

WARMUMFORMUNG VERZINKTER STÄHLE

Dipl.-Ing. Karl M. Radlmayr MBA,
voestalpine Metal Forming GmbH

Dipl.-Ing. (DH) Reiner Kelsch MBA, Dipl.-Ing. (FH) Andreas Sommer,
voestalpine Automotive Components Schwäbisch Gmünd GmbH & Co. KG

Dipl.-Ing. Christian Rouet,
voestalpine Krems GmbH

Dipl.-Ing. Thomas Kurz, Dipl.-Ing. Josef Faderl MBA,
voestalpine Stahl GmbH

INHALT

- 03 Abstract
- 04 01. phs-ultraform®: Das Original
- 05 02. phs-directform®: Die verzinkte Innovation
für die direkte Warmumformung
 - 05 02.01. Vorkühlung
 - 06 02.02. Grundwerkstoff
 - 09 02.03. Korrosion
 - 10 02.04. VDA 621-415
 - 11 02.05. VDA 233-102
 - 12 02.06. Fügechnik
 - 13 02.07. Der nächste Entwicklungsschritt – phs-rollform®
 - 14 02.08. Zusammenfassung

ABSTRACT

Die Anforderung an sicherheitsrelevante Strukturbauteile sind hohe Festigkeiten in Kombination mit guter Energieaufnahme um die Leichtbau- und Craschanforderungen zu erfüllen.

Darüber hinaus sollen die eingesetzten Werkstoffe gut verarbeitbar (Umformen, Fügen, Lackieren) und korrosionsbeständig sein. Mit dem direkten Warmumformen von blanken und in weiterer Folge feueraluminierten MnB-Stählen konnten die Anforderungen Festigkeit und Crashperformance erfüllt werden.

Während auf der einen Seite 1985 die erste verzinkte Großserienkarosserie auf den Markt kam, konnte erst über 20 Jahre später das erste verzinkte Warmumformteil über den indirekten Prozess in die Serie gebracht werden.

Dazu bedurfte es der Aufhebung der physikalischen Grenzen zwischen Zink und Stahl (Zn-Schmelzpunkt: 420 °C, Zn-Siedepunkt: 907 °C, Austenitisierungstemperatur für Fe: 900 °C). Das Wissen um die bei der Wärmebehandlung ablaufenden Schichtreaktionen und der Gefügeumwandlungen im Borstahl hat jedoch das scheinbar Unmögliche möglich gemacht. Das mögliche Auftreten von Liquid Metal Embrittlement (LME = Lötrissigkeit) wurde beim indirekten Prozess durch die vorgeschaltete Kaltumformung vermieden.

Das phs-directform®-Verfahren löst ab sofort auch das LME-Problem im direkten Prozess und ermöglicht dadurch den flächendeckenden Einsatz verzinkter Warmumformbauteile in der Karosserie. Eine Vorkühlung und eine Legierungsanpassungen des Grundmaterials waren dazu erforderlich.

01 phs-ultraform[®]: das Original

Bei diesem Prozess konnte auf den klassischen Grundwerkstoff 22MnB5 aufgesetzt werden. Dieser weist durch die optimierten Herstellerparameter auf der Warm-, Kaltwalz-, und Feuerverzinkungsrouten eine exzellente Kaltumformbarkeit auf. Die Analyse für die 1500 MPa-Variante ist von der Kaltumformbarkeit mit einem HSLA340 vergleichbar. Umform- und insbesondere die Schneid- und Lochoperationen vor dem Austenitisieren ergeben eine deutlich verbesserte Crashperformance im Vergleich zu hart- oder lasergeschnittenen Bauteilen. Das Einfrieren der kaltumgeformten Geometrie mit dem patentierten Formhärteverfahren ermöglicht zudem höchste Maßhaltigkeit und Reproduzierbarkeit, ohne im gehärteten Zustand noch einmal schneiden zu müssen (Bild 1).

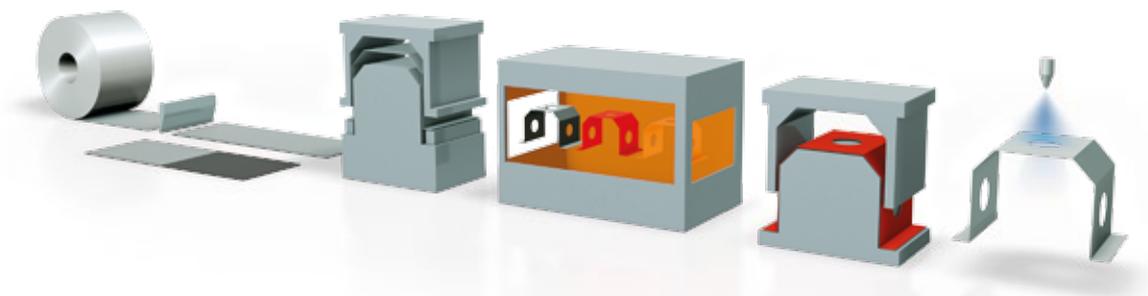


Bild 1: phs-ultraform[®], der indirekte Prozess für verzinkten presshärtbaren Stahl

