

Black Marking

Dauerhafte, kontrastreiche Laserbeschriftung von Edelstahl

Ferbach, T. (1)

Pikosekunden-Lasersysteme bieten eine Lösung für die dauerhafte, kontrastreiche Beschriftung von Edelstahl. Sie sind geeignet für Anwendungen von der UDI-Kennzeichnung (Unique Device Identifier) von Medizinprodukten bis hin zu Haushaltsgeräten, ohne negative Auswirkungen auf die Oberflächenpassivierung.

Es besteht zunehmend die Notwendigkeit, Geräte und Produkte aus Edelstahl mit Kennzeichen, Hinweismarken oder Logos zu versehen, die mehrere strenge Kriterien erfüllen müssen, die den Einsatz alternativer, konventioneller Techniken wie Druck oder Gravur weitgehend ausschließen. Bei Medizinprodukten sind beispielsweise für den Mehrfachgebrauch bestimmte Geräte von Rechts wegen mit einer eindeutigen Produktkennzeichnung (UDI) auszustatten. Ein großer Nachteil

einiger Markierverfahren aber ist, dass die Kennzeichnung nicht dauerhaft ist und bei wiederholter Sterilisation (Autoklavieren) verblasst. Eine Gravur hingegen beeinträchtigt die Oberflächenpassivierung und erfordert eine chemische Wiederaufbereitung. Zudem hinterlässt das Gravieren eine Oberflächenstruktur, die Verunreinigungen leichter aufnimmt oder im Falle von Implantaten Irritationen hervorrufen kann. In nicht-medizinischen Einsatzbereichen können aufgedruckte Kennzeichnungen durch Versand, Handhabung oder Lagerung schwer lesbar werden oder auch gezielte Fälschung ermöglichen.

Es gibt mehrere etablierte Verfahren für die Laserbeschriftung und zahlreiche Industrien nutzen diese Techniken seit Jahrzehnten. Je nach Material werden Kohlendioxid- bzw. CO₂-Laser, diodengepumpte Festkörperlaser (DPSS genannt) oder Faserlaser auf breiter Basis eingesetzt. Die verschiedenen Laserbeschriftungstechniken bringen eine Veränderung innerhalb des Volumen des Materials, eine Oberflächenfärbänderung oder eine makroskopische Veränderung des Oberflächenreliefs (z.B. Gravur) bzw. der Struktur mit sich, die leicht erkennbar ist.

Markieren von passiviertem Edelstahl mit Nanosekundenlasern

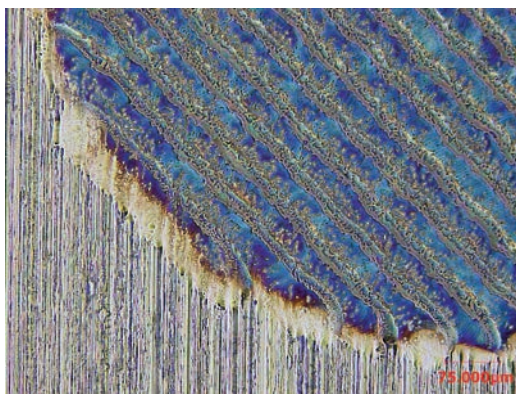
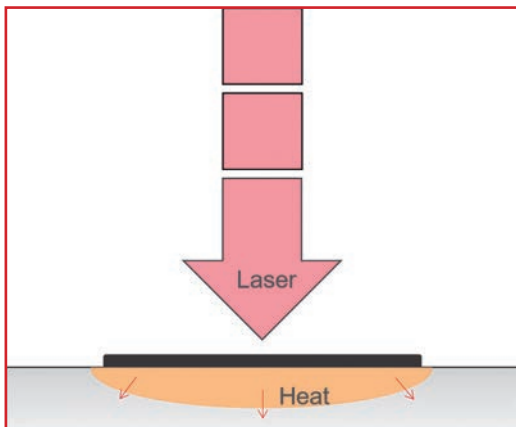
Laser mit Pulsbreiten im Nanosekundenbereich (ns) können verwendet werden, um permanente Markierungen auf Edelstahl zu erzeugen. Diese kontrastreichen Markierungen bieten eine kostengünstige Lösung für medizinische Einmalprodukte und Konsumgüter, die keiner wiederholten Reinigung ausgesetzt sind. Es gibt jedoch bestimmte Einschränkungen, die den Einsatz von ns-Lasermarkierungen ausschließen. Dies gilt insbesondere für

wiederverwendbare Medizinprodukte. Diese Einschränkungen ergeben sich aus inhärenten Faktoren des Markierprozess und der Passivierung, die korrosionsbeständige Oberflächen auf Edelstahlprodukten erzeugt.

