



Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt SLV München - Niederlassung der GSI mbH

Bericht 5157/10

IGF-Nr. 15.744 N

DVS-Nr. 06.063

Einfluss des Umformgrades (Kaltverfestigung) auf die Laserstrahlschweiß- und Löteignung von Feinblechen mit $R_m \geq 800 \text{ N/mm}^2$

Der Bericht darf nur ungekürzt und unter Nennung der Urheberschaft der SLV München, NL der GSI mbH, veröffentlicht werden. Die gekürzte oder auszugsweise Veröffentlichung bedarf der vorherigen schriftlichen Genehmigung der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt SLV München.

Der Bericht enthält 126 Seiten.

Febr. 2011

Schlussbericht

der Forschungsstelle(n)

1 - SLV München, NL der GSI mbH

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur
Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **IGF_Nr. 15744**

Einfluss des Umformgrades (Kaltverfestigung) auf die Laserschweiß- und Löteignung von Feinblechen mit $R_m \geq 800 \text{ N/mm}^2$

(Bewilligungszeitraum: 01.11.2008 - 31.10.2010)

der AiF-Forschungsvereinigung

Schweißen

Ort, Datum München, 15.2.11
Ort, Datum


Name des Projektleiters
Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Zusammenfassung

Das Ziel des Projekts war es, den Einfluss der Kaltverfestigung auf die Schweiß- bzw. Lötung warm- bzw. kaltgewalzter Dual- bzw. Komplexphasenstähle HCT780C+ZE75/75, HCT780X+ZE75/75, HDT780C (CP-W800)) zu untersuchen.

Um diese Ziele zu erreichen, wurden zunächst definierte Kaltumformungen durch Recken (Blindnaht, I-Naht, Überlappnaht) bzw. Biegen (A-Probe und T-Probe, Bördelnaht) eingebracht und anschließend Schweißungen bzw. Lötungen mit optimierten Parametern ausgeführt. Die Bewertung der Schweiß- bzw. Lötung beruht auf Untersuchungen zum Prozessverhalten, zu mechanisch-technologischen Eigenschaften und zur Nahtgüte. Sie basiert auf Vergleichen zwischen dem Grundwerkstoff, dem unverformten und verschweißten Grundwerkstoff sowie dem kaltverfestigten, verschweißten Grundwerkstoff (Reckgrade ca. 45 % und ca. 90 % der Gleichmaßdehnung bzw. Biegeradien $r = 2,5$ mm und $r = 3,25$ mm). Bei zahlreichen Schweißungen an vorgedehnten Blechen können keine signifikanten Einflüsse der Kaltverfestigung auf den Schweißprozess festgestellt werden. Die Zugfestigkeit steigt i.d.R. durch die Kaltverfestigung und die Bruchdehnung nimmt ebenso wie das Energieaufnahmevermögen ab. Die Auswertung von Wöhlerdiagrammen an I-Nähten der kaltgewalzten Komplex- und Dualphasenstähle ergibt eine mit zunehmendem Kaltverfestigungsgrad steigende Dauerfestigkeit der geschweißten Proben. Ein Einfluss der Kaltverfestigung auf die maximalen Härtewerte konnte nicht gefunden werden, wie auch ein über die stärkere Längsorientierung des feinkörnigen Grundwerkstoffgefüges hinausgehender Einfluss auf die Nahtgüte.

Die Untersuchungen an den gebogenen Blechen zeigen eine stärkere Abnahme der Kopfzugfestigkeit bei den T-Proben als bei den A-Proben beim Schweißen bezogen auf den Grundwerkstoff. Je größer dabei der Kaltumformgrad wird, desto stärker sinken die Kopfzugfestigkeiten durch die Schweißung. Der Vergleich der Wöhlerdiagramme für die T-Proben zeigt eine um ca. 4 % höhere Dauerfestigkeit bei einer geringeren Kaltverfestigung (Biegeradius $r = 2,5$ mm anstatt $r = 3,25$ mm). Ein Einfluss der Kaltverfestigung auf die Nahtgüte konnte bei den Untersuchungen zu den gebogenen T- und A-Proben nicht gefunden werden.