Hinterschnitte sind über Schieber realisierbar und die Bauteilgröße ist auf Grund einer eigenen Ofenentwicklung nicht von technisch machbaren SiC-Rollenlängen abhängig, womit komplette Seitenwände realisierbar sind. In Kombination mit dieser Ofentechnologie wurden taktzeitneutrale Tailored-Property Parts (TPP) entwickelt, bei denen über Tailored Heating (partielles Austenitisieren im Ofen) Bereiche, die sich plastisch verformen sollen, nicht gehärtet werden, alle anderen die volle Festigkeit von bis zu 1500 MPa aufweisen.

Bild 2 zeigt die Übersicht aller derzeit möglichen TPP-Varianten, die mit der phs-ultraform[®]-Technologie herstellbar sind.

Die zum Einsatz kommende Zn-Schicht weist exzellente Kaltumformeigenschaften und minimale Reibungswerte auf, womit geringster Werkzeugverschleiß garantiert ist.

Das eingangs erwähnte, auf den ersten Blick scheinbare Aufheben der physikalischen Grenzen von Zink und Eisen bis zur Austenitisierung wird durch kombinierte Oxidation von Zn und dem in der Zn-Schicht enthaltenem Aluminium erreicht, die ein Verdampfen der Zn-Schicht während der Zn-Fe-Reaktion unterbinden. Die sich im Zuge der Wärmebehandlung des kaltumgeformten Bauteils bildende Oxidhaut verhindert in Kombination mit aus der Stahloberfläche wachsenden Zink-Eisen-Kristallen das Abfließen des aufgeschmolzenen Zinks selbst in vertikal stehenden Bauteilbereichen.



Bild 2: Varianten der möglichen Tailored-Property Parts

02 phs-directform[®]: Die verzinkte Innovation für die direkte Warmumformung

Die Löttrissigkeit, das heißt der Korngrenzenangriff von Stahl durch flüssiges Zink bei gleichzeitiger Spannungsüberlagerung, wurde lange Zeit für unlösbar gehalten. Eigene Untersuchungen mit unterschiedlichen Zinkauflagen, -mengen und Prozessparametern brachten keine Lösung.

02.01. Vorkühlung

Der Durchbruch gelang mit einer berührungsfreien Vorkühlung zur Vermeidung flüssiger Phasen während der Warmumformung (Bild 3). Die in den ersten beiden Linien implementierten Kühleinheiten basieren auf getrennt regelbaren Düsenfeldern, die nach dem Austenitisierungsbereich (Ofen) gezielt einstellbare Luftmenge beidseitig auf die heiße Blechoberfläche blasen.

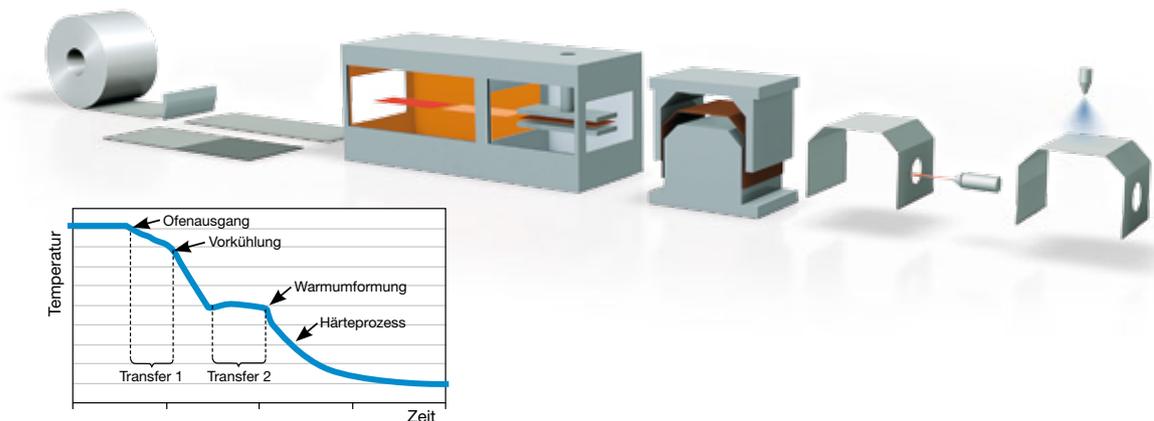


Bild 3: phs-directform[®]-Prozess mit Vorkühlungsprinzip

Die breite Regelbarkeit ermöglicht nicht nur die Realisierung vergleichbarer Taktzeiten bei unterschiedlichen Blechdicken, sondern bildet auch die Voraussetzung für die Verarbeitung von lasergeschweißten Platinen mit unterschiedlichen Blechdicken, die unterschiedliche Kühlmengen benötigen.