Die Passivierung wird eingesetzt, da Stahl durch Oxidation leicht korrodiert (Rost). Die Verwendung von Edelstählen (Legierungen mit hohem Chromanteil) beseitigt dieses Problem, da die Oxidation der Oberflächenchromatome eine dünne, schützende Außenschicht aus Chromoxid hinterlässt. Diese Passivierung kann auf natürliche Weise erfolgen, aber die Dicke und Unversehrtheit der passivierten Schicht wird in der Regel durch eine chemische Behandlung mit einer Säuremischung (Salpetersäure, Zitronensäure) wie Citrisurf® verbessert. Wichtig ist, dass die passivierte Oberfläche keine freiliegenden Eisenatome aufweist.

In der Lasertechnologie ist eine Pulsbreite von zehn oder hundert Nanosekunden relativ lang. Darüber hinaus sind diese Laser auf eine maximale Pulswiederholrate von 100 kHz beschränkt, so dass die für einen schnellen Durchsatz erforderliche hohe Durchschnittsleistung in eine hohe Pulsenergie übergeht. Infolgedessen ist die Wechselwirkung von Laser und Material in erster Linie photo-thermisch, wobei eine intensive Erwärmung zu einer lokalen Schmelzung führt und die Markierung durch eine chemische/strukturelle Umwandlung des Edelstahls entsteht (Bild 1). Diese Transformation beinhaltet die Diffusion des Chroms von der Oberflächenschicht weg, die Oxidation von Chrom- und Eisenatomen, die unterschiedliche Oxide beider Metalle erzeugen, die Entmischung der Legierungskomponenten und Veränderungen in der Phasen-/Kornstruktur des rückverfestigten Metalls.

Während diese Art von chemischer/kompositorischer Kennzeichnung für einige rostfreie Anwendungen geeignet ist, kann sie aus verschiedenen Gründen nicht für UDIs auf wiederverwendbaren Medizinprodukten eingesetzt werden. Ein Hauptgrund ist, dass sie die Passivierung der Stahloberfläche stark beeinträchtigt, wie das Auftreten von starker Korrosion nach einem einzigen Prüfzyklus bestätigt: 50 °C, 5 % Salzwasserspray, für 72 Stunden. Die Einsatzmöglichkeiten von ns-Faserlasern werden durch weitere Faktoren reduziert. Insbesondere bei ästhetischen Anwendungen, wie dem Aufbringen von



Fotos und Grafiken: Coherent

Bild 1: Nanosekundenlaser markieren Edelstahl durch einen thermischen Prozess, der eine Schicht aus dunklem Oxid erzeugt.

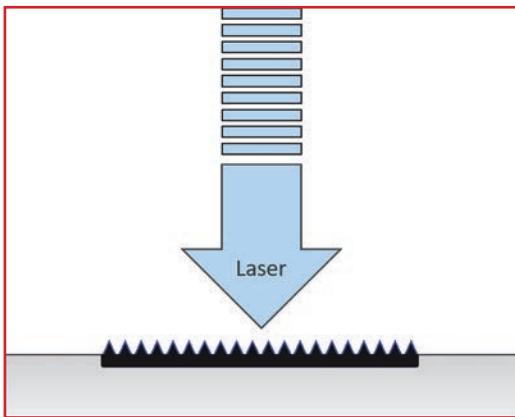


Bild 2: Die kurzen Pulse eines Pikosekundenlasers erzeugen eine Oberflächenstruktur, die Licht einfängt und das darunterliegende Material unbeeinflusst lässt.

