverfahren für niedrig-kohlenstoffhaltige Stähle.

Nitrocarburieren ist auch in kleinen Bohrungen und sogar engsten Spalten wirksam. Foto: Bodycote Hardiff, Düsseldorf (D), links, sowie Expanite, Hillerød (DK), rechts



### 3.5 Borieren

Das Borieren ist ein thermochemischer Prozess, bei dem man Boratome in die Oberfläche eines Werkstücks hineindiffundieren lässt, die dann mit dem Grundwerkstoff komplexe Boride bilden. Es handelt sich dabei um ein diffusionsbasiertes Verfahren. Neben Nickel, Titan, Kobaltlegierungen und Hartlegierungen kann auch beinahe jeder Eisenwerkstoff boriiert werden. Allerdings ist bei höherlegierten Stählen die Diffusionsrate geringer.

Aufgrund ihrer Härte sind boriierte Stähle äußerst abriebfest und weisen eine entsprechend längere Lebensdauer auf. Für das Borieren werden Einsatzstoffe in Form von marktgängigen Pulvern, Granulaten unterschiedlicher Korngrößen sowie Pasten eingesetzt. Die Dicke der Diffusionsschicht liegt, abhängig von den Anforderungen, bei 20–200 µm. Bei austenitischen nichtrostenden Stählen ist deren Dicke wesentlich

geringer. Wegen des ähnlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten können boriierte Teile anschließend noch vakuumgehärtet werden, um dem Grundwerkstoff die gewünschten mechanischen Eigenschaften zu verleihen. Die Prozesstemperatur liegt beim Borieren je nach Werkstoff zwischen 700 °C und 1000 °C. Um Verzug zu vermeiden, kann nach der spanenden Bearbeitung und vor dem Borieren noch spannungsarm gegläut werden. Andere Wärmebehandlungen, z.B. Abschreckungshärten, sollten unterbleiben, da deren Wirkung durch das Borieren aufgehoben würde [5, 17]. Wo Maßgenauigkeit wichtig ist, sollte das Werkstück entsprechend kleiner dimensioniert werden, da das Borieren die Werkstückabmessungen um 20–30 % der Schichtdicke erhöht [5]. Aufgrund der Prozesstemperaturen im Bereich von 700–1000 °C kann es zu unerwünschten Ausscheidungen (z.B. Sigma-Phase) kommen.

Tabelle 4. Verbreitete Anwendungen borierter Stähle [7]

Werkstoffbezeichnung			Anwendungen
EN-Nummernbezeichnung	EN-Namensbezeichnung	Vergleichbare AISI-/ASTM-Sorte	
-	-	302	Gewinde, Hülsen
1.4401	X5CrNiMo17-12-2	316	Loch- oder Schlitzbleche, Bauteile für die Textil- und Gummiindustrie
1.4006	X12Cr13	410	Bauteile von Ventilen und Fittings
1.4031	X39Cr13	420	Bauteile von Ventilen, Kolbenstangen, Fittings, Führungen; Teile von Chemieanlagen

## 4 Thermische Verfahren

Die Härtung durch Energieeintrag umfasst konventionelle thermische Verfahren wie das Induktions- und Flammhärten ebenso wie Behandlungen z.B. durch Laser oder energiereiche Elektronenstrahlen. Sie alle können den thermischen, die chemische Zusammensetzung nicht beeinflussenden Verfahren zugeordnet werden. Die Oberflächenmodifikation erfolgt durch Austenitisierung mit anschließender schneller Abkühlung mit dem Ziel der martensitischen Härtung. Die Oberflächen können ganz oder teilweise behandelt werden. Im letzteren Fall wird von lokaler Oberflächenhärtung gesprochen [7].