Der Aufbau eines derartigen Düsenfeldes ist beispielhaft in Bild 4 dargestellt. Die positive Auswirkung dieser Zwischenkühlung zeigt Bild 5. Sämtliche Mikrorissarten können damit eliminiert werden.

Unterschiedliche Blechdicken und damit gegebenenfalls unterschiedliche Transferzeiten zwischen Ofen und Presse, sowie die Zeit, die für die (taktzeitneutrale) berührungsfreie Vorkühlung benötigt wird, verlangen nach einem stabilen und großen Prozessfenster. Dieses konnte mit dem üblichen Grundwerkstoff 22MnB5 nicht garantiert werden.

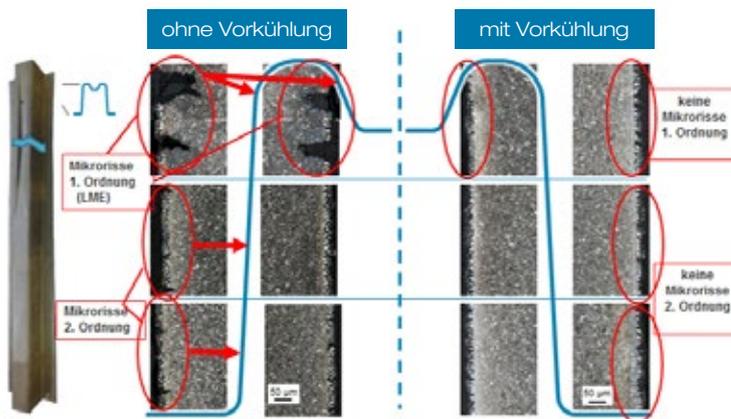


Bild 5: Auswirkung der Vorkühleinheit auf die Mikrorissbildung

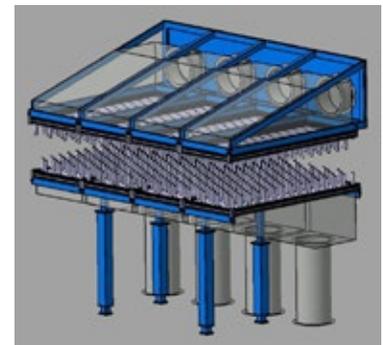


Bild 4: Düsenfeldkonstruktion zur unterschiedlichen Kühlung von 4 Bereichen

02.02. Grundwerkstoff

Es wurde daher ein 20MnB8 entwickelt, der diese Voraussetzung erfüllt und durch die Verschiebung der Ferrit-, Perlit- und Bainit- Bereiche zu längeren Zeiten einen stabilen und breiten Abkühlkorridor für dieses Verfahren ermöglicht. Die Auswirkung der Analysenänderung zeigt Bild 6.

Als weitere Modifikation zum indirekten phs-ultraform®-Prozess kommt an Stelle der klassischen Zinkschicht Z140 oder Z180 (GI70/70 bzw. GI90/90) eine ZF180 – Schicht (Galvannealed) GA(90/90) zum Einsatz.

Diese führt auf Grund des höheren Emissionsgrades zu einer um 30 % bis 40 % schnelleren Aufheizung und ergibt ein robustes Ofenprozessfenster. Die im Vergleich zu Al-Si-Schichten geringere Schichthärte und der halbierte Reibungskoeffizient reduzieren deutlich den Werkzeugverschleiß und ermöglichen komplexere Geometrien.

Den Vergleich der beiden Zinkschichten vor und nach den Austenitisierungsprozess zeigt Bild 7.

