

Forschungsvorhaben P 806 / A 262

Charakterisierung und Ersatzmodellierung des Bruchverhaltens von Punktschweißverbindungen an ultrahochfesten Stählen für die Crashsimulation unter Berücksichtigung der Auswirkung der Verbindung auf das Bauteilverhalten

Characterization and simplified modeling of the fracture behavior of spot welds from ultra-high strength steels for crash simulation with consideration of the effects of the joints on component behavior

Vorgelegt wurde das Forschungsprojekt (Kurztitel „Ersatzmodellierung des Bruchverhaltens von Punktschweißverbindungen aus ultrahochfesten Stählen“ – „SP-UHSS“) von der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) für den Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA) über die Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. (FOSTA) im Stahl-Zentrum und die Forschungsvereinigung der Arbeitsgemeinschaft der Eisen und Metall verarbeitenden Industrie e. V. (AVIF).

Verantwortlich für die FOSTA - Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V.
Dipl.-Ing. Franz-Josef Heise

Das Forschungsvorhaben wurde von den Forschungsstellen Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik LWF und Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart MPA mit fachlicher Begleitung und mit finanzieller Förderung durch die Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., Düsseldorf und Forschungsvereinigung der Arbeitsgemeinschaft der Eisen und Metall verarbeitenden Industrie e. V., Ratingen aus Mitteln der Stiftung Stahlanwendungsforschung, Essen, im Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e.V. durchgeführt. Fachlich begleitet wurde das Projekt von einem projektbegleitenden Ausschuss aus Industrievertretern.

Autoren

Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, Freiburg

Prof. Dr. Peter Gumbsch
Dr.-Ing. Silke Sommer
Dipl.-Ing. Sebastian Burget

Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA Stuttgart)

Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Roos
Dipl.-Ing. Hans-Jürgen Wink
Dipl.-Ing. Daniel Krätschmer

Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik (LWF), Universität Paderborn

Prof. Dr.-Ing. Ortwin Hahn
Prof. Dr.-Ing. Gerson Meschut
Dipl.-Wirt.-Ing. Frederik Klokkers
Dipl.-Ing. David Hein

Kurzfassung

Im Automobilbau werden verstärkt höchst- und ultrahochfeste Stähle in dünnen Blechdicken aus Leichtbaugründen und zur Erhöhung der passiven Sicherheit bei gleichzeitiger Ressourcenschonung eingesetzt. Pressgehärtete Bauteile aus 22MnB5 mit Zugfestigkeiten bis 1500 MPa sind im Automobilbau bereits etabliert, und die Stahlentwicklung geht aktuell zu noch höherfesten Presshärtelegüten. Der Stahlleichtbau hat hier noch sehr viel Entwicklungspotenzial, um die Energieeffizienz weiter zu erhöhen.

Aktuell und auch zukünftig wird das etablierte und hoch automatisierbare Widerstandspunktschweißen verwendet, um Einzelbauteile aus höchstfesten Stählen zur tragenden Leichtbaustruktur zu verbinden. Durch die Wärmeeinbringung beim Schweißen treten durch Anlasseffekte Erweichungszonen um die Schweißpunkte dieser gehärteten Stähle auf. Zur Prognose des Deformationsverhaltens von Strukturen aus diesen Werkstoffen muss der Einfluss dieser Erweichungszone in den Simulationsmodellen beschreibbar sein.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden Punktschweißverbindungen im pressgehärteten, ultrahochfesten Stahl 22MnB5 umfassend charakterisiert. Dies umfasst neben der belastungsabhängigen Tragfähigkeitsermittlung mit der LWF-KS-2-Prüftechnik auch die Charakterisierung der umgebenden Erweichungszone mit speziell konzipierten Proben, die den relevanten Eigenschaftsgradienten enthalten. Damit wurde ein Ersatzmodell für die Crashsimulation entwickelt, das sowohl die Tragfähigkeit der Verbindung als auch die Rissbildung in der umgebenden Erweichungszone nachbildet. Dieses Ersatzmodell wurde durch die Simulation eines speziell konzipierten Musterbauteilversuchs validiert, bei dem eine Überlastsituation mit Rissbildung in der Erweichungszone auftritt.

Mit den Ergebnissen dieses Forschungsvorhabens werden die Einsatzmöglichkeiten und Akzeptanz von pressgehärteten Stählen deutlich erweitert, weil nun eine umfassende Berechnungsmethode für die Punktschweißverbindungen in dieser Stahlklasse der Crashsimulation zur Verfügung steht. Damit können bereits in der Konzeptionsphase punktgeschweißte pressgehärtete Stahlbauteile sicher ausgelegt werden.

FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V.

August 2013

Abstract

High and ultra-high strength steels are increasingly used in the automotive industry in thin sheet thicknesses for lightweight constructions, an increase in passive safety and conservation of energy. Hot stamped components made of 22MnB5 with a tensile strength up to 1500 MPa are already established in automobile engineering and the steel development is going towards even higher strength press hardened steels. The lightweight steel construction has a high potential to increase the energy efficiency further more.

At present and also in future the well-established and highly automatable resistance spot welding process is used to join the single components of high strength steels to the load bearing construction. Softened zones occur around the spot welds because of annealing effects in these hardened steels due to the heat input during welding. To ensure the deformation behavior of structures built of these steels, the influence of softened zones must be well known and computable in simulations.

Spot welded joints in press hardened, ultra-high strength steel 22MnB5 have been extensively characterized during the research project. In addition to the measurement of the load dependent bearing capacity using the LWF-KS-2 testing, the surrounding softened zone has been characterized with particularly designed specimens, which contain the relevant gradient of mechanical properties. Thereby a spot weld model has been developed, that describes both the load bearing capacity of the joint and the crack initiation in the softened zone. The validation of this model was done by simulation of a particularly designed component test, which reproduces the crack formation in the softened zone during a overloading situation.

The possible field of application and acceptance of press hardened steels have been considerably extended with the results of this research project, because a comprehensive computing method for spot welds in these steels is now available for simulation. The crashworthiness of spot welded components of press hardened steels can be established already in the conception stage.

FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V.

August 2013

Inhaltsverzeichnis / Table of contents

1	Einleitung / Introduction	1
2	Zielsetzung / Objective	3
3	Stand der Technik / State of the art	5
3.1	Werkstoffe und Presshärten / Materials and hot stamping	5
3.2	Punktschweißverbindungen in 22MnB5 / Spot welded joints in 22MnB5	6
3.3	Prozesssimulation / Process simulation	7
3.4	Versuchstechnik / Experimental technique.....	8
3.5	Ersatz- und Schädigungsmodellierung von Schweißpunkten, Submodelltechnik / Modeling of spot welds	9
4	Probenfertigung und Punktschweißung / Specimen production and spot welding (LWF)	13
4.1	Probengeometrien / Specimen geometries	13
4.1.1	Einfach überlappte Scherzugprobe / Single lap shear joint.....	13
4.1.2	LWF-KS-2-Probe / LWF-KS-2 specimen	14
4.1.3	Musterbauteilprobe / Component specimen	15
4.2	Verwendete Widerstandspunktschweißtechnik / Applied resistance spot welding technology	16
4.2.1	BoschRexroth-Schweißanlage PSI63S1.352L1 / BoschRexroth spot welding system	16
4.2.2	Schlatter-Schweißanlage GPN33/300/250 / Schlatter spot welding system .	17
4.2.3	Messtechnik / Measurement technology	18
4.2.4	Vorgehen bei der Schweißbereichsermittlung / Approach for the determination of weldability lobe.....	20
4.3	Probenfertigung / Production of specimens.....	22
4.3.1	Herstellung von einfach überlappten Scherzugproben / Production of single lap shear joint	22
4.3.2	Herstellung von LWF-KS-2-Proben / Production of LWF-KS-2 specimens ...	25
4.3.3	Herstellung von Musterbauteilproben / Production of component specimens	26
4.3.4	Übersicht Schweißparameter / Overview of welding parameters	27
5	Prozesssimulation / Process simulation (MPA)	29
5.1	Grundcharakterisierung der verwendeten Werkstoffe / Basic characterization of the materials used	29
5.1.1	Mikrolegierte Stähle / Micro-alloyed steels	29
5.1.2	Mangan-Bor-Stähle / Manganese-boron steels	31
5.1.3	Zugprüfung bei Raumtemperatur / Tensile test at room temperature.....	32
5.1.4	Bestimmung der elastischen Konstanten / Determination of the elastic constants	35
5.2	Bestimmung des Übergangswiderstands / Determination of the transition resistance	36
5.3	Warmzugversuche / Hot tensile tests	39
5.3.1	Voruntersuchungen an 22MnB5 / Preliminary investigations on 22MnB5	39
5.3.2	Gefügesimulation an 22MnB5 / Micro modeling of 22MnB5.....	43
5.3.3	Warmzugversuche an 22MnB5 / Hot tensile tests on 22MnB5	51
5.3.4	Messung der Wärmeausdehnung von 22MnB5 / Measurement of the thermal expansion of 22MnB5	55