Durch die Kaltverfestigung nehmen die übertragbaren Zugkräfte und die Bruchdehnungen bei den Lötungen an den Kehlnähten am Überlappstoß ab.

Die Schweiß- bzw. Lötung ist bei diesen härtesten Werkstoffen auch bei großen Kaltverfestigungsgraden i.d.R. noch gegeben, jedoch wird die Beanspruchbarkeit geschweißter und gelöteter Verbindungen im Betrieb auf Grund der reduzierten Bruchdehnung herabgesetzt.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

Hinweis:

Das Forschungsvorhaben AIF-Nr. 15.744 N wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AIF) mit Unterstützung des Deutschen Verbandes für Schweißen und verwandte Verfahren e.V. (DVS) gefördert.

Die Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt SLV München, NL der GSI mbH übernimmt keine Haftung für Schäden, die aufgrund weiterführender oder fehlerhafter Anwendung der in diesem Bericht dargestellten Ergebnisse entstehen.

An dieser Stelle möchten wir uns bei den im Rahmen der Durchführung des Vorhabens beteiligten Industrieunternehmen für die gute Zusammenarbeit und die materielle Unterstützung bedanken.

Unser Dank gilt:

BKLT Lasersystemtechnik GmbH

Ingenieurbüro Rzany

Peter Michl Lasertech GmbH

Thumm Technologie GmbH

BMW AG

Linde AG

ThyssenKrupp Steel AG

Voest-Alpine Stahlbau GmbH

1	EINLEITUNG	8
2	STAND DER TECHNIK / THEORIE.....	10
3	ZIELSTELLUNG / VORGEHENSWEISE.....	12
4	EXPERIMENTELLE RANDBEDINGUNGEN.....	15
4.1	WERKSTOFFE	15
4.2	PROBEN UND PROBENABMESSUNGEN	16
4.3	LASERSTRAHLSCHWEIßANLAGEN.....	18
4.4	PRÜFMETHODEN UND VERGLEICHSKENNWERTE	19
5	UNTERSUCHUNGEN AM GRUNDWERKSTOFF	22
6	LASERSCHWEIßUNGEN AN VORGEDEHNTEN BLECHEN (BLIND-, I-, ÜBERLAPPNAHT)	24
6.1	KALTGEWALZTE DUAL- UND KOMPLEXPHASENSTÄHLE	24
6.1.1	<i>Einfluss der Kaltverfestigung auf den Schweißprozess</i>	<i>24</i>
6.1.2	<i>Einfluss der Kaltverfestigung auf mechanisch-technolog. Eigenschaften.....</i>	<i>24</i>
6.1.3	<i>Einfluss der Kaltverfestigung auf die Nahtgüte</i>	<i>33</i>
6.1.4	<i>Zusammenfassung kaltgewalzte Dual- und Komplexphasenstähle.....</i>	<i>34</i>
6.2	WARMGEWALZTER KOMPLEXPHASENSTAHL	36
6.2.1	<i>Einfluss der Kaltverfestigung auf den Schweißprozess</i>	<i>36</i>
6.2.2	<i>Einfluss der Kaltverfestigung auf mechanisch-technolog. Eigenschaften.....</i>	<i>36</i>
6.2.3	<i>Einfluss der Kaltverfestigung auf die Nahtgüte</i>	<i>38</i>
6.2.4	<i>Zusammenfassung warmgewalzter Komplexphasenstahl</i>	<i>39</i>
6.3	ZUSAMMENFASSUNG ZU DEN SCHWEIßUNGEN AN VORGEDEHNTEN BLECHEN.....	41
7	LASERSCHWEIßUNGEN AN GEBOGENEN BLECHEN AUS WARMGEWALZTEN KOMPLEXPHASENSTAHL (A-PROBE, T-PROBE).....	42
7.1	EINFLUSS DER KALTVERFESTIGUNG AUF DEN SCHWEIßPROZESS.....	42
7.2	EINFLUSS DER KALTVERFESTIGUNG AUF MECHANISCH-TECNOLOG. EIGENSCHAFTEN.....	43
7.3	EINFLUSS DER KALTVERFESTIGUNG AUF DIE NAHTGÜTE.....	49
7.4	ZUSAMMENFASSUNG ZU DEN SCHWEIßUNGEN AN GEBOGENEN BLECHEN.....	50
8	LASERLÖTUNGEN AN VORGEDEHNTEN BLECHEN (KEHLNAHT AM ÜBERLAPPSTOß).....	52
8.1	EINFLUSS DER KALTVERFESTIGUNG AUF DEN LÖTPROZESS.....	52
8.2	EINFLUSS DER KALTVERFESTIGUNG AUF MECHANISCH-TECNOLOG. EIGENSCHAFTEN.....	53
8.3	EINFLUSS DER KALTVERFESTIGUNG AUF DIE NAHTGÜTE.....	54
8.4	ZUSAMMENFASSUNG LASERLÖTUNGEN AN VORGEDEHNTEN BLECHEN	55
9	LASERLÖTUNGEN AN GEBOGENEN BLECHEN (BÖRDELNAHT).....	56
10	DISKUSSION.....	58

