

Einfluss der Herstellungsrouten auf die Umformbarkeit von Cr-Mn-Verbundwerkstoffen für das Presshärten

Markus Stennei^{1,a}, Joshua Grodotzki¹ und A. Erman Tekkaya¹

¹Institut für Umformtechnik und Leichtbau (TU Dortmund), Baroper Straße 303, 44227 Dortmund, Deutschland

^amarkus.stennei@iul.tu-dortmund.de

Keywords: Presshärten, Wärmebehandlung, Verbundwerkstoffe, Biegeversuche

Abstract. The analysis of bending properties of a new composite material for press hardening is presented in this paper. This composite material consists of a boron-Mangan core (22MnB5) and a stainless-steel cover layer. The core material is the typical press hardening material for industrial applications. Two different types of top layer are considered, an austenitic (1.4301) and a martensitic (1.4021) stainless steel.

Initial investigations [1] have shown that the manufacturing of the roll clad semi-finished product leads to low the formability of the cover layer materials. In this analysis, different heat treatment strategies have been added to the process route and their influence on the formability is investigated. For this purpose, a 3-point bending test with optical strain measurement system is developed. The test setup allows the accurate determination of the strain at failure of the cover layer at room temperature. It is shown that neither heat treatment after hot rolling nor intermediate annealing during cold rolling improves formability. The highest degree of forming on the outer bend is obtained with a process route without heat treatment. Even in this particular case, the remaining formability is about 50 % lower compared with the values achieved by the untreated material of the cover layer. No reduction in bond strength due to heat treatment was observed. The formability results indicate that further analysis of the entire process chain and the associated diffusion processes is necessary to understand the remaining underperformance of the composite material.

Motivation

Die stetig steigenden Anforderungen an CO₂-Emissionen und Sicherheit im Transportwesen führen zu dem fortwährenden Bestreben, hochfeste Bauteile mit geringer Wandstärke herstellen zu können. Ein gängiges Verfahren hierfür ist das Presshärten, welches die Warmumformung und das Härten zur Herstellung endkonturnaher Blechbauteile mit hoher spezifischer Festigkeit in einem Umformprozess kombiniert [2]. Hierbei werden aufgrund der ausgewogenen Eigenschaften wie Festigkeit, Formbarkeit und Schweißbarkeit vorwiegend Bor-Mangan-Stähle (22MnB5) eingesetzt [3].

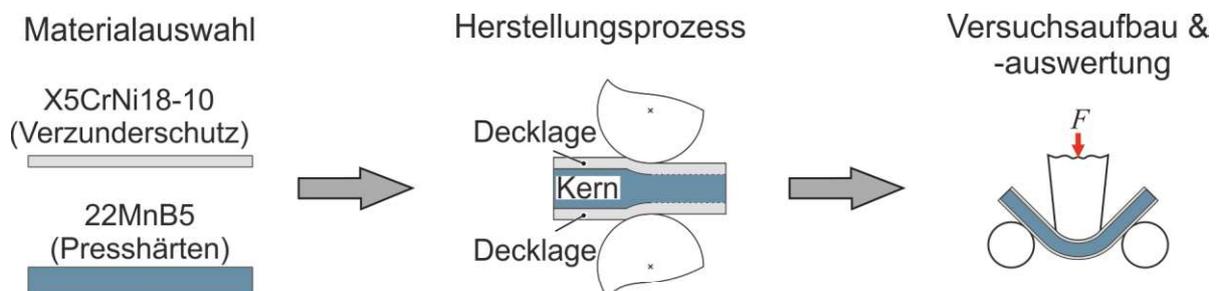


Abb. 1: Vorgehen zur Herstellung und Charakterisierung von Verbundwerkstoffen

Die Bleche müssen jedoch aufgrund der erhöhten Temperaturen, während der Austenitisierung und der Umformung vor Verzunderung geschützt werden, weshalb AlSi-