### 4.1 Induktionshärten

Das Induktionshärten dient dem Ziel, Abriebfestigkeit, Oberflächenhärte und Ermüdungsfestigkeit durch die Erzeugung gehärteter Oberflächenschichten zu verbessern, wobei das Gefüge im Kern unbeeinflusst bleibt. Die Teile werden in einer Kupferspule platziert und dann über die Umwandlungstemperatur hinaus erhitzt, indem man an die Spule Wechselstrom anlegt. Der Wechselstrom in der Spule indu-

ziert ein wechselndes magnetisches Feld im Werkstück, das die Außenseite bis auf Temperaturen im Austenitbereich oder darüber erhitzt. Unmittelbar anschließend wird abgeschreckt. Es handelt sich um einen elektromagnetischen Prozess, bei dem eine kupferne Induktionsspule von einem Strom von bestimmter Frequenz und Stromstärke durchflossen wird.

Nur martensitische nichtrostende Stähle können nach diesem Verfahren gehärtet werden. Induktionshärten wird dabei vor allem für hochbeanspruchte Komponenten eingesetzt, insbesondere torsionsbeanspruchte Teile und schlagbeanspruchte Oberflächen. Typische Anwendungen sind z.B. Zahnräder, Wellen, Spindeln, d.h. vor allem symmetrische Bauteile [18].

Tabelle 5. Induktionsgehärtete nichtrostende Stähle und deren ungefähre Induktions-Austenitisierungstemperatur

Werkstoffbezeichnung			Kohlenstoff, Massen %	Austenitisierungs- temperatur °C
EN-Nummern- bezeichnung	EN-Namens- bezeichnung	Vergleichbare AISI-/ASTM-Sorte		
1.4005	X12CrS13	416	< 0.15	1065
1.4021 1.4028 1.4031 1.4034	X20Cr13 X30Cr13 X39Cr13 X46Cr13	420	> 0.15	1065
1.4125	X105CrMo17	440C	0.95–1.20	1065

## 5 Kosten

Die Kosten eines Oberflächenbehandlungssystems müssen zu den daran gestellten Anforderungen ins Verhältnis gesetzt werden. Verfahren, die kostengünstig sind, aber ihre Wirkung verfehlen, sind nutzloser Aufwand. Leider ist es kaum möglich, absolute Kostenvergleiche für verschiedene Verfahren der Oberflächentechnik anzustellen. Ein für die Herstellung verschleißbeständiger Oberflächen bestimmender Kostenfaktor ist die Stückzahl. Eine große Stückzahl ermöglicht Skaleneffekte bei Behandlung und Nachbearbeitung. Ein anderes Kriterium ist die Bauteilgröße. Für jedes Verfahren gibt es Abmessungsgrenzen, über die hinaus deren Kosten überproportional steigen. Weitere Einflussfaktoren sind

- die Behandlungsdauer,
- Aufwendungen für Einspannen, Abdeckarbeiten und Endkontrolle,
- Kosten der Endverarbeitung,
- Materialkosten,
- Energiekosten,
- Arbeitskosten,
- Umweltschutzaufwendungen (z.B. für die Entsorgung verbrauchter Arbeitslösungen) und
- angestrebte Nutzungsdauer

Wegen der Vielzahl der Faktoren ist es schwierig, Kosten hinreichend genau miteinander zu vergleichen. [7].



*Auch die Oberflächen komplex geformter Teile mit Unterschnidungen lassen sich härten.  
Foto: Heat & Surface Treatment, Eindhoven (NL)*

## 6 Zusammenfassung

Es gibt zahlreiche Verfahren, mit denen sich die Oberflächen nichtrostender Stähle härten lassen [19]. Sie erhöhen nicht nur die Oberflächenhärte, sondern verbessern auch die Kratz- und Verschleißbeständigkeit des Werkstoffs. Derartige Oberflächen werden auch eingesetzt, wo das Risiko des Fressens besteht oder Schneidkanten erforderlich sind (z.B. bei medizinischen Geräten). Alle in der vorliegenden Publikation beschriebenen Verfahren beruhen auf einer Modifikation der Oberfläche, ohne dass zu-

sätzliche Schichten aufgetragen werden, die anfällig für Abplatzungen und Verschleiß wären. Landläufig wird angenommen, dass die Oberflächenhärtung zulasten der Korrosionsbeständigkeit von nichtrostendem Stahl geht. Neueste Verfahren zeigen, dass diese Annahme überholt ist und dass die Korrosionsbeständigkeit erhalten bleiben kann. Die Behandlung übernehmen spezielle Dienstleister, einige bieten auch gebrauchsfertige Anlagen an.