11 DARSTELLUNG ZU FORSCHUNGSZIEL, -ERGEBNISSEN UND MITTELVERWENDUNG	60
12 ZUSAMMENFASSUNG.....	61
13 SCHRIFTTUM.....	67
14 ANHANG	69
14.1 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	69
14.2 TABELLENVERZEICHNIS	70
14.3 BILDERVERZEICHNIS.....	69

1 Einleitung

Das Laserstrahlschweißen und -löten sind in der blechverarbeitenden Industrie wegen ihrer vielfältigen Einsatzmöglichkeiten innovative und wirtschaftliche Fügeverfahren /1/. Nicht nur in der Großserienfertigung, sondern auch bei Kleinserien können sie wegen ihrer technischen und wirtschaftlichen Vorteile zu einer erheblichen Steigerung der Produktivität führen. Diese Fügeverfahren ermöglichen konzeptionelle und konstruktive Neuerungen bei Produkten der unterschiedlichen Branchen (Automobilzulieferer, Haushaltsgerätfertigung, Konsumgüterindustrie, usw.). Zur Erweiterung der Möglichkeiten des innovativen Leichtbaus wurden von Stahlherstellern neue höherfeste und höchstfeste Feinblechwerkstoffe entwickelt, die zunehmend in der blechverarbeitenden Industrie eingesetzt werden /2, 3, 4, 5/. Das Ziel bei der Entwicklung dieser Werkstoffe (z.B. DP-K38/60, CP-W800/1000, MS-W1000/1200) besteht einerseits in den hohen Zugfestigkeiten ($\geq 700 \text{ N/mm}^2$) und andererseits im hohen Umformvermögen (Tiefziehverhalten, Dehnung).

Die Mehrphasenstähle (z.B. CP, MS, DP, TRIP) können wegen der höheren Festigkeiten im Vergleich zu un- und niedriglegierten Stahlblechen (z.B. DC04, H430) zu einer deutlichen Gewichtsreduzierung genutzt werden /6, 7, 8/. Diese Werkstoffe werden überwiegend bei kaltumgeformten Bauteilen (Türaufprallträger, Verstärkung B-Säule) oder verschleißbeanspruchten Komponenten z.B. bei Transportfahrzeugen bzw. bei landwirtschaftlichen Geräten eingesetzt /9, 10, 11/. Dies bedeutet, dass bei fast allen Anwendungen die Bleche einem Umformungsprozess vor dem Schweißen unterzogen werden /11, 12/. Durch die deutlich höheren Zugfestigkeiten tritt ein verstärktes Rückfederungsverhalten auf. Dies zieht neben höheren Einhärtungen aufgrund des Spannungszustandes des Gefüges auch das Risiko von Kaltrissen nach sich. Die Fügeignung ist dann deutlich eingeschränkt. Gleichfalls steigen die Ansprüche an die Spannmittel bzgl. der Haltekraft und der Toleranzen. Im Hinblick auf diese Thematik bestehen seitens der KMU-Zulieferindustrie viele Unsicherheiten und Klärungsbedarf. Erschwerend kommt beim Fügen hinzu, dass überwiegend beschichtete Bleche zur Anwendung gelangen, die mit ihren Eigenschaften bei den Fügeprozessen berücksichtigt werden müssen.