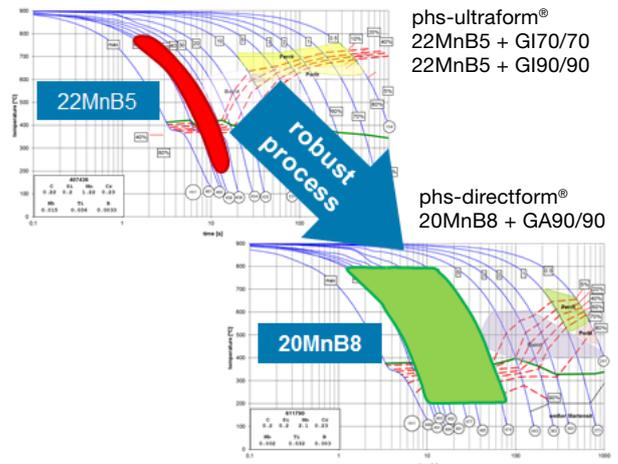


Bild 6: Vergleich der Prozessfenster der Analysen 22MnB5 und 20MnB8

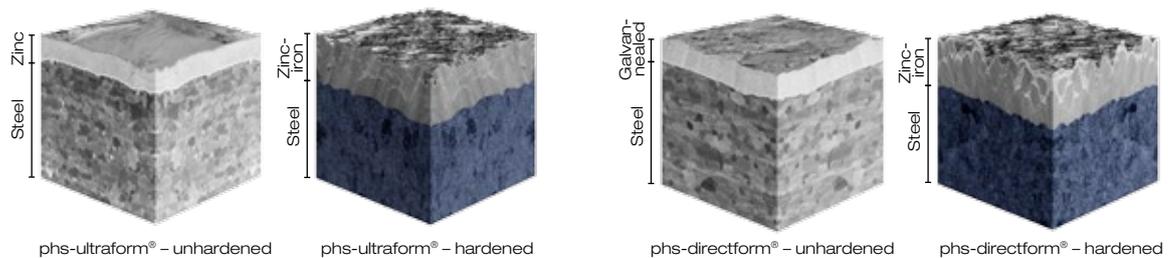


Bild 7: Gefüge und Schichtausbildung im ungehärteten und gehärteten Zustand

Die Reibungskoeffizienten in Abhängigkeit der Werkzeugwerkstoff bzw. -beschichtung zeigt Bild 8.

Die bisher gefertigten Prototypen zeigen das große Fertigungspotential dieser Technologie auf, die speziell in Kombination mit aktuell laufenden Weiterentwicklungen zu einer deutlichen Erhöhung des Anteils verzinkter Warmumformteile führen wird.

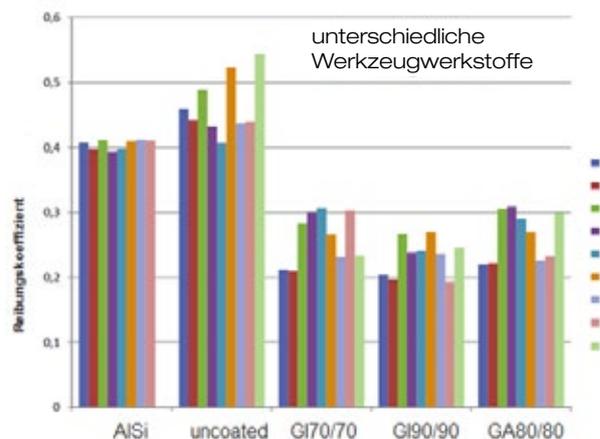


Bild 8: Reibungskoeffizient der Warmumformstähle in Abhängigkeit ihrer Oberflächenbeschichtung

Die erste Serienanlage mit dieser Technologie wurde Anfang Juli 2016 in Betrieb genommen und steht bei voestalpine Automotive Components Schwäbisch Gmünd GmbH & Co KG.

Wie bei den phs-ultraform®-Anlagen wird auch bei der phs-directform®-Linie mit normaler Umgebungsatmosphäre gearbeitet, da bei Zinkbeschichtungen keine Wasserstoffversprödung im Ofen auftreten kann. Taupunktregelungen bzw. Schutzgasatmosphären werden daher nicht benötigt.

Ein weiterer Vorteil der Zn-Schicht liegt im Prozessfenster. Nachdem im Gegensatz zu Al-Si-Schichten keine Diffusionszeiten zur Schichtausbildung benötigt werden, reichen für den Grundwerkstoff wenige Sekunden auf Austenitierungstemperatur um das volle Festigkeitspotential zu erzielen.

Da keine speziellen Aufheizkurven gefahren werden müssen, sondern nur die Zieltemperatur relevant ist, können unterschiedliche Erwärmungstechnologien zum Einsatz gebracht werden. Relevant für das Korrosionsverhalten ist die durch den Erwärmungsprozess eingestellte Schichtzusammensetzung.

Bild 9 zeigt eine REM Aufnahme der Fe-Zn Reaktionsschicht von feuerverzinktem Stahlband nach dem Presshärteprozess. Intermetallische Phasen unterschiedlicher Zusammensetzung zeichnen sich durch unterschiedliche Grauschattierungen aus. Zinkreiche Phasen erscheinen dann heller als eisenreiche Phasen.

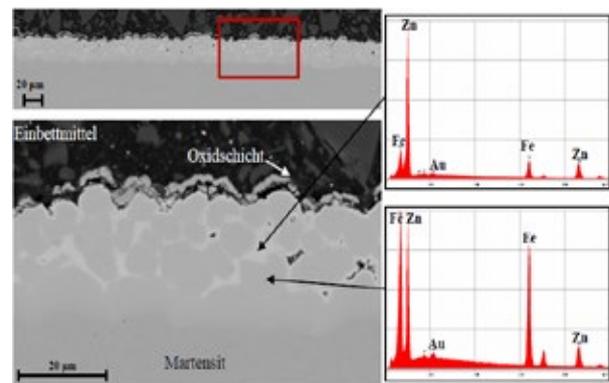


Bild 9: REM-Aufnahme der Mikrostruktur der Zn-Fe-Reaktionsschicht von pressgehärtetem feuerverzinktem Stahlband.