Beschichtungen eingesetzt werden. Diese Beschichtungen benötigen eine zeitintensive Wärmebehandlung, um hochtemperaturfeste, verzunderungsbeständige Diffusionsschichten auszubilden [4]. Zur Verwendung schnellerer und energieeffizienterer Austenitisierungsstrategien z. B. dem induktiven Erwärmen, werden in dieser Arbeit zwei alternative Sandwichwerkstoffe vorgestellt. Die Verbundwerkstoffe bestehen aus einem 22MnB5 Kern und einer nichtrostenden Chromstahldecklage (martensitisch/austenitisch), welche mittels Walzplattieren einen stoffschlüssigen Verbund bilden [1]. Die Herstellungsrouten, welche diverse Warm- und Kaltwalzschritte umfasst, ist genauso wie die Wärmebehandlung beim Presshärten entscheidend für die Umformeigenschaften des Verbundmaterials. Ziel dieser Arbeit ist die Analyse der Biegeeigenschaften beider Verbundwerkstoffe hinsichtlich einer Änderung aufgrund der Wärmebehandlung.

Stand der Technik

Ein Prozess zur Herstellung von hochfesten Bauteilen ist das sogenannte direkte Presshärten, wobei das Ausgangsmaterial mittels Wärmebehandlung in ein vollständiges Austenitgefüge umgewandelt wird (Austenitisierung). Hierzu werden in der Industrie hauptsächlich Rollöfen verwendet, welche das Blech mittels Konvektion und direkter Wärmestrahlung mit einer Aufheizrate von ca. 5 K/s auf eine Temperatur von 950 °C erwärmen [5].

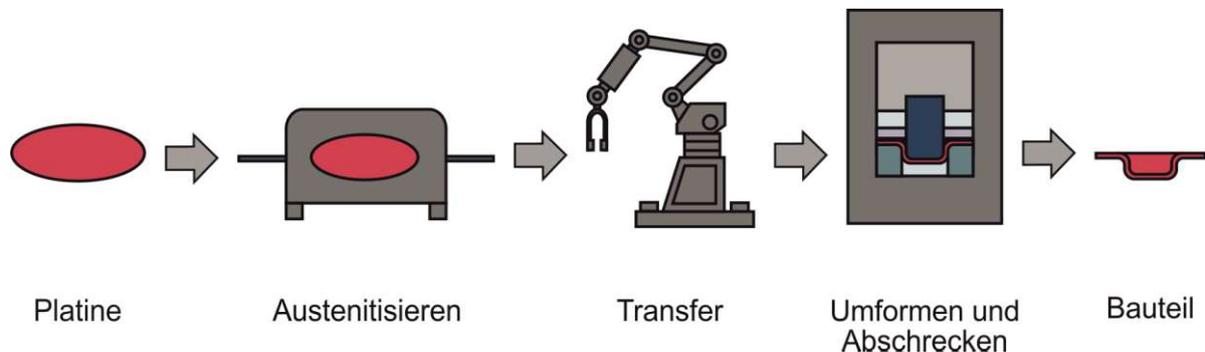


Abb. 2: Schematische Darstellung des Presshärteprozesses [2]

Anschließend findet der Transport in das Werkzeug statt, wo das Blech in die Zielgeometrie umgeformt wird und zeitgleich durch gekühlte Werkzeuge abgeschreckt wird. Bei der Verwendung von Bor-Mangan-Stählen ist es möglich, durch wassergekühlte Werkzeuge vollständig martensitische Gefüge zu erreichen [6]. Dabei muss beim 22MnB5 eine kritische Abkühlrate von 27 K/s erreicht werden [2]. Diese Rate wird maßgeblich durch den Wärmeübergangskoeffizienten beeinflusst, welcher von der Oberflächenrauheit, dem vorherrschenden lokalen Anpressdruck, der Materialzusammensetzung und der Beschichtung abhängig ist [7].

Neben dem Wärmeübergang zwischen Blech und Werkzeug muss bei einem Verbundwerkstoff auch eine gute Wärmeleitung innerhalb des Halbzeuges vorliegen. Eine solche Verbindung kann mittels Walzplattieren hergestellt werden. Dieses Verfahren bildet mittels Pressschweißen eine stoffschlüssige Verbindung zwischen den Verbundpartnern aus. Das Verfahren wird in die Schritte Oberflächenvorbehandlung, Schneiden, Stapeln, Walzen sowie Wärmebehandlung der Plattierpakete unterteilt [8]. Im Walzschritt kommt es zur Längung des Materials, sodass ein Aufreißen von Deckschichten an den Grenzflächen stattfindet. Das freigelegte Material kann somit unter Druck verschweißen. Die Qualität der Verschweißung ist abhängig von der mechanischen Ähnlichkeit der Verbundpartner, den Walzparametern, der Ausbildung von Oxidschichten, der Oberflächenrauheit, der Sauberkeit und den Umgebungsbedingungen. In der Regel erzeugen größere Höhenabnahmen und hohe Rauheiten eine Verbesserung der Verbundqualität, da eine größere wahre Oberfläche vorliegt. Findet das Walzen zur Reduzierung der Walzkräfte bei erhöhten Temperaturen statt, werden zur

