

Numerische Simulation des Widerstandschweißens in der Profilherstellung

M. Kičin, N. Enzinger (IWS, TU Graz), R. Rauch, J. Wagner (voestalpine Stahl GmbH, Linz)

Einleitung

Der Widerstandschweißprozess ist ein wichtiges und in der Industrie vielfältig eingesetztes Fügeverfahren für die Profilherstellung. Der Pressstumpf (PS)- und Hochfrequenz (HF)-Schweißprozess zählt zu dieser Schweißprozessgruppe. Mit dem HF-Schweißprozess werden z.B. Rohre für Nockenwellen oder Fahrwerkstabilisatoren im Fahrzeug, sowie Hohlprofile in unterschiedlichsten Formen längsnahtgeschweißt. Mit dem Pressstumpfschweißverfahren werden u.a. Ringe für Felgen, Getriebeteile oder Ketten verschweißt. Mit dem Pressstumpfschweißprozess kann auch der HF-Schweißprozess nachgestellt und korreliert werden. Damit kann der Einfluss des Bandmaterials auf die Schweißnahtqualität und die schädigenden Einflüsse auf die Verbindung untersucht werden. Da die Schweißnaht ein zentrales Element von vielen Produkten ist, ist ein tieferes Prozessverständnis inklusive der physikalischen Phänomene unabdingbar. Die numerische Simulation von Schweißprozessen bietet die Möglichkeit Phänomene zu untersuchen, die messtechnisch nur schwer oder gar nicht erfasst werden können. Mit der Simulation können außerdem numerische Parameterfindungen und -optimierungen durchgeführt werden, wodurch der meist teure praktische Versuchsaufwand reduziert werden kann. Das in letzter Zeit zunehmende Anwenderinteresse an der Schweißprozesssimulation ist auch mit dem wirtschaftlichen Aspekt verbunden, d.h. mit der Zeit- und Kosteneinsparung.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war die numerische Simulation des Pressstumpfschweißens mit der Finiten Elemente Methode (FEM), unter Berücksichtigung der thermischen und mechanischen Belastung. Es soll damit ein Werkzeug erstellt werden, mit dem der Pressstumpfschweißprozess möglichst realitätsnah abgebildet werden kann, um den Einfluss der Schweißparameter auf die Schweißverbindung darzustellen, wodurch der Schweißprozess detailliert untersucht und analysiert werden kann. Die Simulation wurde an einem 2D-Modell mit der kommerziellen Schweiß- und Wärmebehandlungssoftware SYSWELD durchgeführt. Bei dieser Arbeit wurde der allgemeine Baustahl S355J2G3 ausgewählt. Die benötigten thermophysikalischen und thermomechanischen Kennwerte wurden aus der Literatur und der SYSWELD Materialdatenbank entnommen. An Hand eines numerisch erstellten Schweiß-ZTU-Schaubildes wurden die Gefügeumwandlungen beschrieben. Die thermische und mechanische Berechnung wurde stark gekoppelt durchgeführt. Die starke Kopplung erfolgte durch eine Routine in der SYSWELD eigenen Programmiersprache SIL (SYSWELD Interface Language) [1].

Pressstumpfschweißmodell

Abb. 1 zeigt das erstellte und vernetzte 2D-Modell für die Simulation des Pressstumpfschweißens. Die geometrischen Abmessungen der Elektroden wurden entsprechend der Ideal AS 100 S Schweißanlage, die bei der voestalpine Stahl GmbH in Linz steht, definiert. Die Elektrode 3 (s. Abb. 1) wird über die Bohrung gekühlt. Der Stoßbereich der Bleche wurde am feinsten vernetzt (Elementgröße 0,05mm), da in diesem Bereich die größten Temperaturgradienten und Verformungen auftreten. Bei der Vernetzung wurden lineare 2D Quadrat- und Dreieckselemente verwendet. Zur Definition der Randbedingungen wurden 1D-Element Gruppen (Collectors) erstellt. Das Modell besteht insgesamt aus 14725 2D- und 1054 1D-Elementen, sowie 15025 Knoten.