Die hochfesten Bleche werden bereits vielfach eingesetzt. Durch ihre sehr guten Eigenschaften, wie die hohe Festigkeit, die Steifigkeit, das gute Umformvermögen und die daraus resultierende Möglichkeit zum Einsatz kleiner Blechdicken (Leichtbau) besteht eine sehr gute Ausgangssituation für weitere, vielfältige Anwendungen. Bei bestehenden Anwendungen ist die Schweiß- und Löteignung bei nicht oder wenig umgeformten Blechen als gut zu bezeichnen. Hierzu sind bereits im großen Umfang systematische Untersuchungen zur Laserstrahlschweißignung durchgeführt worden und Informationen zu erhalten. Die höher- und höchstfesten Werkstoffe werden in der Fertigung umgeformt und eingesetzt. Zum Verhalten der

Werkstoffe beim Laserstrahlschweißen und -löten in den tiefgezogenen oder gereckten Bereichen liegen unzureichende Informationen vor oder sind nicht zugänglich. Durch die steigenden Anforderungen durch vorgegebene Konstruktionen bzw. Designansprüche besteht Forschungsbedarf zum Fügen in den umgeformten Bereichen /13/.

Die Schweiß- und Löttechnik von Werkstoffen im Zusammenspiel mit den in der Fertigung geforderten Umformgraden von 5 bis 25% wird von unterschiedlichen Rahmenbedingungen bestimmt:

- Werkstoffeigenschaften des Blechwerkstoffes (Herstellungsart, Eigenspannungszustand, Festigkeiten),
- Grad der Umformung durch z.B. Streckziehen, Recken oder Biegen,
- Eigenschaften des Beschichtungssystems (Beschichtungsart, Beschichtungsdicke),
- Laserstrahlparameter (Laserstrahlleistung, Fügegeschwindigkeit, Strahlformung, Strahlage, Schutzgas).

Die Untersuchungsergebnisse sollen gerade kmU's Hilfestellung geben, das Laserstrahlschweißen auch bei diesen anspruchsvollen Anforderungen erfolgreich umzusetzen, da bisher keine ausreichenden und gesicherten Erkenntnisse zum Laserstrahlschweißen direkt in umgeformten Bereichen vorliegen.

12 Zusammenfassung

Das Laserstrahlschweißen und -löten sind in der blechverarbeitenden Industrie wegen ihrer vielfältigen Einsatzmöglichkeiten innovative und wirtschaftliche Fügeverfahren. Nicht nur in der Großserienfertigung, sondern auch bei Kleinserien können sie wegen ihrer technischen und wirtschaftlichen Vorteile zu einer erheblichen Steigerung der Produktivität führen. Diese Fügeverfahren ermöglichen konzeptionelle und konstruktive Neuerungen bei Produkten der unterschiedlichen Branchen.

Zur Erweiterung der Möglichkeiten des innovativen Leichtbaus wurde untersucht, inwieweit sich das Kaltumformen von hochfesten Blechen auf die Laserstrahlschweiß- und -löteignung auswirkt bzw. ob und wie stark sich in umgeformten Bereichen Einschränkungen ergeben. Untersucht wurden die kaltgewalzten Dual- bzw. Komplexphasenstähle HCT780X, HCT780C, beide ZE75/75 und der warmgewalzte Komplexphasenstahl HDT780C.

