

Bericht 5166/15

Schlussbericht

VIII/7-3621b/209/2-IGF-1112-0004

Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie

Weiterentwicklung und Qualifizierung leistungsstarker Simulationswerkzeuge für die wirtschaftliche Auslegung und Optimierung von Reibschweißverbindungen

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

Der Bericht enthält 40 Seiten.

Oktober 2015

Hinweis:

Das Forschungsvorhaben, Förderkennzeichen VIII/7-3621b/209/2-IGF-1112-0004, wurde aus Haushaltsmitteln des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie gefördert. Wir bedanken uns für die Förderung dieser Forschungsarbeit

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

Die GSI Gesellschaft für Schweißtechnik International mbH, Niederlassung SLV München, übernimmt keine Haftung für Schäden, die aufgrund weiterführender oder fehlerhafter Anwendung der in diesem Bericht dargestellten Ergebnisse entstehen.

Der Schlussbericht zum Forschungsvorhaben ist von der GSI - Gesellschaft für Schweißtechnik International mbH, Niederlassung SLV München, zu beziehen.

München, den 29.10.2015

Weiterentwicklung und Qualifizierung leistungsstarker Simulationswerkzeuge für die wirtschaftliche Auslegung und Optimierung von Reibschweißverbindungen

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	Stand der Technik / Zielstellung	8
3	Vorgehensweise.....	10
4	Experimentelle und numerische Randbedingungen.....	13
4.1	Experimentelle Erfassung.....	13
4.1.1	Werkstoffprüfung	13
4.1.2	Schweißversuche	14
4.1.3	Temperaturmessung	15
4.2	Numerische Erfassung	16
4.2.1	Vernetzungsstrategie und Randbedingungen	17
4.2.2	Temperaturfeldsimulation und inverse Wärmeeintragsbestimmung	18
4.2.3	Schweißstruktursimulation mit SYSWELD	21
4.2.3.1	Kraftgesteuerte Schweißstruktursimulation:.....	22
4.2.3.2	Weggesteuerte Schweißstruktursimulation:	23
4.2.3.3	Rein thermisch gesteuerte Schweißstruktursimulation:	23
5	Ergebnisse	24
5.1	Auswertung und Validierung der weggesteuerten Simulationen	24
5.1.1	Geometrie der Schweißwulstausbildung	24
5.1.2	Temperaturfeld	25
5.1.3	Eigenspannungen.....	26
5.2	Auswertung und Validierung der thermisch gesteuerten Simulationen	28
5.2.1	Temperaturfeld	28
5.2.2	Eigenspannungen.....	31
5.3	Rückschlüsse der untersuchten Simulationsmethoden.....	33
6	Diskussion.....	34
7	Wirtschaftliche Bedeutung	35
8	Zusammenfassung.....	36
9	Schrifttum	39

8 Zusammenfassung

Aufgabe dieser Forschungsarbeit war es, Simulationen des Rotations-Reibschweißprozesses mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode zu untersuchen und zu optimieren, so dass die primären Wirkmechanismen beim Rotationsreibschweißen qualitativ beschrieben werden. Dafür wurde unter Nutzung und Weiterentwicklung der Prozesssimulation, die Software Visual Weld eingesetzt. Die Forschungsergebnisse wurden auf Basis von ermittelten Prozesskennwerten aus realen Schweißabläufen mit experimentellen Messungen zum Abgleich und zur Bestätigung der rechnerischen Untersuchungen erreicht.

Im ersten Schritt wurden auf einer 15-t-Reibschweißmaschine Reibschweißversuche durchgeführt, zu denen einerseits die relevanten Prozesskennwerte wie Prozessteiten, Kraftniveaus, und zeitabhängige Verkürzung erfasst wurden, aber auch zusätzliche Messgrößen wie die Temperaturverteilung im Bereich der Fügezone, mittels Thermoelementen und Thermografie) sowie die Messung von Härte und Oberflächenspannungen.

Einen wesentlichen Bestandteil der Forschungsarbeit stellte die Modellierung mit numerischen Untersuchungen zur Bestimmung einer geeigneten Ersatzwärmequelle für das Rotationsreibschweißen mit kontinuierlichem Antrieb dar, die durch Vergleich von Messwerten aus zahlreichen praktischen Schweißversuchsvarianten mit Simulationsergebnissen abgeglichen wurde. Anhand realer geometrie- und werkstoffabhängigen Prozesskenngrößen konnten variabel definierbare Eingangsgrößen für den „inversen Ansatz“ der Simulationsrechnung untersucht und geeignet definiert werden, bei dem die real durch Reibung erzeugte Wärme rechnerisch durch eine Ersatzwärmequelle ersetzt wurde - quasi wie eine Heizelement-Stumpfschweißung. Dafür wurden sowohl unterschiedliche örtliche Wärmeeintragsfunktionen untersucht, die die radiale Abhängigkeit der Wärmeeinbringung als Ersatz für unterschiedliche Relativgeschwindigkeiten simuliert, als auch zeitliche Wärmeeintragsfunktionen. Die rechnerischen Untersuchung der numerischen Simulation des Rotationsreibschweißens erfolgten mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode und der Software VISUAL WELD. Dabei wurden zunächst verschiedene Arten der Vernetzung erprobt und durch Netzkonvergenzstudien optimiert. Nach Festlegung der geeigneten Vernetzung konnte die Varianten der Simulation mit Analyse der Einflussgrößen Wärme- und Krafteintrag, Schweißzeit, Geometrie und Werkstoff auf die Berechnungsergebnisse, Temperaturverteilung, Gefüge, Verformung und Eigenspannungszustand nach dem Schweißen, durchgeführt werden.