Markenlogos, ändert sich zum einen je nach Blickwinkel Farbe und Kontrast der Markierung. Zum anderen ist das Erscheinungsbild sehr empfindlich gegenüber Prozessbedingungen, vermutlich aufgrund von Schwankungen in der Dicke der betroffenen Schicht und der Korngröße innerhalb der transformierten Schicht. Daher können konsistente Ergebnisse nur in einem sehr begrenzten Prozessfenster erzielt werden. Darüber hinaus kann die thermische Belastung durch die lokale Erwärmung dünne Teile wie Platten- und Rohsubstrate verformen.

Black Marking mit Pikosekundenlasern

Dank eines relativ neuen Laserverfahrens, dem sogenannten Black Marking, gehören diese Einschränkungen der Vergangenheit an. Diese Technik basiert auf dem Einsatz von Lasern, die Pulsbreiten im Bereich von 10 - 20 Pikosekunden (ps) liefern (wie der PowerLine Rapid NX), d.h. 10.000 Mal kürzere als die für ns-Faserlaser typischen Pulsbreiten. Obwohl die Pulsenergie 100 Mal geringer sein kann als bei ns-Lasern, kann die Pulsspitzenleistung (Pulsenergie/Impulsbreite) 100 Mal höher sein. Die Kombination von hoher Spitzenleistung mit kurzer Pulsdauer führt zu einer sehr unterschiedlichen und subtileren Transformation der Metalloberfläche, wie in Bild 2 schematisch dargestellt. Ebenso wichtig ist, dass der in diesen Pikosekundenlasern verwendete Pulsmechanismus – das so genannte Modelocking – Puls-wiederholraten bis zu 1 MHz unterstützt. So kann der Laser die hohen Durchschnittsleistungen (10 Watt und mehr) liefern, die für einen kostengünstigen

hohen Produktionsdurchsatz erforderlich sind, ohne jedoch die hohen Pulsenergien zu erzeugen, die für Nanosekundenlaser charakteristisch sind, und ohne die unerwünschten thermischen Effekte.

Wenn der Laserstrahl eines Pikosekundenlasers auf die Stahloberfläche trifft, erzeugt er eine kontrastreiche schwarze Markierung. Diese ähnelt zwar oberflächlich der Markierung eines ns-Lasers, ist aber ganz anderer Art. Die kurze Pulsdauer minimiert den thermischen Eintrag und begrenzt die Flüssigphase auf die äußeren Atomschichten. Das Ergebnis ist die Bildung einer nanoskaligen Oberflächenstruktur namens Laser Induced Periodic Surface Structure (LIPSS), die als lichteinfangende Oberfläche dient. Damit

einher geht eine minimierte Diffusion der Metallatome und eine begrenzte Entmischung sowie eine nur teilweise Oxidation der Oberflächenchrom- und Eisenatome. Während also ns-Laser eine Markierung aus chemisch transformiertem schwarzem Material erzeugen, erzeugt der ps-Laser eine Oberfläche, die schwarz erscheint, deren chemische Zusammensetzung und Legierungsverteilung jedoch kaum beeinflusst werden.

Vorteile des Black Marking

Das Black Marking von Edeltählen bietet eine einzigartige Kombination von Vorteilen, die die schnell wachsende Nachfrage nach diesem Verfahren bei wiederver-