## 7 Literaturnachweis

- [1] Expanite – Surface Hardening of Stainless Steel, <http://www.expanite.com/>
- [2] Specialty Stainless Steel Processes (S3P) Benefits <http://www.bodycote.com/services/heat-treatment/specialty-stainless-steel-processes.aspx>
- [3] Stainihard NC Surface Hardening of Stainless Steel, Heat & Surface Treatment B.V., <http://www.stainihard.nl/>
- [4] Formosa, D., Hunger R., Spiteri, A., Dong, H., Sinagra, E., & Buhagiar, J. (2012) Corrosion behaviour of carbon S-phase created on Ni-free biomedical stainless steel, *Surf. Coat. Technol.*, 206, 3479–3487
- [5] Hunger H.-J., Wear Protection by Boronizing, [http://www.bortec.de/images/bortec/wear\\_protection\\_e.pdf](http://www.bortec.de/images/bortec/wear_protection_e.pdf)
- [6] *Handbook of Hard Coatings, Deposition Technologies, Properties and Applications*, Hg. R.F. Bunshah, Noyes Publications, 2001
- [7] *Surface Hardening of Steels, Understanding the Basics*, Hg. J.R. Davis, ASM International 2002
- [8] Christiansen, T.L., Somers, M.A.J., *Characterisation of Low Temperature Surface Hardened Stainless Steel*, *Struers Journal of Materialography* 9/2006
- [9] *ASM Specialty Handbook, Stainless Steels*, Hg. J.R. Davis, ASM International, 1994
- [10] Kumar, T., Jambulingam, P., Gopal, M., Rajadurai, A. Surface Hardening of AISI 304, 316, 304L and 316L SS Using Cyanide Free Salt Bath Nitriding Process, ISRS, 2004
- [11] Kolsterising, Bodycote, [http://internet.bodycote.org/kolsterising/brochures/147-302-body\\_kolst\\_rd\\_gb\\_finr.pdf](http://internet.bodycote.org/kolsterising/brochures/147-302-body_kolst_rd_gb_finr.pdf)
- [12] Faccoli, M., Cornacchia, G., Roberti, R., Bordiga, V., Effect of Kolsterising Treatment on Surface Properties of a Duplex Stainless Steel, 7<sup>th</sup> European Stainless Steel Conference Science and Market, 2011
- [13] Van Der Jagt, R. H., Kolsterising – surface hardening of austenitic and duplex stainless steels without loss of corrosion resistance. *Heat Treatment of Metals* (2000), Issue 27, pp. 62 - 65
- [14] *Heat Treater's Guide, Practices and Procedures for Irons and Steels*, Hg. H. Chandler, ASM International, 1995
- [15] Hummelshøj, T.S., Christiansen, T.L., Somers, M.A.J., Towards Commercialisation of Fast Gaseous Nitrocarburising of Stainless Steel, [http://www.expanite.com/papers/DMS2010\\_Towards.pdf](http://www.expanite.com/papers/DMS2010_Towards.pdf)
- [16] Christiansen, T.L., Hummelshøj, T.S., Somers, M.A.J., Low Temperature Thermochemical Treatment of Stainless Steel; Bridging from Science to Technology, 7<sup>th</sup> European Stainless Steel Conference Science and Market, 2011
- [17] Hunger, H. J.; Trute, G.; Löbig, G., Rathjen, D.: Plasmaaktiviertes Gasborieren mit Bortrifluorid. *HTM* 52 (1997) 1, pp. 39-45
- [18] Induction Hardening, Bodycote, <http://www.bodycote.com/services/heat-treatment/harden-and-temper/induction-hardening.aspx>
- [19] Thermomechanical Surface Engineering, Hg. E.J. Mittelmeijer und M.A.J. Somers, Cambridge: Woodhead Publishing 2014

ISBN 978-2-87997-069-1