Definierte Kaltumformungen erfolgten durch Recken mit Reckgraden von 5 – 12% der Gleichmaßdehnung (Blindnaht, I-Naht, Überlappnaht) bzw. Biegen mit einem Radius von $R = 3,25$ und $2,5$ mm (A-Probe und T-Probe, Bördelnaht). Laserstrahlgeschweißt und –gelötet wurde mit optimierten Parametern. Die Bewertung der Schweiß- bzw. Löteignung beruht auf Untersuchungen zum Prozessverhalten, zu mechanisch-technologischen Eigenschaften und zur Nahtgüte. Sie basiert auf Vergleichen zwischen dem Grundwerkstoff, dem unverformten und verschweißten Grundwerkstoff sowie den unterschiedlich kaltverfestigten, verschweißten Grundwerkstoff.

Zur Untersuchung der mechanisch-technologischen Eigenschaften wurden die Zugfestigkeit, die Bruchdehnung, das Energieaufnahmevermögen, die Schwingfestigkeit (Zug-/Schwellbelastung, $\kappa = 0,1$) und die Härte herangezogen.

Das Prozessverhalten und die Schweiß- und Lötparameter der untersuchten höherfesten Feinbleche werden durch das Kaltumformen nicht negativ beeinflusst bzw. geändert. So ergeben sich weder bei der Blindnaht, noch bei der I-Naht oder der Überlappnaht signifikante Einflüsse der Kaltverfestigung auf den Schweißprozess.

Dagegen wird ein linearer Anstieg der Zugfestigkeit bei den Blind- und I-Nahtschweißungen mit zunehmender Kaltverfestigung festgestellt. Bei Reckgraden von ca. 90 % der Gleichmaßdehnung steigt die Festigkeit bezogen auf das Grundwerkstoffniveau beim kaltgewalzten Komplex- bzw. Dualphasenstahl um maximal 6 % beim HCT780C bzw. 7,5 % beim HCT780X, während beim warmgewalzten Komplexphasenstahl HDT780C eine maximale Steigerung von 10 % zu beobachten ist. Das Versagen tritt jeweils im Grundwerkstoff auf.

Bei den geschweißten Überlappverbindungen liegen die Beträge der maximalen Scherkräfte jeweils unter der maximal ertragbaren Zugkraft des Grundwerkstoffs. Bei vergleichsweise großen Streuungen erkennt man tendenziell mit zunehmender Kaltverfestigung eine geringe Zunahme. Die Proben versagen in der Wärmeeinflusszone auf Grund der hier vorliegenden geometrischen Kerbwirkung.

Alle geschweißten Proben weisen einen deutlichen Rückgang der Bruchdehnung bezogen auf das Grundwerkstoffniveau auf. Durch das Schweißen in kaltumgeformten Bereichen geht die Verformungsfähigkeit noch mehr zurück. Während sowohl beim kaltgewalzten Komplex- als auch beim Dualphasenstahl ein Rückgang von ca. 50% bei einer Gleichmaßdehnung von ca. 5% bzw. 80% bei einer Gleichmaßdehnung von ca. 9% bei der I-Naht ermittelt wird, findet man beim warmgewalzten Komplexphasenstahl eine Abnahme bis zu 75%. Zudem ist bei diesem warmgewalzten Werkstoff eine sehr viel größere Abhängigkeit der Bruchdehnung vom Kaltverfestigungsgrad zu beobachten als bei den kaltgewalzten Werkstoffen.

Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluss der Kaltverfestigung auf das Energieaufnahmevermögen stehen in einem engen Zusammenhang mit denen zur Bruchdehnung. Parallel zur Bruchdehnung nimmt gleichzeitig, aber mit geringerem Gradienten, das Energieaufnahmevermögen ab. Die Blind- und I-Naht-Schweißungen zeigen i.d.R. bei den kaltgewalzten im Gegensatz zu den warmgewalzten Werkstoffen eine deutlichere Abnahme des Energieaufnahmevermögens durch das Verschweißen des unverformten Werkstoffs. Mit zunehmender zusätzlicher Kaltverfestigung durch Recken von max. 90% der Gleichmaßdehnung reduziert sich das Energieaufnahmevermögen weiter auf Werte von 35% beim kaltgewalzten Dualphasenstahl und bis 68% beim warmgewalzten Komplexphasenstahl des unverformten Grundwerkstoffs.

Bei den Überlappschweißungen sinkt das Energieaufnahmevermögen z.B. auf Grund des Schweißnahtbreite zu Blechdicken-Verhältnisses beim HCT780C von 150 J des Grundwerkstoffs durch das Schweißen um ca. 75%. Die Kaltverfestigungen von 5 bzw. 8% wirken sich vergleichsweise wenig aus. Das Energieaufnahmevermögen sinkt hier gegenüber dem Grundwerkstoff auf 21%. Die Steigerung der Streckenenergie um 25% führt durch die damit verbundene Vergrößerung des Anbindungsquerschnittes zu einer überproportionalen Steigerung des Energieaufnahmevermögens von ca. +30% beim kaltgewalzten Komplexphasenstahl bzw. ca. +50% beim kaltgewalzten Dualphasenstahl.

Bei Blind-, I- und Überlappnähten liegt die Summe aus Reck- und Zugarbeit i.d.R. über der reinen Zugarbeit des Grundwerkstoffs. Betrachtet man die übertragbare Arbeit der Schweißnähte selbst, weisen sie gegenüber dem Grundwerkstoff deutlich

niedrigere Werte auf. Dabei spielt die Höhe des Reckgrades im untersuchten Bereich der durchgeführten Versuche eine untergeordnete Rolle.

Die Auswertung von Wöhlerdiagrammen an I-Nähten der kaltgewalzten Werkstoffe ergibt beim Komplexphasenstahl eine im Vergleich zum Dualphasenstahl höhere Dauerfestigkeit (Zug/Schwellbelastung, $\kappa = 0,1$) von 40% im Vergleich zu 35 % der statischen Festigkeit. Durch die Schweißung am unverformten Werkstoff nimmt die Dauerfestigkeit um 64 % (kaltgewalzter Komplexphasenstahl) bzw. 45 % (kaltgewalzter Dualphasenstahl) ab. Bei der Schweißung mit vorangegangener Kaltverfestigung (90% der Gleichmaßdehnung) findet man dagegen eine Änderung von -35 % bzw. +14 % und mit kleineren Kaltverfestigungsgraden von -27 % bzw. -32 %. Die Kaltverfestigung erhöht somit die Dauerfestigkeit. Alle verschweißten Proben reißen neben der Naht in der WEZ.

Bezüglich des Einflusses der Kaltverfestigung auf die Härte konnten keine eindeutigen Tendenzen gefunden werden. Die maximalen Härtewerte, die z.B. beim HCT780C in einem Bereich von 460 HV1 bis 470 HV1 im Bereich der Schmelzlinie auftreten, sind ebenso unabhängig vom Kaltverfestigungsgrad, wie Werte von ca. 400 HV1 in der Schweißnahtmitte. Im Grundwerkstoffbereich dagegen ist ein Anstieg der Härte von 10 – 20 HV1 mit zunehmendem Kaltverfestigungsgrad und der damit in Verbindung stehenden Textur zu beobachten. Die Werte liegen deutlich unter dem kritischen Niveau von 350 HV1. Während bei den bisher genannten Zusammenhängen keine Unterschiede zwischen den Werkstoffen zu erkennen sind, findet man bei den kaltgewalzten Werkstoffen im Gegensatz zum warmgewalzten Werkstoff neben der Naht eine Entfestigungszone. Sie beginnt neben der Schmelzlinie und ist ca. 0,5 mm breit. Die gemessenen Härtewerte liegen etwa 30 HV1 unter dem Grundwerkstoff.