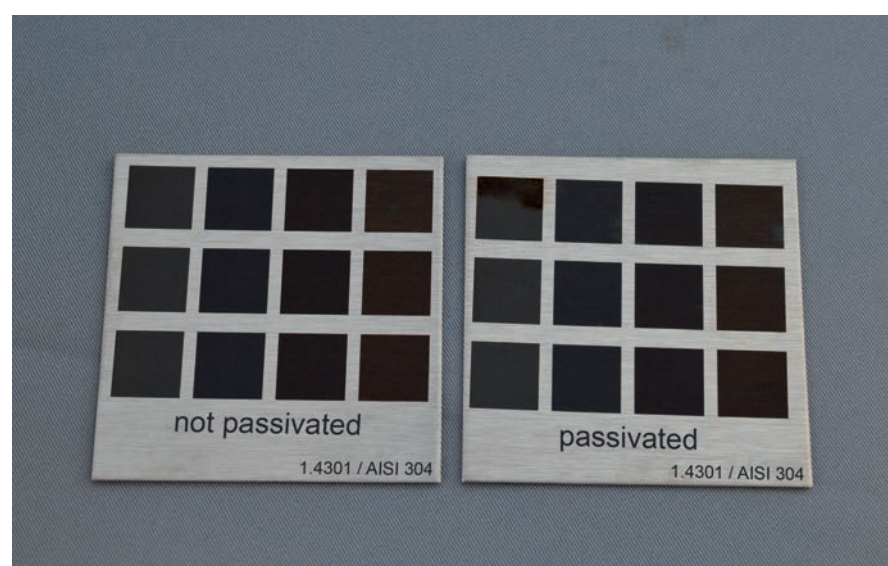


Bild 3: Korrosionsbeständigkeit. Diese Markierungen auf 1.4301 Referenzproben zeigen die Ergebnisse eines 72-stündigen Salzsprühtests für eine ps-Lasermarkierung (links) und eine ns-Lasermarkierung, gefolgt von einem Passivierungszyklus (rechts). Beide Proben bleiben im Wesentlichen unbeeinflusst von Korrosion.

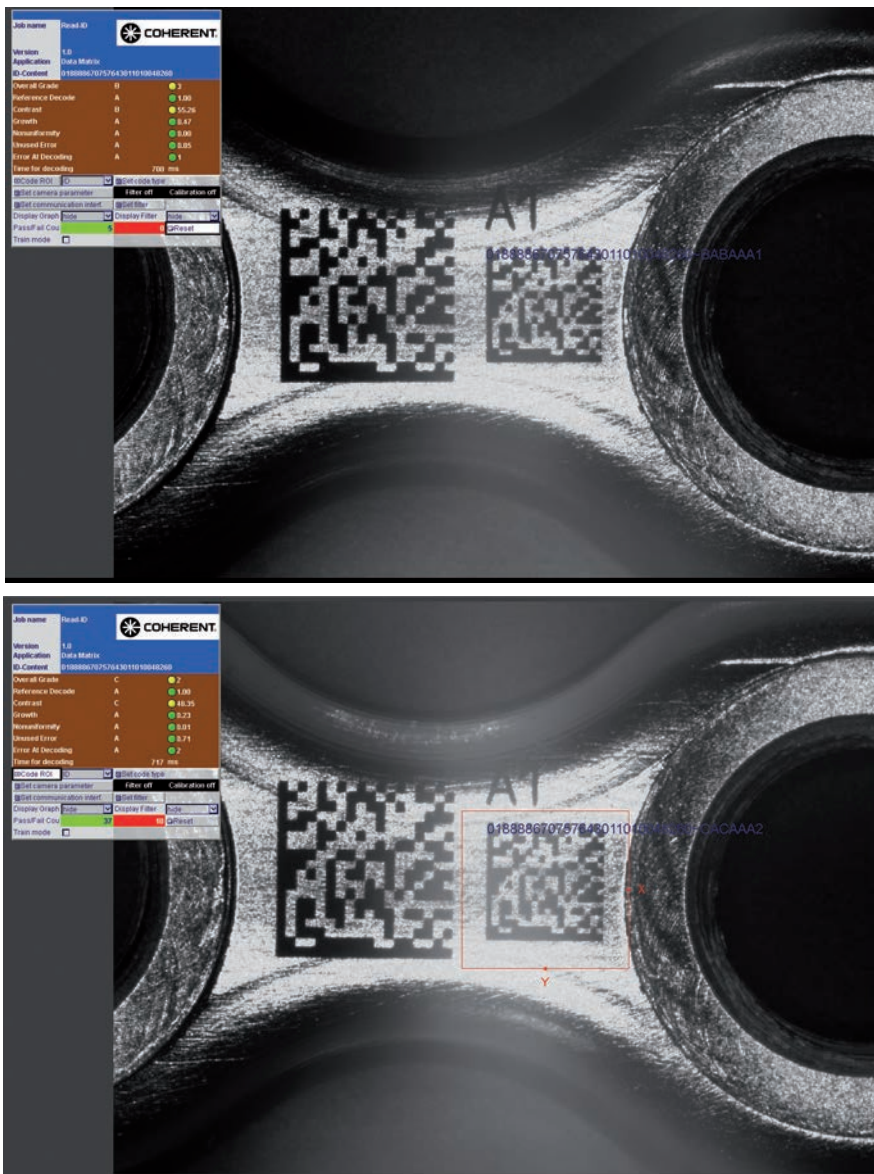


Bild 4: Diese Bilder zeigen eine schwarze Markierung vor (oben) und nach (nach) einer 20-minütigen Citrisurf®-Passivierung. Die Passivierung hat keinen Einfluss auf den Kontrast.