Deutlich zu erkennen ist die Veränderung der Zinkschicht durch den Presshärteprozess. Die im Ausgangszustand 10 µm dicke Zn-Schicht reagiert zu einer ungefähr 20 – 30 µm dicken Schicht, bestehend aus 2 verschiedenen Zink-Eisen Phasen, mit deutlich unterschiedlicher Zusammensetzung. Die helleren Bereiche in der Schicht haben einen Zinkgehalt von ca. 70 Masse-%. Die dunkleren Bereiche haben einen Zinkgehalt von ca. 40 Masse-%.

02.03. Korrosion

Nachdem die Korrosionsperformance einen wesentlichen Grund für den Materialeinsatz darstellt, wird für die laufende Produktion ein auf galvanostatischer Auflösung beruhender Schnelltest verwendet, für die generelle Vergleichbarkeit kamen die normierten VDA-Tests zum Einsatz.

Bild 10 zeigt eine galvanostatische Auflösungskurve von pressgehärtetem feuerverzinktem Stahlband im Vergleich zum ungehärteten Zustand.

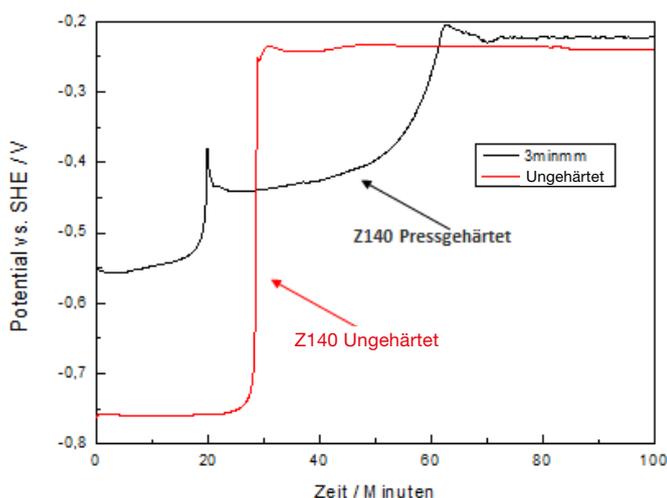


Bild 10: Galvanostatische Auflösung von pressgehärtetem feuerverzinktem Stahlband (schwarz) im Vergleich zum Ausgangszustand (rot).

Das Potential zu Beginn der galvanostatischen Auflösung von pressgehärtetem feuerverzinktem Stahlband (repräsentiert durch die schwarze Linie in Bild 10) beträgt $-0,54$ V SHE. Dieser Wert entspricht der Γ -ZnFe Phase, welche zuerst in Lösung geht. Nach einer Dauer von etwa 20 Minuten bei einer Stromdichte von ca. 12 mA/cm² steigt das Potential auf $-0,4$ V SHE. Dies bedeutet, dass die Γ -ZnFe Phase nun verbraucht ist und Zinkferrit kontinuierlich aufgelöst wird. Nach einer Zeit von etwa 60 Minuten erreicht das Potential das Stahlpotential von $-0,22$ V SHE.

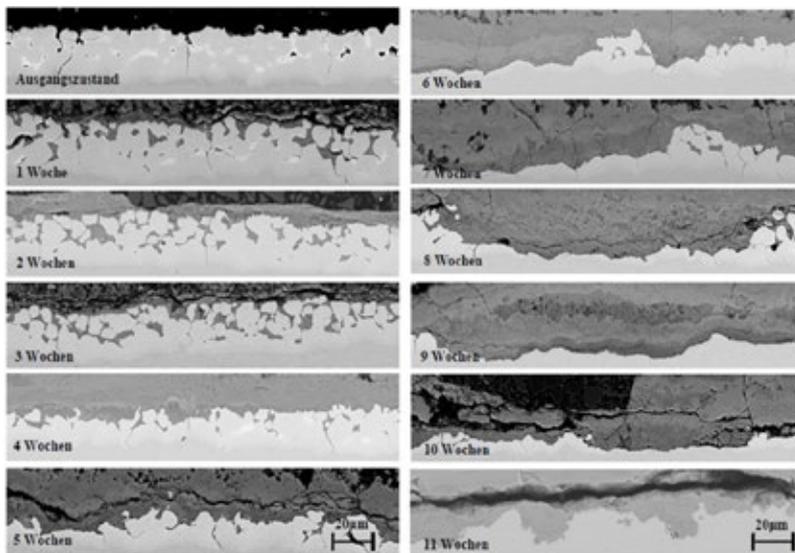
Beide Potentiale der Zink-Eisen Phasen sind signifikant niedriger als das Potential des Stahlsubstrats und bieten somit ein exzellentes kathodisches Korrosionsschutzpotential für das Stahlsubstrat.

Verifiziert wurden diese Annahmen mit zwei in der Automobilindustrie anerkannten Korrosionstests.