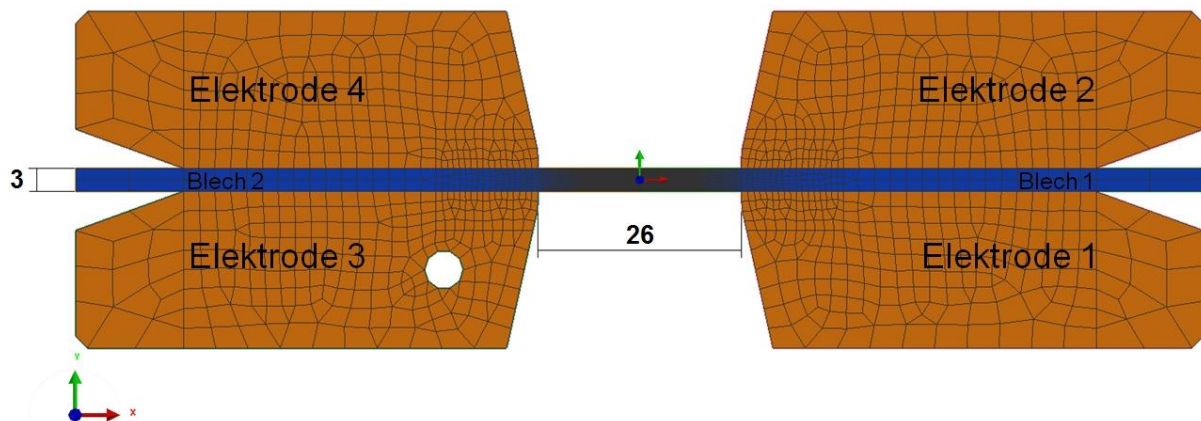


Abb. 1: Vernetztes 2D-Modell für die Simulation des Widerstandspressstumpfschweißens.

Numerische Berechnung

Die numerische Berechnung setzt sich aus der thermischen und mechanischen Berechnung zusammen. Bei der Simulation von konduktiven Widerstandsschweißverfahren wird bei der thermischen Berechnung die elektrokinetische und thermometallurgische Gleichung gleichzeitig gelöst, d.h. sie sind numerisch stark gekoppelt. Das FE Modell besitzt dabei an jedem Knoten zwei Freiheitsgrade, die Temperatur T und das elektrische Potential V . Bei der thermischen Berechnung wird der reale Wärmeeintrag beschrieben, wodurch der Schweißprozess rein physikalisch beschrieben wird. Für die thermische Kontaktmodellierung wurde das CNTG Kontaktelement verwendet. Die unteren Elektroden bilden den geschlossenen Stromkreis. Der elektrische Strom fließt dabei von Elektrode 1 zu Elektrode 3 (s. Abb. 1). Bei der thermischen Berechnung kann die Schweißzeit, die elektrische Spannung oder der Strom (Gleich- oder Wechselstrom) als Schweißparameter definiert werden. Bei dieser Arbeit wurde ein elektrischer Spannungsverlauf als Input definiert.

Die mechanische Berechnung ist thermometallurgisch und -mechanisch gekoppelt. Für die nichtlineare Berechnung der großen Verformungen und Verschiebungen wurde die "updated Lagrangian" Formulierung verwendet. Die Gleichgewichtsgleichungen werden dabei unter Anwendung des Cauchy-Spannungs- und Dehnratentensors im aktuellen, verformten Koordinatensystem gelöst. Das thermo-elastisch-plastische Werkstoffverhalten wurde mit der Methode der inkrementellen Dehnungsänderung mathematisch beschrieben. Die Gesamtdehnung setzt sich aus der elastischen, thermischen, umwandlungsbedingten, konventionell plastischen und umwandlungsplastischen Dehnung zusammen. Mit der Annahme der isotropen Verfestigung wurde das Verfestigungsverhalten beschrieben. Für die mechanische Kontaktmodellierung wurde das SL2D Kontaktelement verwendet, das aus zwei 1D Elementgruppen (CONTACTOR und TARGET) besteht. Bei der mechanischen Berechnung kann die Schweißzeit, -geschwindigkeit, der Stauchdruck, -weg oder die Stauchkraft als Schweißparameter definiert werden. In dem hier behandelnden Beispiel wurde ein Druckverlauf als Input definiert. Die mechanische Lastaufbringung erfolgte wie auf der Schweißanlage von der rechten Seite auf das Blech 1 über 1D-Elemente. Die linke Seite des Modells (Elektrode 3 und 4, Blech 2) ist fest eingespannt.

Die thermische und mechanische Berechnung wird standardmäßig schwach gekoppelt durchgeführt. Dabei wird zunächst die thermische Berechnung für den ganzen Prozesszeitraum durchgeführt. Anschließend wird die mechanische Berechnung ebenfalls für den ganzen Zeitraum durchgeführt. Ein besonderes Merkmal dieser Arbeit ist, dass diese beiden Analysen stark gekoppelt durchgeführt wurden. Dabei wurde nach jedem thermischen Rechenschritt ein mechanischer Rechenschritt durchgeführt und die Vernetzung aktualisiert. Durch die Verformungsaktualisierung wird u.a. der Einfluss des Verformungszustandes bei der thermischen Berechnung mit berücksichtigt.