wendbaren Medizinprodukten, Konsumgütern und anderen Produkten erklärt. Zum einen sind die Beschriftungen extrem dunkel und bieten einen sehr hohen Kontrast, der die Lesbarkeit für Mensch und Maschine optimiert. Ebenso wichtig ist, dass weder Farbe noch Kontrast durch Veränderungen der Betrachtungs- oder Beleuchtungswinkel beeinflusst werden, was die Lesbarkeit zusätzlich erhöht. Für den Markt der wiederverwendbaren Medizinprodukte bietet das Black Marking zwei wichtige Vorteile: Erstens beeinträchtigt der Beschriftungsprozess eine zuvor passivierte Oberfläche nicht und zweitens führt eine vor der Passivierung durchgeführte Markierung nicht dazu, dass durch die nachfolgende Passivierung die Markierung in irgendeiner Weise verblasst.

Diese Widerstandsfähigkeit und Flexibilität, die Markierung in verschiedenen Prozessschritten durchführen zu können, maximiert den Wert des Verfahrens und senkt die Kosten. Bild 3 zeigt ein Beispiel für Korrosionstest-Referenzproben aus Edelstahl 1.4301, bei denen beide unter identischen Prozessbedingungen schwarz markiert waren, aber nur eine der Proben mit Citrisurf® danach passiviert wurde. Beide Proben wurden dann einem Korrosionstest von 72 Stunden in 50 °C, 5 % Salzwasser, unterzogen. Es gibt praktisch keinen Unterschied in der Fähigkeit der Markierungen, Korrosion zu widerstehen. Andere Edelstähle zeigen ähnliche Ergebnisse, und während Markierungen auf einigen minderwertigen Stählen durch diese Art der Korrosionsprüfung

leicht verblasst sind, sind sie immer noch sehr gut lesbar und ohne Anzeichen von Oberflächenkorrosion/Oxidation. Bild 4 zeigt die Fähigkeit von ps-Lasermarkierungen, einer späteren Passivierung standzuhalten. Hierzu wurde eine Data-matrixcodemarkierung einem typischen Passivierungszyklus des Eintauchens in 7 % Citrisurf® 2250 für 20 Minuten bei 50 °C unterzogen. Es ist keine signifikante Veränderung der Lesbarkeit der Markierung zu erkennen.

Ebenso gute Resultate erzielt das Black Marking auch bei wiederverwendbaren Medizinprodukten, die einer wiederholten Wiederaufbereitung (z.B. dem Autoklavieren) standhalten müssen. Bild 5 zeigt eine typische UDI-Markierung nach 50 Autoklavierzyklen, die aus alphanumerischen Daten und einem 2D-Barcode besteht. Die Markierung ist nicht verblasst und ebenso wichtig ist, dass keine Anzeichen für eine Oberflächenkorrosion vorhanden sind.

Ein weiterer wesentlicher Vorteil des ps-Laserbeschriftens ergibt sich aus den damit verbundenen minimalen thermischen Einflüssen. Das Verfahren ist damit besonders gut für den Einsatz bei thermisch empfindlichen und zerbrechlichen Teilen wie Drähten, Rohren, dünnen Blechen und kleinen Implantaten geeignet, da keine Gefahr einer Formänderung besteht.

Aus reinen Praktikabilitäts Gesichtspunkten ist es wichtig zu wissen, dass die Prozessergebnisse im Gegensatz zu Verfahren mit ns-Lasern relativ unempfindlich gegenüber Veränderungen der Laserleistung, des Laserfokus usw. sind. Dies führt zu einem großen Prozessfenster, was sowohl den Durchsatz als auch den Ertrag steigert.