Verringerung des Oxidationsrisikos bei der (Wieder-)Erwärmung die Walzplattierpakete am Außenrand umlaufend verschweißt. Neben dem Herstellungsprozess können weitere Glühbehandlungen die Verbundfestigkeit beeinflussen [9].

Ausgangsmaterial

Der 22MnB5 der Firma SSAB (Boron 22) in der Stärke von 20 mm bildet als gängiger Presshärtestahl den Kern des Sandwichbleches. Im gelieferten Zustand liegt ein ferrit-perlitisches Gefüge vor und weist eine Zugfestigkeit R_m von 550 MPa auf. Nach Herstellerangabe ermöglicht ein Abschrecken im Wasserbad eine Zunahme der Zugfestigkeit auf 1500 MPa [10].

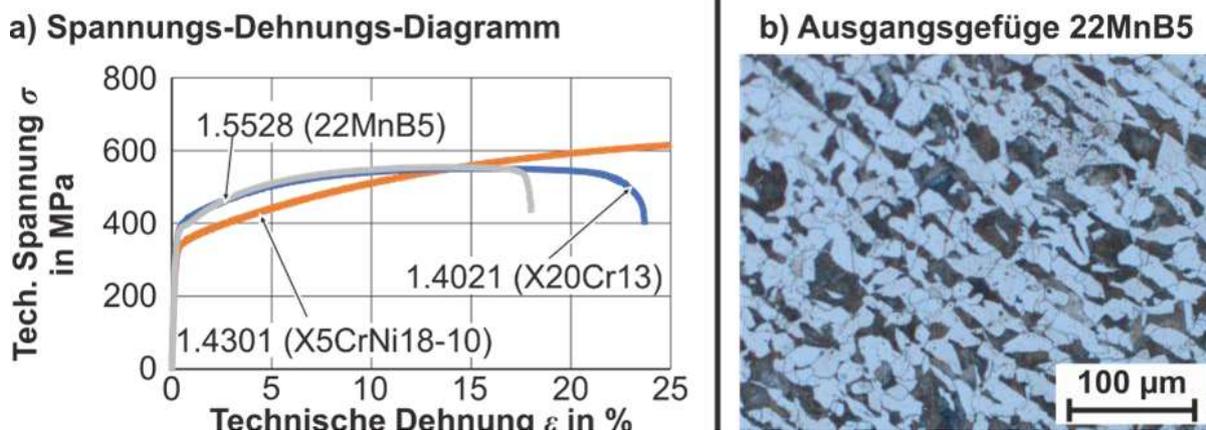


Abb. 3: a) Spannung-Dehnungsdiagramm der Basiswerkstoffe im Ausgangszustand und b) Gefügedarstellung des Kernwerkstoffes vor dem Walzplattieren

Zur Realisierung des Verzunderungsschutzes werden zwei nichtrostende Chromstähle ausgewählt. Der Erste ist ein austenitischer, nichtrostender Chromstahl (X5CrNi18-10). Bei diesem Werkstoff findet aufgrund der Temperaturbehandlung keine Gefügeumwandlung statt, sodass nachdem Presshärten keine Zunahme der Festigkeit und Härte zu erwarten ist. Im Lieferzustand weist der Werkstoff eine Zugfestigkeit R_m von 650 MPa auf. Der zweite Werkstoff ist ein martensitischer, nichtrostender Chromstahl (X20Cr13), welcher analog zum Kernwerkstoff im ferrit-perlitischen Ausgangsgefüge vorliegt. Die Zugfestigkeit R_m im Lieferzustand beträgt 550 MPa. Durch das Austenitisieren und Abschrecken mit einer Abkühlrate größer 3 K/s ist eine Steigerung der Festigkeit auf mehr als 1500 MPa möglich [11].