5.3.5	Gefügesimulation an HC340LAD / Micro modeling of HC340LAD.....	56
5.3.6	Warmzugversuche an HC340LAD / Hot tensile tests on HC340LAD.....	59
5.3.7	Messung der Wärmeausdehnung von HC340LAD / Measurement of the thermal expansion of HC340LAD	62
5.4	Ermittlung des elektrischen Stoffwiderstands und der Wärmeleitfähigkeit / Determination of the electrical resistivity and of the thermal conductivity	63
5.5	Numerische Prozesssimulation / Numerical process simulation	66
5.5.1	Modellierung / Modelling	67
5.5.2	Werkstoffkennwerte / Material properties.....	68
5.5.3	Randbedingungen und Annahmen / Boundary conditions and assumptions	71
5.5.4	Schweißversuche zur Messung der zeitabhängigen Randbedingungen / Welding tests to measure the time-dependent boundary conditions.....	72
5.5.5	Kontaktwiderstandsmodell / Model of the contact resistance.....	77
5.6	Prozesssimulation von artgleichen 22MnB5-Schweißverbindungen / Process simulation of similar welded 22MnB5 joints.....	78
5.6.1	Berechnete Erweichungszone und Eigenspannungsverteilung / Calculated softened zone and residual stress distribution	82
5.7	Prozesssimulation einer Mischverbindung aus 22MnB5+AS und HC340LAD+Z / Process simulation of a mixed joint between 22MnB5+AS and HC340LAD+Z.....	86
5.7.1	Berechnete Erweichungszone und Eigenspannungsverteilung / Calculated softened zone and residual stress distribution	89
6	Charakterisierung der Werkstoffe / Characterization of materials (IWM).....	93
6.1	Gefüge und Härteverläufe der Punktschweißverbindungen / Microstructure and hardness distribution of spot welds	93
6.1.1	Artgleiche Punktschweißverbindungen in 22MnB5+AS / Similar spot welded joints of 22MnB5+AS.....	93
6.1.2	Gemischte Punktschweißverbindungen zwischen 22MnB5+AS und HC340LAD+Z / Dissimilar spot welded joints between 22MnB5+AS and HC340LAD+Z.....	95
6.2	Charakterisierung der Grundwerkstoffe / Characterization of base metals.....	96
6.2.1	Probengeometrien / Specimen geometries	97
6.2.2	Werkstoffkennwerte des HC340LAD+Z / Material properties of HC340LAD+Z.....	98
6.2.3	Werkstoffkennwerte des 22MnB5+AS / Material properties of 22MnB5+AS	100
6.2.4	Werkstoffkennwerte des 22MnB5+Z / Material properties of 22MnB5+Z....	106
6.3	Charakterisierung der zonenspezifischen Gefüge / Characterization of welded microstructure.....	108
6.3.1	WEZ-Gefüge von HC340LAD+Z / HAZ microstructure of HC340LAD+Z....	108
6.3.2	Gefüge der Erweichungszone von 22MnB5+AS / Microstructure of the softened HAZ of 22MnB5+AS	110
6.3.3	Mechanische Eigenschaften des Schweißguts von 22MnB5+AS / Mechanical properties of weld metal of 22MnB5+AS.....	113
7	Charakterisierung der Verbindungen / Characterization of joints (LWF).....	115
7.1	Verwendete Versuchseinrichtung / Used test equipment.....	115
7.1.1	Prüfmaschine Zwick Z100 / Testing machine Zwick Z100	115
7.1.2	Prüfmaschine Instron VHS 25/20 / Testing machine Instron VHS 25/20	116
7.1.3	Optische Verformungsmessung mit dem GOM Aramis System / Optical deformation measurement with GOM Aramis system.....	116
7.1.4	Harmonisierung der Wegmessung / Harmonization of displacement measurement	117
7.2	Versuchsreihe 1 / Test series 1.....	118
7.3	Versuchsreihe 2 / Test series 2.....	123