Metallographische Untersuchungen zeigen unter einer Vergrößerung von 1000:1 kaum einen Einfluss unterschiedlicher Kaltverfestigungsgrade auf die Nahtgüte. Lediglich die längsorientierten feinkörnigen Gefüge der Grundwerkstoffe HCT780C und HCT780X ist beim kaltgewalzten Werkstoff etwas stärker ausgeprägt als beim HDT780C. Auf Grund der hohen Abkühlgeschwindigkeit bildet sich sowohl beim Dual- als auch beim Komplexphasenstahl im Schmelzbereich grobnadeliger Martensit und in der Wärmeeinflusszone feinnadeliger Martensit mit einem geringen Anteil von Bainit.

Neben den gereckten wurden auch gebogene Bleche untersucht. Als Werkstoff für die A- und T-Proben kam jeweils der warmgewalzte HDT780C zum Einsatz.

Die Kopfzugprüfungen zeigen an den T-Proben mit max. 26 % eine größere Abnahme der maximalen Zugkraft durch das Schweißen als bei den A-Proben mit max. 6,5 %. Mit zunehmendem Kaltumformgrad, d.h. kleinerer Biegeradius, werden die

übertragbaren Kopfzugkräfte durch die Schweißung i.d.R. stärker reduziert, z.B. bei der T-Probe zusätzlich um 16 % und bei der A-Probe um 2% bei einer Änderung von $R = 3,25$ auf 2,5 mm. Ein Einfluss des Biegeradius und damit der Kaltverfestigung auf die Scherzugfestigkeit konnte nicht festgestellt werden. Das Versagen tritt bei der Kopf- und der Scherzugprobe im Übergang der WEZ zum Grundwerkstoff auf.

Aufgrund der Kaltverfestigung durch Biegen steigt in allen Proben die Härte im Bereich der Umformzone an. Die Aufhärtungen unterscheiden sich bei den erzeugten Kaltverfestigungsgraden kaum, sie liegen zwischen 340 HV1 bis 360 HV1 gegenüber 800 HV1 des Grundwerkstoffes. Wie auch bei den gereckten Proben konnte kein nennenswerter Einfluss der Kaltverfestigung auf die Härtewerte in der Schweißnaht und in der WEZ mit Maximalwerten von ca. 415 HV1 festgestellt werden.

Der Vergleich der Wöhlerdiagramme für die T-Proben zeigt eine um ca. 4 % höhere Dauerfestigkeit unter Zug/Schwellbelastung mit einem κ von 0,1 von ca. 49 N/mm² bei der geringeren Kaltverfestigung des Biegeradius $R = 3,25$ mm im Vergleich zu 47 N/mm² mit $R = 2,5$ mm.

Ein Einfluss der Kaltverfestigung auf die Nahtgüte konnte bei den Untersuchungen zu den gebogenen T- und A-Proben nicht nachgewiesen werden.

Metallografische Untersuchungen zeigen für den Grundwerkstoff des HDT780C als Hauptbestandteile nadelförmigen Ferrit, Bainit und Martensit, aber auch Reste von austenitischen Strukturen. In der Wärmeeinflusszone liegt nach dem Schweißen feinnadliger Bainit und Martensit vor. In der Schweißnaht selbst sind nur noch Reste von Martensit und Bainit zu finden. Zu beachten ist bei diesem Werkstoff jedoch die Rissempfindlichkeit beim Biegen der Proben vor dem Schweißen. Hier hat die Qualität der Schnittkante – Schnitt- und Risszone - Einfluss auf das Auftreten von Mikrorissen an der gebogenen Seite der Probe. Werden die Proben über die Risszone gebogen, können an beiden Enden des Bleches Risse von ca. 50 μ m Tiefe auftreten. Diese Risse werden aber beim Schweißen wieder aufgeschmolzen und führen so zu keiner Einschränkung der mechanischen Eigenschaften.