Herstellung von Sandwichblechen

Die Herstellung der Verbundwerkstoffe erfolgt mithilfe des Walzplattierens, wobei ein stoffschlüssiger Verbund zwischen den Ausgangswerkstoffen ausgebildet wird. Die Herstellbarkeit eines Verbundes mit ähnlichen Verbundpartnern zeigten Kamaliev et al. [12]. Vor dem eigentlichen Walzen werden die oben genannten Basiswerkstoffe zu einer Länge von 250 mm und einer Breite von 100 mm zugeschnitten. Anschließend werden die Oberflächen mittels Sandstrahlen gereinigt und angeraut. Die präparierten Basiswerkstoffe werden zu Sandwichpaketen mit einem Schichtdickenverhältnis von 1:8:1 verschweißt, wobei jeweils eine nichtrostende Chromstahlplatte ($d = 2,5$ mm) ober- und unterhalb des Bor-Mangan-Stahls ($d = 20$ mm) angeordnet ist. Die Paketdicke wird anschließend in mehreren Warm- und Kaltwalzstichen auf die Zieldicke von 1,5 mm reduziert. Die genauen Höhenabnahmen und die Ofeneinstellung vor dem jeweiligen Stich sind in Tab. 1 aufgelistet. Zwischen dem vierten und fünften Stich wurde der Verbund in 24 h von 775 °C auf 200 °C abgekühlt.

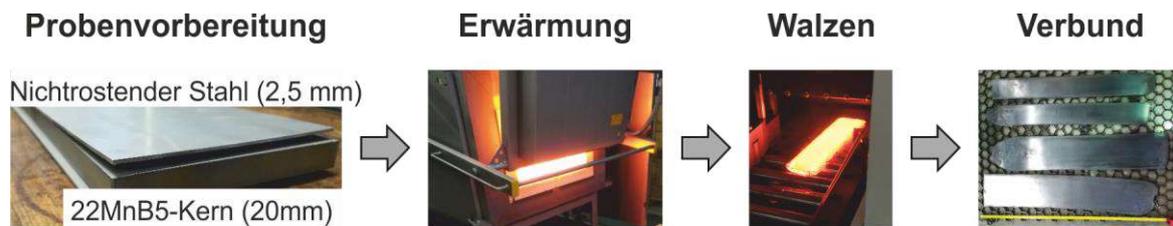


Abb. 4: Herstellung der Verbundwerkstoffe

Charakterisierungen des hergestellten Halbzeuges zeigen, dass mit der gewählten Prozessroute eine Verbundfestigkeit größer der Materialfestigkeit des weicheren Verbundpartners erzeugt werden kann. Jedoch konnte mit 3-Punktbiegeversuchen eine verringerte Umformbarkeit des Verbundes nachgewiesen werden [1].

Tab. 1 Übersicht der Walzstiche mit jeweiliger Höhenabnahme und Ofentemperatur

Stich	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Ofentemperatur	-	1200°C				Raumtemperatur			
Ofenhaltezeit in min	-	30	10	10	10	-	-	-	-
Höhe h in mm	25	12,5	6,5	4,1	3,0	2,4	1,92	1,54	1,42
Höhenabnahme in %	-	50,0	48,0	36,9	26,8	20,0	20,0	19,8	8,8

Zur Steigerung der Umformbarkeit des Verbundwerkstoffes wird in diesem Papier der Einfluss von Wärmebehandlungen nach dem 4. und nach dem 6. Stich untersucht. Ein Überblick über die verwendeten Wärmebehandlungen ist in Tab. 2 dargestellt.

Tab. 2 Übersicht der Wärmebehandlungen

Bezeichnung	Decklagenwerkstoff	Nach 4. Stich	Nach 6. Stich
P1 (Referenz)	Austenitisch	775 -200 °C in 24 h	-
P2	Austenitisch	775 -200 °C in 24 h	700 -200 °C in 24 h
P3	Austenitisch	Luftabkühlung	-
P4	Austenitisch	Luftabkühlung	700 -200 °C in 24 h
P5	Martensitisch	775 -200 °C in 24 h	
P6	Martensitisch	Glühen bei 600°C (2h)	