Aus den rechnerisch untersuchten Varianten wurden diejenigen bestimmt, mit denen die beste Abbildung des Simulationsprozesses auf den realen Reibschweißprozess erreicht wurde. Anhand der rechnerisch ermittelten Temperaturverläufe kann bereits eine sehr gute Übereinstimmung zu den gemessenen Temperaturverläufen bestätigt werden, sowohl für die Erwärmungsphase, als auch für die Abkühlphase nach dem Reibschweißen. Damit zeigt sich die vorgenommene Struktursimulation als qualitativ und mit Einschränkungen auch quantitativ bereits gut geeignet, um die thermischen Abläufe beim Reibschweißen und die daraus resultierenden Eigenschaften auf den Werkstoff und das Bauteil (Härte, Gefüge, Eigenspannungen, Verzug) mit hoher Realitätsnähe abzubilden. Mit diesem einmal auf den Werkstoff und eine Geometrie abgeglichenen Rechenmodell, können nun auch geometrische und prozesstechnische Varianten simuliert und abgebildet werden, ohne dass dazu praktische Versuche notwendig sind. Dies stellt eine wesentliche Erleichterung bei der Prozessübertragung für veränderte Dimensionen dar, z.B. bei Produktfamilien, aber auch bei der Qualitätsoptimierung für bestehende Produkte, indem der Prozess z.B. auf die Begrenzung kritischer

Aufhärtung und auf die Begrenzung oder Vermeidung von Eigenspannungen in bestimmten Bereichen (geometrischen Randkerben) hin durch Simulationsrechnung optimiert werden kann.

Anhand von drei vorgestellten Simulationsmethoden wurden deren Vorzüge und Grenzen deutlich gemacht:

Mit der kraftgesteuerten Simulation wird ersichtlich, dass der Reibschweißprozess aus der Praxis nicht direkt auf die FEM-Struktursimulation übertragen werden kann. Für eine erfolgreiche Simulation muss also vom realen Prozess abstrahiert werden und für die FEM Berechnung geeignete Parameter ermittelt werden.

Die weggesteuerte Simulation stellt die Methode dar, mit den vorhandenen Prozessgrößen und einer inversen Bestimmung der Wärmequelle den Reibschweißprozess zu simulieren. Die Ermittlung eines realitätsnahen Temperaturfeldes stellt sich als ein langwieriger Prozess heraus. Für die Ermittlung des Temperaturfeldes stellt sich dieses Verfahren aufgrund der langen Berechnungszeiten zwar als aufwendiger als die anderen Varianten heraus, liefert dafür aber eine gute Übereinstimmung zwischen realen und berechneten Temperaturfeldern und somit für die Ableitung der dadurch erzeugten Einflüsse auf den Werkstoff. Darüber hinaus garantiert dieses angenäherte Temperaturfeld aber noch nicht eine realitätsnahe Wulstform, oder einen realitätsnahen Eigenspannungsverlauf.

Die kurze Berechnungsdauer ist der größte Vorteil der thermisch gesteuerten Schweißstruktursimulation, allerdings unter der Annahme und Vereinfachung, dass die Wulstbildung vernachlässigt wird. Zusätzliche Abweichungen zwischen weggesteuerten und thermisch gesteuerten Simulation sind durch die Ungenauigkeiten gegeben, die der Vergleich von Knoten eines verformten und eines nicht verformten Netzes mit sich bringt. Abgesehen davon ist eine, zumindest qualitative, Übereinstimmung zwischen beiden Simulationsmethoden noch erkennbar.

Die exakte Voraussage der in der Praxis verwendeten Prozessparameter ist allein mit dem Finite-Elemente-Ansatz der kraftgesteuerten Simulation nicht stabil erreichbar. Ein gekoppeltes Berechnungskonzept von Schweißprozess- und Schweißstruktursimulation lässt einen vielversprechenden Ansatz zur ganzheitlichen Weiterentwicklung der Simulation des Reibschweißprozesses erkennen. Die CFD-Prozesssimulation und die FEM-Struktursimulation können sich gegenseitig ergänzen, indem Wärmeeintrag, Temperaturfeld und reale Verformungen (Verkürzung, Wulstausbildung) mittels CFD-Prozesssimulation berechnet werden und als Eingangsgrößen in der FEM-Struktursimulationsberechnung benutzt werden können. Die Struktursimulation kann somit zur genauen Eigenspannungsermittlung verwendet werden. Dadurch wird eine höhere Genauigkeit und Robustheit erzielt. Diese Methode erfordert jedoch zwei Simulationsprogramme und ein Koppelmechanismus, um diese zu verbinden.

München, den 29.10. 2015



Dipl. Ing. (FH) M. Müller