02.04. VDA 621-415

Der VDA-Wechsel-Test ist eine beschleunigte, zyklische Korrosionsprüfung, bei der die Prüflinge nacheinander einer 24-stündigen Salzsprühnebelprüfung nach EN ISO 9227, einer 4-tägigen Kondenswasser-Klimawechselprüfung nach DIN 50017-KFW und 28 Stunden Umgebungsklima nach DIN 50014 ausgesetzt werden. Der VDA-Wechseltest wird vor allem zur Prüfung von Automobilkomponenten eingesetzt. Durchgeführt wurde der Test in einer vollautomatisierten Weiss SC 1000 Prüfkammer.

Zur Feststellung des Korrosionsfortschrittes, beziehungsweise des Zeitpunktes des Grundmaterialangriffes, wurden Querschliffe von den korrodierten Proben erstellt und mittels REM untersucht. Bild 11 zeigt jene Querschliffe nach verschieden langen Auslagerungszeiten.



Elektrolyt: 100 g l-1 ZnSO₄ · 7 H₂O + 200 g l-1 NaCl; T = 25 °C; belüftet; I = 11,76 mA cm⁻²

Bild 11: REM Aufnahmen von Querschliffen pressgehärteter feuerverzinkter Stahlbänder nach Auslagerung in VDA 621-415

Augenscheinlich ist, dass die erste Grundmaterialkorrosion erst nach 11 Wochen im VDA 621-415 Test feststellbar ist. Somit zeigt pressgehärtetes feuerverzinktes Stahlband, im Vergleich zu ungehärtetem, einen mehr als fünfmal so langen Schutz vor Grundmaterialkorrosion, welcher im ungehärteten Zustand schon nach 2 Wochen durch erste Rotroststellen feststellbar ist. Hauptursachen hierfür sind die größere Schichtdicke, welche durch den Presshärteprozess entsteht, und die geringere Korrosionsrate.

Bei Betrachtung der korrodierten Querschliffe, im Vergleich zum Ausgangszustand, fällt des Weiteren auf, dass die Γ -ZnFe-Phase, repräsentiert durch die hellgrauen Bereiche, bevorzugt korrodiert wird. Jenes Verhalten wird durch den deutlichen Potentialunterschied zum Zinkferrit auch erwartet.

02.05. VDA 233-102

Zur Verifizierung der Korrosionsergebnisse des VDA 621-415 Test wurden die Proben auch in einem neu entwickelten VDA Test (VDA 233-102) ausgelagert. Durchgeführt wurde der Test in einer vollautomatisierten Weiss WK 1000 Prüfkammer. Der VDA 621-415 Test und der VDA-Neu Test unterscheiden sich vor allem in der Salzkonzentration, Rampenfahrweise, der Temperatur, der Luftfeuchtigkeit und der Testdauer.

Bild 12 zeigt Querschliffe nach verschiedenen langen Auslagerungszeiten in VDA Test 233-102. Nach 6 Zyklen ist noch keine Grundmaterialkorrosion feststellbar. Im Vergleich zum ungehärteten Zustand, bei der Grundmaterialkorrosion bereits nach 4 Wochen auftritt, zeigt pressgehärtetes feuerverzinktes Stahlband, einen deutlich längeren Schutz. Der Zeitpunkt des Grundmaterialangriffes wurde nicht bestimmt. Hauptursache für den größeren Schutz ist die größere Schichtdicke, welche durch den Presshärteprozess entsteht, da die Korrosionsraten im VDA-Neu Test vergleichbar sind. Auch in VDA 233-102 korrodiert die Γ -ZnFe-Phase zuerst. Der korrosive Angriff am Zink-Ferrit erfolgt erst nach dem Aufbrauchen der Γ -ZnFe-Phase. Beide Zn-Fe-Phasen stellen einen kathodischen Schutz für das Grundmaterial dar.

Beide Tests bestätigen das exzellente kathodische Korrosionsschutzpotenzial verzinkter warmumgeformter Bauteile.

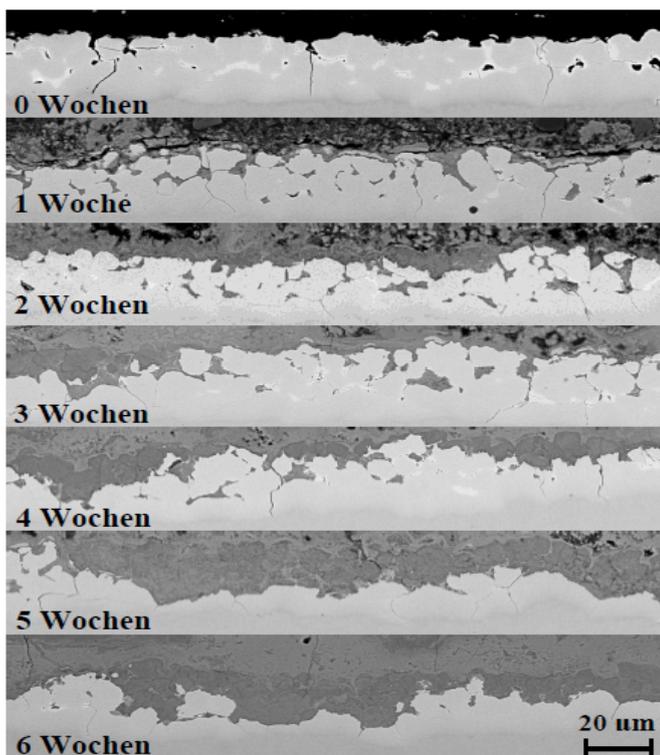


Bild 12: REM-Aufnahmen von Querschliffen pressgehärteter feuerverzinkter Stahlbänder nach Auslagerung in VDA Neu

