

Teilprojekt A3

Titel

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

Projektleitung/-bearbeitung

Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang Schulz, M.Sc. Christoph Schöler
Lehr- und Forschungsgebiet Nichtlineare Dynamik der Laser-Fertigungsverfahren NLD, RWTH Aachen

Aufgabenstellung

Im Berichtsjahr wurden die folgenden Aufgabenstellungen adressiert:

- Erweiterung des Kapillarmodells
- Implementation eines Verdampfungsmodells
- Entwicklung eines approximativen Modells für die Umströmung der Kapillare am Scheitel
- Erweiterung des Strömungslösers

Vorgehensweise

Im Vorjahr wurde ein Kapillarmodell vorgestellt, mit dem sich eine stationäre Schweißkapillare schichtweise bestimmen lässt, und das in einer hybriden Prozesssimulation für die Berechnung von Temperaturverteilungen verwendet wurde. Darauf aufbauend wurden Modellerweiterungen vorgenommen, die sowohl Absorptionsbeiträge von (Mehrfach-)Reflexionen der Laserstrahlung als auch Verdampfungsbeiträge in den kontinuumsphysikalischen Bilanzgleichungen auf der Kapillaroberfläche umfassen. Die Berechnung der Ausbreitung der Laserstrahlung wird durch ein Raytracing-Verfahren realisiert. Die Verdampfungsanteile stammen aus einem Verdampfungsmodell, das die Vorgänge in der Knudsen-Schicht approximativ berücksichtigt. Eine globale Bilanzgleichung berücksichtigt die korrekte Erfassung der von der Laserstrahlung absorbierten Leistungsanteile innerhalb einer Kapillarschicht.

Zur Abschätzung von typischen Werten der Größen Oberflächentemperatur, Schmelzfilmdicke und Massenstrom sowie von

Massen- und Energieanteilen der Verdampfung wurde ein approximatives Modell entwickelt, das die Umströmung des Kapillarscheitels in einer dünnen 2D-Schicht beschreibt. Das Modell behandelt Wärmeleitung und Schmelzeströmung anhand von integralen Gleichungen und berücksichtigt die Vorgänge des Aufschmelzens und Verdampfens durch entsprechende Bilanzen an den Phasengrenzen, wobei ebenfalls das oben genannte Verdampfungsmodell zum Einsatz kommt.

Ergebnisse

Mithilfe des entwickelten Kapillarmodells lassen sich in Abhängigkeit der Prozessparameter stationäre Kapillaren für einen quasi-stationären Zustand berechnen. Die Berücksichtigung von Absorptionsbeiträgen, die durch die reflektierten Anteile der Laserstrahlung hervorgerufen werden, führen zu einer signifikanten Vertiefung der Schweißkapillare. Andererseits beschränkt die Berücksichtigung von Schmelz- und Verdampfungsverlusten eine Überschätzung der Einschweißtiefe. Somit lassen sich die bei Mikroschweißungen im Überlappstoß erforderlichen Aspektverhältnisse in guter Übereinstimmung mit experimentellen Ergebnissen aus Teilprojekt A1 berechnen. Darüber hinaus liefert die Intensitätsverteilung der Laserstrahlung auf der Absorptionsfläche Hinweise für die Beurteilung der Stabilität der Kapillare im dynamischen Fall.

Die mithilfe des approximativen Modells berechneten Verdampfungsanteile liefern für typische Vorschubgeschwindigkeiten einen geringen Beitrag in Höhe von wenigen Prozent in der Energiebilanz. Mit steigendem Vorschub wächst dieser Anteil, bleibt jedoch auf den einstelligen Prozentbereich beschränkt. Die Hauptanteile der absorbierten Energie gehen in Beiträge für das Heizen und Aufschmelzen des festen Materials, gefolgt von konvektiven Verlusten durch die Schmelzeströmung. Eine entsprechende Tendenz zeigt sich für den Verdampfungsstrom, der unterhalb von einem Prozent liegt. Die Verteilung der Verdampfung seitlich entlang der Kapillaroberfläche führt zur Beschleunigung der Schmelze in horizontaler Richtung und zur Umströmung der Kapillare. Der Massenstrom der umströmenden Schmelze überwiegt dem Verdampfungsstrom bei Weitem. Diese Beobachtung liefert eine entscheidende Erkenntnis für das dreidimensionale Prozessmodell mit Schmelze,

in dem in guter Näherung eine umströmte Kapillare betrachtet werden kann.

Das verwendete Verdampfungsmodells basiert auf einem hydrodynamischen Ansatz, bei dem die kontinuumsphysikalischen Bilanzgleichungen über die Phasengrenze zwischen Schmelze und Gas integriert werden. Diese liefern Sprungbedingungen für Temperatur, Dichte und Druck zwischen flüssiger und gasförmiger Phase. Hierbei wurden zunächst vereinfachende Annahmen über den Zustand des Gases getroffen, da das System im Allgemeinen nur unter Kenntnis der Größen aus der Gasströmung lösbar ist. Der Strömungszustand soll in Zukunft durch numerische Rechnungen validiert werden.

Der FEM-Löser zur Berechnung von inkompressiblen Strömungen wurde unter Verwendung einer hybriden OpenMP/Open MPI-Parallelisierung implementiert und an Testfällen validiert. Zur numerischen Stabilisierung wurden Erweiterungen am Lösungsalgorithmus vorgenommen, die auf einem Charakteristikenverfahren basieren. Der Löser wird unter Berücksichtigung der für den Schweißprozess relevanten Randbedingungen im kommenden Projektjahr in das Prozessmodell integriert.

Zusammenfassung und Ausblick

Die für den Mikroschweißprozess relevanten Mechanismen zur Ausbildung der Schweißkapillare wurden in einem numerisch effizienten Prozessmodell umgesetzt. Die Strömungsbedingungen im Vorlauf der Kapillare wurden mithilfe eines approximativen Modells analysiert und weisen auf geringe Verdampfungsanteile hin. Die Verdampfung als schmelzeantreibende Kraft wurde als teilprojektübergreifendes Forschungsthema für den Arbeitskreis M2 aufgenommen, da sie auch für andere Teilprojekte ein relevantes Phänomen darstellt. Dabei sollen verschiedene Ansätze aus der Literatur miteinander verglichen und eine Methodik zur Beschreibung von laserbasierten, schmelzebehafteten Fertigungsverfahren entwickelt werden.

Die nächsten Arbeitspunkte des Teilprojektes lauten:

- Erweiterung des Kapillarmodells um Strömungskorrekturen zur genaueren Berechnung der Verteilungen der kontinuumsphysikalischen Größen auf der Kapillaroberfläche

- Integration des Kapillarmodells in ein hybrides Prozessmodell zur Berechnung von dreidimensionalen Temperaturverteilungen
- Integration des numerischen Strömungslösers in das Kapillarmodell zur Evaluation der approximativen Strömungsmodelle
- Erweiterung des Strömungslösers zur Beschreibung von mehrkomponentigen Schmelzen

Veröffentlichungen

-