Versuchsaufbau und -durchführung

Die experimentelle Untersuchung des Umformvermögens bei Raumtemperatur findet analog zu [1] mittels 3-Punktbiegen in einer universalen Prüfmaschine der Firma ZWICK Roll statt. Der Biegestempel entspricht dem Plättchen-Biegeversuch (VDA 238) mit einem Radius $r_{st} = 0,6$ mm. Zur Verringerung der Reibung werden drehbar gelagerte Wellen ($\varnothing = 15$ mm) als Auflager verwendet. Der Gesenkabstand d_{ges} beträgt 20 mm. Zur Verwendung eines optischen Messsystems der Firma GOM ist das Auflager auf einen Stützrahmen montiert. Der gesamte Versuchsaufbau ist in Abb. 5 dargestellt. Die verwendeten Proben weisen eine rechteckige Form mit 20 x 100 mm Abmaße auf. Alle Proben sind in Walzrichtung entnommen.

Die Durchführung eines Versuches kann in die Abschnitte Präparierung, Biegung und Auswertung unterteilt werden. Die Präparierung bezeichnet die Aufbringung eines stochastischen Musters, welches zur Messung der Dehnungen notwendig ist. Dieses Muster besteht aus einer weißen Grundlackierung mit gesprenkelten schwarzen Punkten. Zur Sicherstellung einer ausreichenden Verbindung zwischen Lack und Probe wird eine Trockenzeit von mindestens 30 min gewählt.

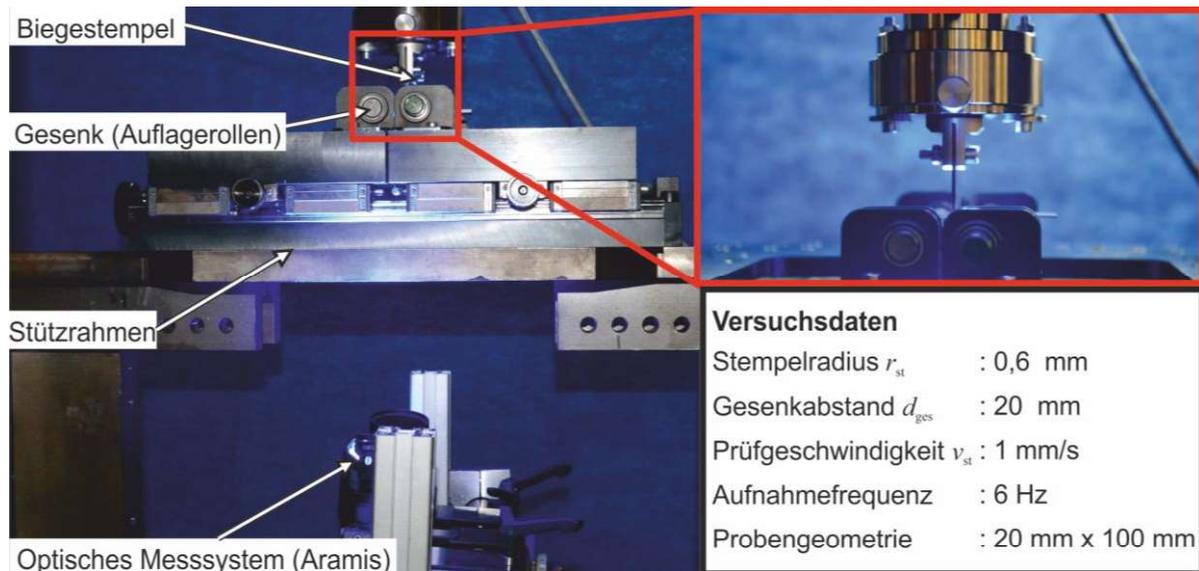


Abb. 5: Versuchsaufbau zum 3-Punktbiegen mit optischen Messsystem

Anschließend findet die Biegung des Bleches statt, wobei der Stempel mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/s verfahren wird. Parallel nimmt das optische Messsystem Bilder mit einer Frequenz von 6 Hz auf. Abschließend findet die Auswertung des Vergleichsumformgrads nach v. Mises statt. Hierzu wird anhand der Bilder der Beginn der Rissausbildung ermittelt. Der Umformgrad in dem Bild vor Rissbeginn wird als maximal erreichbarer Umformgrad des Verbunds definiert.