02.06. Fügetechnik

Das am häufigsten angewendete Fügeverfahren in der Automobilindustrie ist nach wie vor das Punktschweißen. Dieses wird vom (Oberflächen-) Widerstand und Grundwerkstoff beeinflusst. Unterschiedliche Zusammensetzungen der Zn-Fe-Schicht in Abhängigkeit der Ofenverweilzeit können somit einen Einfluss haben.

In Bild 13 sind die Schweißbereiche von 22MnB5 und 20MnB8 mit unterschiedlichen Schichtauflagen und einer langen sowie kurzen Ofenverweilzeit dargestellt. Die dazugehörigen Schweißlinsendurchmesser sind ebenfalls angegeben. Wie daraus erkennbar ist, bleiben die Linsendurchmesser von Ofenzeit und Legierungsänderung nahezu unbeeinflusst. Bei den Schweißbereichen wird durch längere Ofenverweilzeiten die Spritzergrenze zu ca. 1 kA niedrigeren Werten verschoben.

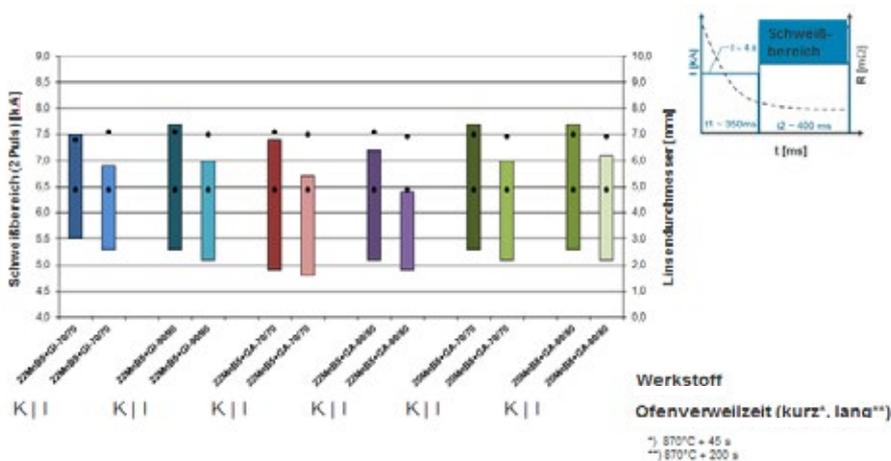


Bild 13: Punktschweißbarkeit in Abhängigkeit von Werkstoffen und Verweilzeit

Der Schweißbereich selbst wird etwas schmaler. In jedem Fall sind die Ergebnisse als stabil und prozesssicher einzustufen, wobei besonders die Elektrodenstandzeiten hervorzuheben sind, die mit deutlich über 1500 Punkten, die Werte von alternativen Schichtsystemen bei weitem übertreffen.

Weitere Fügeverfahren wie das MIG- und Laserschweißen werden in diesem Beitrag nicht detailliert beschrieben, sind jedoch mittlerweile millionenfach bewährt im Serieneinsatz.

Für Mischverbindungen wie zum Beispiel Aluminium und verzinkte Warmumformstähle wird Kleben und Stanznieten eingesetzt. Für die Klebprozesse gilt das Gleiche wie für die Schmelzschweißverfahren, das heißt problemlos einsetzbar, bei den mechanischen Fügeverfahren, wird die hohe Festigkeit aktuell durch den Einsatz weicherer Fügebereiche mittels lasergeschweißten Platinen oder partiell ungehärtete Bereiche (siehe Bild 2) umschifft.

Entsprechende Entwicklungen, um auch die vollmartensitischen Bereiche fügen zu können, sind im Laufen.

02.07. Der nächste Entwicklungsschritt – phs-rollform®

Die bisher beschriebenen Verfahren sind in der Lage mehr oder weniger jede gewünschte Geometrie darzustellen, benötigen dazu zur Einstellung industrieller Taktzeiten aber immer Öfen mit Längen von zumindest 20 m Länge. Variable Bauteillängen und geschlossene Querschnitte sind auf Grund der Werkzeuggeometrie nicht darstellbar.

