

Teilprojekt A3

Titel

Massiv parallelisierte Simulation der Schmelzbaddynamik des Laserstrahl-Mikroschweißens mit modernen numerischen Verfahren

Projektleitung/-bearbeitung

Prof. Wolfgang Schulz, Christoph Schöler

Lehr- und Forschungsgebiet Nichtlineare Dynamik der Laser-Fertigungsverfahren

Aufgabenstellung

Die im vergangenen Zeitraum adressierten Aufgaben betreffen die Untersuchung der Einschweißtiefe beim Laserstrahlmikroschweißen mit örtlich moduliertem Energieeintrag in Abhängigkeit der Prozessgrößen sowie die Weiterentwicklung und Umsetzung numerischer Methoden zur Beschreibung von Vorgängen in zeitlich veränderlichen Gebieten und der Verfolgung freier Grenzflächen, welche für die Beschreibung der dynamischen Wechselwirkung der Teilprozesse an den Phasengrenzen erforderlich sind.

Vorgehensweise

In Anknüpfung an die Analyse der zeitlich periodischen Variationen der Schmelzbadfläche an der Oberseite des Werkstücks durch Simulation und Experiment, welche im vorherigen Zeitraum durchgeführt wurde, wird zunächst eine Wärmequelle kalibriert. Hierzu dienen die experimentellen Ergebnisse einer Liniertiefschweißung, die von TP A3 bereitgestellt werden. Mithilfe der Wärmequelle wird in einer FEM-Wärmeleitungssimulation der Einfluss der geänderten Prozessführung „Wobbeln“ auf die Zielgröße Einschweißtiefe untersucht.

Zur Beschreibung der physikalischen Vorgänge in zeitlich veränderlichen Gebieten wird die Methode der „Embedded Boundary Conditions“ (EBC) implementiert. Sie erlaubt das Setzen von Randbedingungen auf einem kartesischen Rechengitter. Dieses Vorgehen erspart eine aufwendige Neuvernetzung und ermöglicht zudem die Beschreibung von Topologiewechseln. Die EBC-Methode wird zunächst mit einem FEM-Löser für die Wärmeleitungsgleichung gekoppelt. Die Evaluierung erfolgt

anhand eines Benchmarks, der in Zusammenarbeit mit TP B5 im Arbeitskreis M4 „Effiziente numerische Methoden“ aus einer Testaufgabe mit der 2D-Zylinderquellenlösung zur Wärmeleitung entwickelt wurde.

Zur Grenzflächenverfolgung wird die Level-Set-Methode ausgewählt. Sie verträgt sich aufgrund ihrer Eigenschaft einer Eulerischen Formulierung mit der EBC-Methode. Im ersten Schritt wird die stationäre Form einer vorgegebenen Oberfläche durch das Berechnungsgebiet bewegt. Für ein effizientes Lösen der vollständigen Level-Set-Aufgabe werden verschiedene Algorithmen und Parallelisierungskonzepte untersucht und ein geeignetes ausgewählt.

Ergebnisse

In der Simulation des Laserstrahl-Mikroschweißens mit örtlicher Leistungsmodulation konnten die im Experiment beobachtbare Verringerung der maximalen Einschweißtiefe sowie eine Links-rechts-Asymmetrie der Einschweißtiefe bei größer werdendem Überlappgrad nachgebildet werden. Der Überlappgrad wurde über die Oszillationsfrequenz der dem Vorschub überlagerten Kreisbewegung variiert. Somit konnte die Hypothese der lokalen Bahngeschwindigkeitsunterschiede (Péclet-Zahl) als Ursache für die Einschweißtiefenvariation unterstützt werden. Zugleich wurde die Wärmeleitung als dominanter Teilprozess für die Wirkung der Prozessführung auf die Einschweißtiefe identifiziert.

Als Verfahren zur Formulierung der Randbedingungen mittels EBCs wurde ein direktes Setzen der Freiheitsgrade gewählt und in einem FEM-Programm für die Wärmeleitung implementiert. Direktes Setzen meint, dass die Freiheitsgrade an den Knotenpunkten durch geeignete Extrapolation der Werte auf dem tatsächlichen Rand, welcher durch eine Level-Set-Funktion beschrieben wird, berechnet werden. Der EBC/FEM-Löser wurde – zum aktuellen Zeitpunkt mit linearen Basis-/Testfunktionen – anhand einer Konvergenzstudie sowie dem oben genannten Benchmark erfolgreich getestet. Das Programm ist mit einem OpenMPI-parallelierten, iterativen GMRES-Löser aus der PETSc-Bibliothek ausgestattet. Die Konvergenzstudie offenbart eine quadratische Abnahme des Fehlers der Temperaturwerte auf dem tatsächlichen Rand mit der Gitterauflösung.

Als Level-Set-Funktion wurde eine Funktion gewählt, welche vorzeichenbehaftete Abstände der Knotenpunkte von der zu beschreibenden Oberfläche angibt. Für den Benchmark wurden die Werte der Level-Set-Funktionen in jedem Zeitschritt analytisch berechnet (Abstände Punkt-Zylinder). Um im allgemeinen Fall die zeitliche Entwicklung der Level-Set-Funktion zu beschreiben, ist die Level-Set-Gleichung mittels eines geeigneten numerischen Verfahrens zu bestimmen. Hierzu wurde ein Fast-Marching-Algorithmus erarbeitet, der zum einen den Upwind-Charakter der hyperbolischen DGL berücksichtigt (Informationsfluss) und gleichzeitig eine Parallelisierung des Lösungsverfahrens ermöglicht (Narrow-Band-Ansatz).

Des Weiteren wurde aus einem reduzierten Modell eine parametrisierte, stationäre Kapillarform berechnet und ein Algorithmus zur Berechnung der Abstände von deren Oberfläche entwickelt. Diese stationäre Level-Set-Funktion wird im Folgenden benutzt, um das bestehende Ein-Phasen-Modell um den Einfluss der Schmelze zu erweitern, ohne die Dynamik der Kapillare beschreiben zu müssen.

Zusammenfassung und Ausblick

Die nächsten Arbeitspunkte lauten:

- Ableiten und Bewerten eines Modulationskonzeptes zur Kompensation der Einschweißtiefenvariation
- Implementation der Fast-Marching-Methode zum Lösen der Level-Set-Gleichung
- Evaluierung des Level-Set-Algorithmus (Benchmark)
- Modellerweiterung um die Schmelze
- Untersuchung des Kriteriums Oberflächenrauheit

Veröffentlichungen

C. Schöler et al.: 'A fast method for automated calibration of heat sources' in *Mathematical Modelling of Weld Phenomena 11*, Verlag der Technischen Universität Graz, accepted 2016.

A. Haeusler et al.: 'Influence of the seam geometry by using spatial power modulation', *Journal of Laser Application*, accepted 2016.