Neben den ausführlichen Untersuchungen zum Schweißen wurden auch Versuche zum Einfluss der Kaltverfestigung auf die Lötignung an der Kehlnaht am Überlappstoß durchgeführt. Durch den Einsatz des Lotwerkstoffes AlBz8MnF anstatt CuSi3 am nicht vorgedehnten HCT780X steigt die Zugkraft von 3,25 kN auf 3,5 kN. Durch die Kaltverfestigung von 5,8 % bzw. 12 % Gleichmaßdehnung nehmen die übertragbaren Zugkräfte beim Zusatzwerkstoff CuSi3 um 3 % bzw. 17 % und beim Zusatzwerkstoff AlBz8MnF um 27 % bzw. 33 % ab. Ursache für die Reduzierung ist das schlechtere Benetzungsverhalten der kaltverfestigten Proben. Da alle Proben im Lotwerkstoff brechen, kann der Einfluss der Kaltverfestigung nicht direkt ermittelt werden.

Der Vergleich von Bruchkräften und Bruchdehnungen ergibt einen direkten Zusammenhang. Die Bruchdehnung geht beim Einsatz von CuSi3 durch eine Kaltverfestigung von 5,8 % bzw. 12% von einem Wert von ca. 1 % um 41 % bzw. 24 % und bei AlBz8MnF von einem sehr hohen Wert von 1,6 % um 72 % bzw. 78 % zurück. Das Niveau der Bruchdehnungen liegt somit beim Einsatz des Lotwerkstoffs CuSi3 im Fall einer vorherigen Kaltverfestigung höher. Die Untersuchungen zum Energieaufnahmevermögen bestätigen die Zusammenhänge.

Ein Einfluss der Kaltverfestigung auf die Oberflächenbeschaffenheit, sowie auf Risse, Poren oder Bindefehler konnte nicht beobachtet werden.

Die Schweiß- bzw. Löttechnik ist bei diesen härtesten Werkstoffen auch bei großen Kaltverfestigungsgraden i.d.R. noch gegeben, jedoch wird die Beanspruchbarkeit im Betrieb durch die reduzierte Bruchdehnung herabgesetzt.

Aus den Ergebnissen zum Laserstrahlschweißen und -löten in kaltumgeformten Bereichen wurden Kernaussagen abgeleitet, die den klein- und mittelständischen Unternehmen als Basis zur fägetechnischen Verarbeitung der kaltgewalzten Dual- und Komplexphasenstähle HCT780X und HCT780C und des warmgewalzten Komplexphasenstahls HDT780C zur Verfügung stehen.

So können die erarbeiteten Ergebnisse die Auslegungen von umgeformten und geschweißten Blechen in der Planung neuer Blechkomponenten berücksichtigt werden. Selbstverständlich müssen im Einzelfall an den konkreten Bauteilen und Werkstoffen die möglicherweise auftretenden Belastungen verifiziert werden. Zusammen mit der hohen Wirtschaftlichkeit des Laserstrahlfügens können so innovative Konzepte im Bereich der Blechverarbeitung erarbeitet und umgesetzt werden. Über die in diesem Projekt gewonnenen Erkenntnisse hinaus verfügt die Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt SLV München über ein umfassendes Know-How zu fägetechnischen Prozessen, um damit die Industrie bei der Einführung neuer Fertigungsprozesse und innovativer Produkte zu unterstützen.

Die Untersuchungen wurden aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF-Nr. 15.596N) gefördert und von der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren des DVS unterstützt. Wir bedanken uns für die Förderung dieser Forschungsarbeit. Der Schlussbericht zu dem Forschungsvorhaben ist von der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS in Düsseldorf bzw. von der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt SLV München, Niederlassung der GSI mbH zu beziehen.

Unser Dank richtet sich auch an die Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses sowie an die Firmen VoestAlpine und ThyssenKrupp für die Unterstützung der Forschungsarbeit.

München, den 28.02.2011

ppa.

Dr.-Ing. Heidi Cramer