Ergebnis einer Pressstumpfschweißsimulation

Abb. 2 zeigt das Ergebnis einer stark gekoppelten thermischen und mechanischen Pressstumpfschweißsimulation. Der Verformungszustand ist mit der Temperaturverteilung dargestellt (Abb. 2, links). Die für das Widerstandspressstumpfschweißen typische Stauchwulst hat sich symmetrisch im Stoßbereich der Bleche ausgebildet. Das Temperaturprofil weist die spezifische "Sanduhr"-Form auf, die sich bei diesem Verfahren einstellt. Die berechneten Temperaturverläufe von zwei ausgewählten Knoten (N-61 und N-1800) sind im Diagramm (Abb. 2, rechts) dargestellt. Die Aufheizung erfolgt in beiden Punkten sehr schnell. Im Stoßbereich der Bleche (N-61) beträgt die Spitzentemperatur 1167°C ($t=1,24s$). In der Wärmeeinflußzone (N-1800) beträgt die Spitzentemperatur 895°C ($t=1,38s$). Die $t_{8/5}$ -Zeit beträgt in beiden Knoten ca. 3,6s.

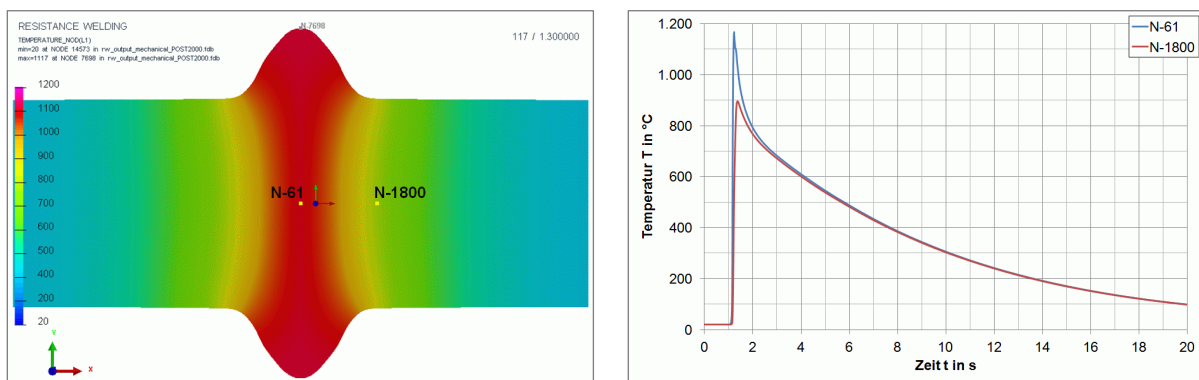


Abb. 2: Verformungszustand mit Temperaturverteilung (links) und zwei dazugehörige Temperaturverläufe (rechts).

Zusammenfassung und Ausblick

In der Fachliteratur sind wenig Arbeiten über die Pressstumpfschweißsimulation vorhanden. Die zu diesem Thema bisher veröffentlichten Arbeiten wurden überwiegend nur thermisch simuliert. In der vorliegenden Arbeit wurde der Pressstumpfschweißprozess rein physikalisch thermisch und mechanisch simuliert. Die thermische und mechanische Berechnung wurde dabei stark gekoppelt durchgeführt, wodurch die Ergebnisgenauigkeit erhöht wurde. Die Pressstumpfschweißsimulation wird in weiterer Folge am erstellten Modell mit realen Schweißparametern durchgeführt, die Ergebnisse mit praktischen Schweißversuchen verifiziert, sowie die thermomechanischen Materialkennwerte und SZTU-Schaubilder mit Stauchbelastung zur Erhöhung der Ergebnisqualität experimentell ermittelt. Wenn diese ausstehenden Punkte erledigt sind und die gemessenen und berechneten Werte gut übereinstimmen, sind u.a. folgende Untersuchungen mit der Pressstumpfschweißsimulation möglich:

- Berechnung der Temperaturverteilung bei beliebigen Schweißparametern
- Ergebnisvorhersagen und Darstellung des Einflusses der Schweißparameter auf die Schweißnahtausbildung
- Numerische Parameterfindungen und -optimierungen durch Prozessparameteränderungen, um den praktischen Versuchsaufwand zu reduzieren
- Berechnung der axialen Bauteilverkürzung, wodurch die erforderliche Längenzugabe für die Endabmessung des Bauteils definiert werden kann
- Darstellung des Härteverlaufs über die Schweißnaht
- Simulation von Wärmevor- und -nachbehandlungen, um deren Einfluss auf z.B. die Phasenverteilung oder den Härteverlauf darzustellen