7.4	Versuchsreihe 3 / Test series 3	123
7.5	Versuchsreihe 4 / Test series 4	126
7.6	Versuchsreihe 5 / Test series 5	129
7.7	Versuchsreihe 9 / Test series 9	132
7.8	Versuchsreihe 10 / Test series 10	134
7.9	Versuchsreihe 11 / Test series 11	137
8	Untersuchung der Bruchmechanismen / Investigation of fracture mechanisms (IWM)	139
8.1	Versuche zur Untersuchung des Einflusses der Erweichungszone in 22MnB5 / Tests for investigation of influence of softened HAZ in 22MnB5	139
8.1.1	Quasistatische Zugversuche mit Schweißpunkt / Quasistatic tensile tests with spot weld	140
8.1.2	Dynamische Zugversuche mit Schweißpunkt / Dynamic tensile tests with spot weld	142
8.1.3	3-Punkt Biegeversuche an Musterbauteilproben / 3-Point bending tests on components	144
8.2	Bruchmechanismen artgleicher Punktschweißverbindungen in 22MnB5+AS / Fracture mechanisms of similar spot welds of 22MnB5+AS	149
8.2.1	Bruchmechanismen im Scherzugversuch / Fracture mechanisms of lap-shear tests	149
8.2.2	Bruchmechanismen im Schälzugversuch / Fracture mechanisms of coach peel tests	152
8.3	Bruchmechanismen gemischter Schweißpunktverbindungen / Fracture mechanisms of dissimilar spot welded joints	154
8.3.1	Bruchmechanismen im Scherzugversuch / Fracture mechanisms of lap-shear tests	154
8.3.2	Bruchmechanismen im KS-2-90° Versuch / Fracture mechanisms of KS-2-90° tests	156
8.3.3	Bruchmechanismen im Schälzugversuch / Fracture mechanisms of coach-peel tests	157
8.4	Werkstoff- und Schädigungsmodelle / Material and damage models	158
8.4.1	Gurson-Modell / Gurson model	158
8.4.2	Gologanu-Modell / Gologanu model	159
8.4.3	Phänomenologisches Versagensmodell – Mises BiFailure/GISSMO / Phenomenological failure model – Mises BiFailure/GISSMO	162
8.4.4	Anpassung des Gologanu-Modells / Adjustment of the Gologanu model ...	163
8.4.5	Anpassung des phänomenologischen Versagensmodells / Adjustment of the phenomenological failure model	172
8.4.6	Detailmodellierung von artgleichen 22MnB5-Punktschweißverbindungen unter Scherzugbelastung / Modeling of similiar 22MnB5 spot welds under lap-shear loading	178
8.4.7	Simulation der DENT-Versuche / Simulation of DENT-tests	182
8.4.8	Anwendbarkeit des Werkstoffmodells bei anderen Blechdicken / Applicability of the phenomenological material model for other sheet thicknesses	184
8.4.9	Simulation der Zugversuche mit Schweißpunkt / Simulation of tensile tests with spot weld	185
8.4.10	Berücksichtigung der berechneten Schweißeigenstressen / Consideration of the calculated residual stresses	187
9	Entwicklung von Ersatzmodellen / Development of simplified spot weld models (IWM)	189
9.1	Anpassung des phänomenologischen Versagensmodells für Schalenelemente / Adjustment of the phenomenological failure model for shell elements	189

9.2	Elementgrößenkalibrierung der Versagenskurven / Element size dependent calibration of failure curves.....	192
9.3	Ersatzmodellierung der Erweichungszone / Modeling of the softened HAZ	194
9.4	Ersatzmodellierung artgleicher Verbindungen in 22MnB5 / Simplified models for spot welds in 22MnB5	197
9.4.1	Ersatzmodell Hexaeder / Simplified model Hexahedron	197
9.4.2	FE-Modelle für die Ersatzmodellierung / FE-models	198
9.4.3	Bestimmung der Versagensparameter des Ersatzmodells / Determination of failure parameters for the simplified model.....	199
10	Komponentenversuche / Component tests (LWF)	203
10.1	Quasistatische Versuche / Quasistatic loading tests.....	203
10.2	Schlagartige Versuche / Impact loading Tests	208
11	Entwicklung einer Submodelltechnik / Development of a submodeling technique (IWM)	213
12	Experimente an ungleichartigen Verbindungen / Experiments on dissimilar joints (LWF).....	219
12.1	Versuchsreihe 6 / Test series 6	219
12.2	Versuchsreihe 7 / Test series 7	220
12.3	Versuchsreihe 8 / Test series 8	221
13	Simulation ungleichartiger Verbindungen / Simulation of dissimilar joints (IWM) ..	225
13.1	Ersatzmodellierung gemischter Verbindungen / Modeling of dissimilar joints.....	225
13.2	Detailmodellierung gemischter Verbindungen / Modeling of dissimilar joints.....	226
14	Validierung der numerischen Methoden / Validation of numerical methods (IWM) .	233
14.1	Simulation des Musterbauteilversuchs mit Detailmodellen / Simulation of the component test with detailed models	233
14.2	Simulation des Musterbauteilversuchs mit Ersatzmodellen / Simulation of component tests with simplified models.....	235
15	Zusammenfassung / Conclusion	241
16	Anhang / Appendix	245
17	Literaturverzeichnis / List of literature	261
	Danksagung / Acknowledgement	265