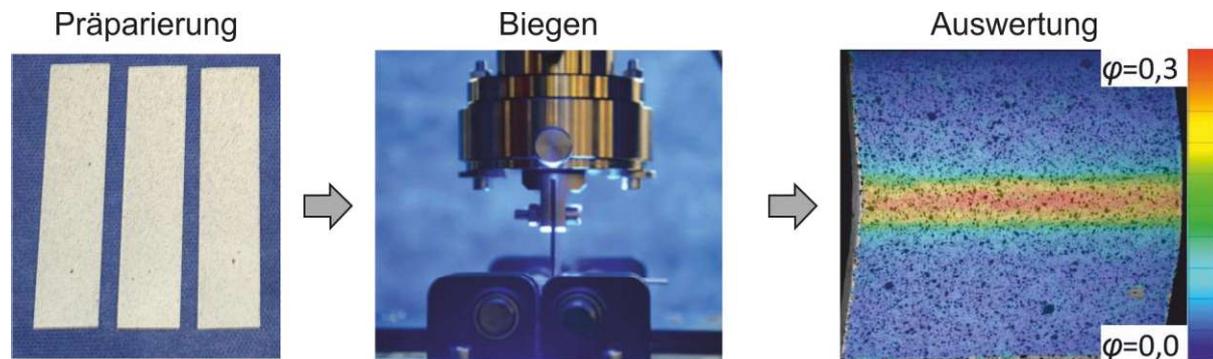


Abb. 6: Schritte zur Auswertung eines 3-Punktbiegeversuchs mit optischem Messsystem

Fehlerabschätzung zwischen analytischem Ansatz und optischer Dehnungsmessung

Neben der oben genannten optischen Messmethode zur Bestimmung des Umformgrades, kann die Bestimmung des Umformgrades ebenfalls analytisch geschehen. Bei den entlasteten, gebogenen Teilen werden hierzu die Radien des Innen- und Außenbogens mithilfe eines Mikroskopes bestimmt. Die Kreisbögen werden entsprechend gewählter Punkte auf der Kontur vom Computer berechnet. Unter der Annahme, dass die neutrale Faser (R_M) (ungelängt) in der Mitte zwischen Innen- (R_I) und Außenbogen (R_A) liegt, kann die Dehnung am Außenbogen mit Gleichung 1 ermittelt werden. Eine exemplarische Messung des Umformgrades eines gebogenen Verbundes bestehend aus martensitischer Decklage und Bor-Mangan-Kern ist in Abb. 7a) dargestellt.

$$\varepsilon = (R_A - R_M) / R_M \rightarrow \varphi = \ln(1 + \varepsilon) \quad (1)$$

In diesem Beispiel ist zu erkennen, dass die Werkstoffe in der Verbundzone keine glatte Kontur aufweisen, sondern gewisse Schwankungen der Dickenverhältnisse vorliegen. Diese

sind herstellungsbedingt und könnten zur Abweichung der Lage der neutralen Faser führen. Die damit einhergehende Verzerrung des angenommenen symmetrischen Spannungs- und Dehnungsverlaufes kann zu Fehlern bei der analytischen Abschätzung führen. Eine weitere Fehlerquelle liegt bei der Bestimmung der Bogenmaße, welche auch subjektive Faktoren beinhalten können.

Zum Abschätzen des Fehlers des alternativen Verfahrens wird eine Probe sowohl optisch als auch analytisch betrachtet. Analytisch wird ein Umformgrad von $\varphi = 0,094$, optisch ein Umformgrad von $\varphi = 0,100$ ermittelt. Dies zeigt, dass beide Verfahren eine gute Aussage über den Umformgrad am Außenbogen ermöglichen. Im Folgenden wird jedoch die optische Messung angewendet, da diese eine genauere Auswertung bei Rissausbildung ermöglicht.