Lasersysteme und Produktionsintegration

Pikosekundenlaser haben sich in den letzten 15 Jahren bewährt – so befinden sich beispielsweise allein von dem Coherent PowerLine Rapid NX hunderte Laser im Feld. Mit Ausnahme von Laser-Auftragsfertigern und Spezialmaschinenbauern benötigen die meisten Anwendungen heute aber viel mehr als den reinen Laser. Coherent wird diesem Bedarf durch unterschiedliche Integrationsebenen gerecht. Die beiden beliebtesten Lösungen sind Laser-Sub-Systeme wie der PowerLine Rapid NX, bestehend aus Strahlquelle,



Bild 5: Dieses Bild zeigt eine UDI-Markierung nach 50 Autoklavierzyklen ohne signifikanten Einfluss auf die Lesbarkeit und ohne sichtbare Korrosion.

Strahlführungsoptik und Scankopf sowie komplette Stand-Alone-Systeme inklusive Roboterautomatisierung.

Sowohl Sub-Systeme als auch schlüsselfertige Systeme werden mit einem Pikosekundenlaser mit einer Pulsfolgefrequenz von bis zu 1 MHz geliefert, um eine schnelle Markierung zu ermöglichen. Sie verfügen alle über das VisualLaserMarker (VLM)-Softwarepaket. Die VLM-Software besteht aus einem grafischen Editor zur Generierung des Layouts und einer CAD-Erweiterung zum Import aller gängigen Dateitypen: DXF, BMP, JPG, PDF und AI. Spezielle Markierinhalte und umfang-

reiche Beschriftungsparameter für die Markierung sind leicht konfigurierbar. Die schlüsselfertigen Systeme verfügen optional über eine Granit-Montageplattform für maximale Stabilität und Markierungsaufklärung. Der Arbeitsbereich ist auf maximale Flexibilität ausgelegt, um unterschiedliche Bauteilgrößen und -geometrien aufnehmen zu können. Bis zu drei lineare Bewegungsachsen arbeiten servogesteuert und können mit einer optionalen Drehachse für Rohre und andere rotationssymmetrische Teile kombiniert werden. Kundenspezifische Teileaufnahmen und Spannvorrichtungen sind ebenfalls



Bild 6: Schlüsselfertige Systeme für das Black Marking sind in sich geschlossene Arbeitsplätze, einschließlich einer optionalem Roboterschnittstelle und Absaugsystem.

verfügbar. Darüber hinaus beinhalten die schlüsselfertigen Systeme ein optionales Bildverarbeitungssystem, das eine automatisierte Vor- und/oder Nachkontrolle ermöglicht.

Die Steuersoftware und die externen Schnittstellen sind so konzipiert, dass sie die Integration in eine vernetzte Fabrik vereinfachen. Innerhalb der Automatisierungspyramide bietet das Laser-Framework I/O verschiedene Schnittstellen zu MES/ERP-Systemen, die sowohl standardisierte als auch proprietäre Schnittstellen unterstützen, darunter Host-Kopplung (HK), Marking Job Control (MJC) via TCP/IP, WS Siemens Webservice, HTTP, Unified Automation (OPC UA), Industry 4.0, um nur einige zu nennen.

In hochgradig vernetzten Fertigungsprozessen müssen Anlagen oft auch horizontal mit anderen Systemen oder SPS-Steuerungen kommunizieren können. Über eine TwinCat-Paketkomponente, die alle gängigen Bustypen unterstützt, können unterschiedliche Feldbussysteme angebunden werden: EtherCAT, Ethernet, TCP/IP, PROFIBUS, PROFINET, EtherNet/IP, CANopen, Modbus, IO-Link, RS232 und RS485.

Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die direkte Kennzeichnung auf Edelstahluntergründen zunehmend gefragt ist, um beispielsweise den Vorschriften für Medizinprodukte gerecht zu werden aber auch aus ästhetischen Gründen (z.B. Markenlogo). Ein neuer Laserprozess – nämlich das Black Marking – erfüllt genau diese Marktanforderung und bietet eine dauerhafte Kennzeichnung, die ohne erneute Passivierung auskommt und auch nach Dutzenden von Autoklavenzyklen gut lesbar bleibt.

(1) Thorsten Ferbach, Coherent Inc.,

METALL

Kontakt zur Redaktion:

metall.redaktion@gdmb.de