Eine Lösung bietet dafür die zur Herstellung von Rohren und Profilen eingesetzte Rollformtechnologie.

phs-rollform® basiert auf diesen Erfahrungen. Durch Integration einer induktiv und/oder gasbasiert beheizten Austenitisierungszone mit anschließender Härtung in den Rollformprozess, ist die Herstellung von Rohren und Profilen bis zu Festigkeiten von 1800 MPa möglich. Wie aus Bild 14 ersichtlich, können Rohre und Profile durch selektive Erwärmung sowohl über die Länge als auch den Querschnitt partiell gehärtet werden.

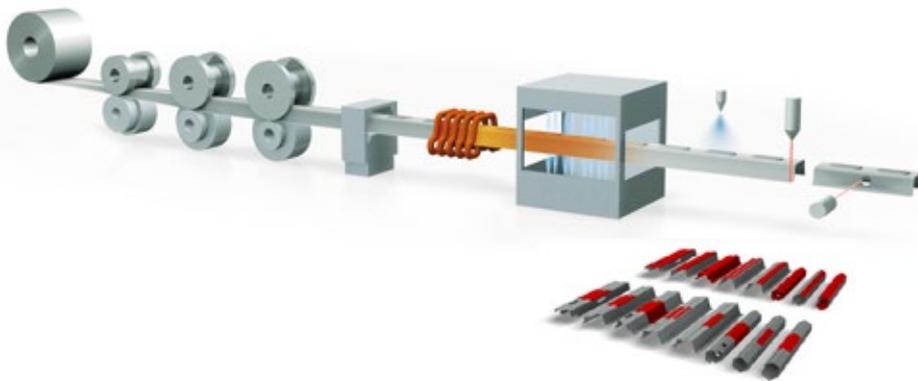


Bild 14: phs-rollform®- Prozess und Möglichkeiten für Tailored Tubes

Verfahrensinhärent sind dabei beliebige Längen ein und derselben Geometrie, das heißt dass bei Plattformen unterschiedliche Fahrzeuglängen modular dargestellt werden können. Ergänzend zu den Tailored Property Parts wird somit das Feld der Tailored Tubes eröffnet.

Bild 15 zeigt den Härteverlauf des gesamten Querschnittes sowie die Festigkeitskennwerte des gehärteten Dachbereiches im Vergleich zu den weichen Zargen. Die gleichmäßigen Übergänge sind gut zu erkennen. Mögliche Einsatzgebiete derart hergestellter Bauteile zeigt Bild 16.

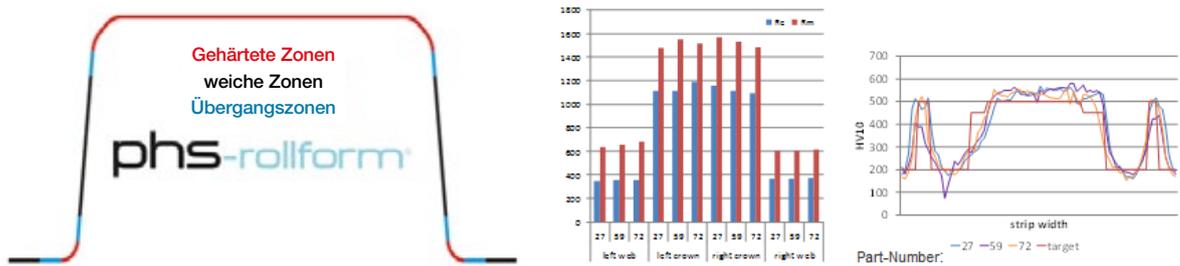


Bild 15: Härte und Festigkeitsverteilung eines partiell gehärteten Schwellers

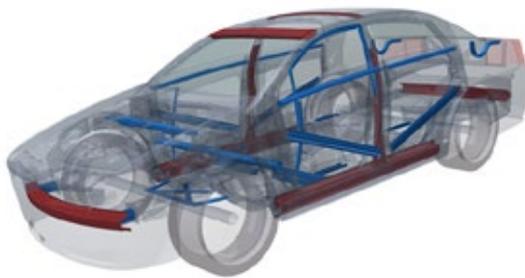


Bild 16: Anwendungsmöglichkeiten für phs-rollform®

02.08. Zusammenfassung

- Herstellung hochkomplexer und großer Bauteile mit überragender Crashperformance mittels phs-ultraform®
- Herstellung einfacherer Bauteile mit geringstem Werkzeugverschleiß mittels phs-directform®
- Intelligente Ofenkonzepte ohne Schutzgaserfordernis bei gleichzeitig einfach erkennbaren Prozessgrenzen und großen Prozessfenstern
- Taktzeitneutrale und maßstabile Tailored Property Parts
- Alle (alternativen) Heizverfahren einsetzbar
- Herstellung von Tailored Tubes & Sections mittels phs-rollform®
- Leistungssteigernde Weiterentwicklungen in Aussicht

Einem flächendeckenden Einsatz verzinkter ultrahochfester Bauteile steht somit nichts mehr im Wege.