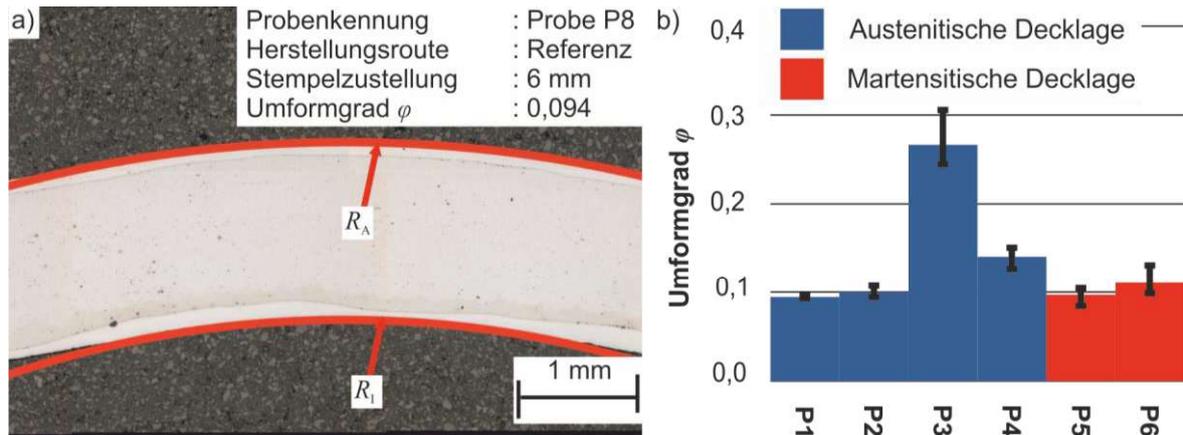


Abb. 7: a) Analytische Betrachtung des Umformgrades beim Biegen von Verbundblechen und die b) Bestimmung des maximalen erreichbaren Umformgrades mittels optischer Messung beim 3-Punktbiegen der Proben 1-6 (s. Tab. 2) bei Raumtemperatur

Auswertung der Umformgrade in Abhängigkeit der Wärmebehandlung

Bei den Basiswerkstoffen tritt mit dem genannten Versuchsaufbau kein Versagen auf. Bei allen hergestellten Verbundwerkstoffen ist jedoch ein Versagen der Decklage optisch detektierbar, sodass eine Reduzierung der Umformbarkeit der Decklage bei allen Wärmebehandlungen vorliegt. Bei den Basiswerkstoffen wird ein Umformgrad $\varphi_{\text{aust}} = 0,45$ (austenitisch) und $\varphi_{\text{mart}} = 0,52$ (martensitisch) durch das 3-Punktbiegen erreicht. Die Verbundwerkstoffe mit austenitischer Decklage ohne Wärmebehandlung erzielen das im Mittel größte Umformvermögen ($\varphi_{p3} = 0,26$). Dies entspricht einer Reduzierung um mehr als 40 % gegenüber der austenitischen Decklage (Basiswerkstoff). Weitergehend ist erkennbar, dass eine Variation der Wärmebehandlung keinen signifikanten Einfluss auf die Umformbarkeit des Verbundes ermöglicht. Alle Verbundwerkstoffe, die nach dem Warmwalzen und/oder zwischen den Kaltwalzstichen im Ofen wärmebehandelt wurden, erreichen einen sehr geringen Umformgrad von $\varphi < 0,14$. Die genauen Umformgrade sind zusammengefasst in Abb. 7b) dargestellt.

Diese geringe Umformbarkeit zeigt sich auch bei der Herstellung von pressgehärteten Hutprofilen (Abb. 8) durch Risse der Decklage am Ziehradius und Stempelkantenradius mit dem Referenzmaterial (P1).

Biegeversuche mit einem Umformgrad geringer der Versagensgrenze der jeweiligen Probe bestätigen, dass keine Delamination der Verbundpartner stattfindet. Dies bedeutet, dass eine Veränderung der Verbundfestigkeit durch Anpassung der Wärmebehandlung zu vernachlässigen ist.



Abb. 8: Anwendung des Verbundes (austenitisch/22MnB5) beim Presshärten eines Hutprofiles

Zusammenfassend zeigen die obigen Untersuchungen, dass die angewendeten unterschiedlichen Wärmebehandlungen keine Verbesserung der Umformbarkeit des Verbundes ermöglichen. Die dabei aktuell erreichbaren Umformgrade führen beim Presshärten zum Versagen der Decklage, sodass ein ausreichender Oxidationsschutz nicht gewährleistet werden kann. Jedoch kann das Einsatzpotenzial des Verbundes durch Aushärtung des Kerns bestätigt werden, sodass eine Steigerung der Umformbarkeit durch eine angepasste Herstellungsrouten in weiteren Versuchen angestrebt wird.

Zusammenfassung

Basierend auf der dargestellten Herstellungsrouten eines Verbundmaterials, bestehend aus einem 22MnB5-Kern und einer nichtrostenden Chromstahldecklage (austenitisch/martensitisch) für das Presshärten, wurde der Einfluss verschiedener Wärmebehandlungen auf das Umformvermögen analysiert. Vorherige Ergebnisse haben gezeigt, dass die Verbunde eine verringerte Umformbarkeit gegenüber den Basismaterialien aufwiesen. Zur Analyse des Umformvermögens in Abhängigkeit der Temperaturführung bei der Herstellung wurde in diesem Papier ein Biegeversuch vorgestellt und die Umformbarkeit am Außenbogen optisch ausgewertet.

Die Auswertungen zeigten, dass unabhängig der gewählten Prozessrouten keine signifikante Steigerung des Umformvermögens realisiert werden konnte. Dieses liegt weiterhin bei maximal 55 % der Basiswerkstoffe. Somit kann der Einfluss der Wärmebehandlung ausgeschlossen werden. Die Verwendung der Bleche beim Presshärten bestätigte, dass die geringe Umformbarkeit bei Raumtemperatur ebenfalls bei erhöhten Temperaturen zum Versagen der Decklagen führt und somit ein Schutz vor Oxidation des Kerns nicht gewährleistet werden kann. Die Aushärtung des Kerns bekräftigt jedoch die theoretische Verwendbarkeit des Verbundes für das Presshärten.

Weitere Arbeiten sollten sich daher auf die anderen Schritte der Gesamtprozessrouten fokussieren, um die Ursachen der geringen Umformbarkeit bestimmen zu können.

Danksagung

Das Verbundprojekt (Projekt-ID 444548865) zwischen dem Institut für Bildsamen Formgebung (IBF) der RWTH Aachen und dem Institut für Umformtechnik und Leichtbau (IUL) der TU Dortmund wird gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG). Im Rahmen dieses Projektes wird das von den IBF hergestellte Material aufseiten des IULs umformtechnisch analysiert. Hiermit danken wir dem IBF für die Herstellung und Bereitstellung des Verbundmaterials.

Literaturverzeichnis

- [1] Stenei M, Ringel A, Plum T, Kolpak F, Lohmar J, Tekkaya A and Hirt G 2022. Bewertung der Verbundfestigkeit von walzplattierten Chrom-Bor-Stahl-Verbunden zum Presshärten Ideen Form geben 1. Auflage
- [2] Karbasian H and Tekkaya A 2010 A review on hot stamping Journal of Materials Processing Technology 15 p. 2103–2118
- [3] Behrens B-A, Eckold C-P, Hübner S, Fleck C and Schüler P. Untersuchung der Eignung alternativer Blechwerkstoffe für das Presshärten
- [4] R. Veit, H. Hofmann, R. Kolleck and S. Sikora 2010. Untersuchung der Phasenbildung bei der Erwärmung Al/Si-beschichteter 29 Formplatinen 5. Erlanger Workshop Warmblechumformung p. 29–38
- [5] Neugebauer R, Schieck F, Polster S, Mosel A, Rautenstrauch A, Schönherr J and Pierschel N 2012 Press hardening — An innovative and challenging technology Archives of Civil and Mechanical Engineering 2 p. 113–118
- [6] M. Naderi Hot stamping of ultra high strength steels. Doctoral Theses, RWTH Aachen, Aachen
- [7] Chang Y, Tang X, Zhao K, Hu P and Wu Y 2016 Investigation of the factors influencing the interfacial heat transfer coefficient in hot stamping Journal of Materials Processing Technology p. 25–33
- [8] Ghalehbandi S, Malaki M and Gupta M 2019 Accumulative Roll Bonding—A Review Applied Sciences 17 p. 3627
- [9] Khan H, Asim K, Akram F, Hameed A, Khan A and Mansoor B 2021 Roll Bonding Processes: State-of-the-Art and Future Perspectives Metals 9 p. 1344
- [10] SSAB. SSAB Boron. www.ssab.com
- [11] Tartaglia J, Kuelz A and Thelander V 2018 The Effects of Alloying Elements on the Continuous Cooling Transformation Behavior of 2¼Cr-1Mo Steels J. of Materi Eng and Perform 12 p. 6349–6364
- [12] Kamaliev M, Teller M, Löbke C, Hirt G and Tekkaya A 2021. Novel Roll-Bonded Stainless Steel/Boron-Steel Multilayer Under Hot Stamping Conditions Forming the Future p. 2683–2694