

Transport Phenomena during Molten Droplet Pile-Up in Micromanufacturing

Dissertation

submitted to

The Swiss Federal Institute of Technology Zurich

for the degree of

Doctor of Technical Sciences

presented by

Stephan Eirik Ligaard Haferl
Dipl. Masch. – Ing. ETH Zurich

born 8th of March 1972

citizen of Zurich

Switzerland

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. D. Poulidakos, examiner

Prof. Dr. J. Dual, co-examiner

Zurich, 2001

Abstract

Over the last few years a significant research effort has been devoted to the investigation of molten droplet impact phenomena. The reason for this activity is the pressing need of an in-depth understanding of these phenomena for the successful development and implementation of a host of emerging technologies such as rapid prototyping, spray forming, spray coating and precision molten droplet dispensing in the manufacturing of microelectronics and other micromanufacturing applications. Most of the existing work has been focused on the investigation of droplet impact on planar substrates. Little information can be found in the scientific literature on the basic problem of droplet impact on non-planar substrates. With reference to molten droplets of interest to this thesis, applications include structure-building (rapid prototyping) as well as deposition of a required precise amount of material, which is larger than that of the largest single droplet that can be reliably generated; here multiple droplets are impinged one on top of the other. In addition, droplet impact on non flat surfaces finds a plethora of applications in nature and in technology (exemplified by spray coating, spray cooling, ablation technologies etc.). The limited work published to date in this challenging field consists of few oversimplified analytical or computational models (neglecting e.g. the all important effect of fluid dynamics, for example) with or without some experimental validation of only the steady state regime.

This thesis presents for the first time a detailed experimental and numerical investigation of the transient thermofluidic transport phenomena occurring during molten-microdroplet-deposition-based micromanufacturing processes. Experimental visualization of phenomena lasting a fraction of a millisecond in severely deforming domains of typical size of a fraction of a millimeter, as well as highly versatile numerical results of the thermofluidic phenomena during the axisymmetric pile up (deposition one upon another) of molten picoliter size liquid metal droplets on a substrate are presented. The numerical model thereby solves the coupled Navier-Stokes and energy equations accounting for solidification, slip at the contact line as well as thermal contact resistance at the respective interfaces. Incompressibility of the flow as well as constant thermophysical properties are assumed. The prevailing physical mechanisms of the pile up process (occurring simultaneously) are identified and quantified both experimentally and numerically. These are the fluid mechanics of the bulk liquid (controlled by the initial momentum of the impinging droplet and the free, deforming surface of the droplet), capillarity effects at the liquid-solid interface, and solidification (controlled by the initial temperature of the droplet and the substrate) and the important effect of thermal contact

resistance at the respective interfaces. The predictive capabilities of the state of the art finite element numerical model, based on a Lagrangian formulation and involving unstructured grid generation in a continuously deforming domain, are presented and discussed. Furthermore, the parametric domain in which the numerical model performs reliably is identified in terms of the relevant dimensionless groups. These are the Reynolds and the Weber number for the fluid mechanics, the Stefan and the Biot number for the heat transfer and the solidification. In terms of values of the relevant dimensionless groups the following ranges are covered in this thesis: $Re = 281 - 453$, $We = 2.39 - 5.99$, $Ste = 0.187 - 0.895$. This corresponds to molten solder droplets impinging at velocities ranging between $1.12 - 1.74$ [m/s] having an average diameter of ≈ 78 [μm]. The initial substrate temperature ranges between $25 - 150$ [$^{\circ}\text{C}$]. The initial droplet temperature is kept constant at 210 [$^{\circ}\text{C}$]. The main results of the thesis clearly add originally and significantly to the knowledge base of molten droplet pile up and solidification, a process of importance, since it is the building block to a host of micromanufacturing applications.

Zusammenfassung

Erheblicher Forschungsaufwand ist in den letzten Jahren der Untersuchung von Phänomenen im Zusammenhang mit dem Aufprall und der möglichen Erstarrung von Tropfen auf ebenen Substraten gewidmet worden. Den Hintergrund dazu bilden mannigfaltige industrielle Applikationen, die nur bei tieferem Verständnis für die auftretenden physikalischen Phänomene erfolgreich entwickelt und implementiert werden können. Zu diesen gehören u.a. Verfahren wie „Rapid Prototyping“, Spritz-Formgebung, Spritz-Beschichtung sowie die Präzisionsdispensierung von Lötzinntropfen in der Herstellung von mikroelektronischen Komponenten.

Bestehende Arbeiten haben sich bisher auf den Aufprall von Tropfen auf ebenen Substraten konzentriert. In der wissenschaftlichen Literatur sind wenige Informationen zum Aufprall von Tropfen auf Substraten mit gekrümmten Oberflächen erhältlich. Mögliche industrielle Applikationen, speziell für die untersuchten Mikrotropfen in der vorliegenden Dissertation, umfassen die Herstellung von tropfen-basierten Mikrostrukturen sowie die Dispensierung von kleinsten Materialmengen auf ein festes Substrat. Für Materialmengen, welche das Volumen der grössten Tropfen, die mit der bestehenden Technologie erzeugt werden können, übersteigen, müssen mehrere Tropfen aufeinander deponiert werden. Es existieren viele Anwendungen und Erscheinungen in Natur und Technik, welche den Aufprall von Tropfen auf gekrümmten Oberflächen beinhalten. Die bis dato limitierte Anzahl an publizierten Arbeiten basiert auf ein paar wenigen, stark vereinfachenden analytischen und numerischen Modellen (unter Vernachlässigung des wichtigen Einflusses der Fluiddynamik). Diese Modelle wurden bisher nur teilweise durch Experimente im stationären Zustand validiert. Die vorliegende Arbeit präsentiert, nach bestem Wissen und Gewissen, die erste detaillierte experimentelle und numerische Untersuchung der instationären, thermodynamischen und fluidmechanischen Transportphänomene, welche beim Aufprall und der Erstarrung von Tropfen auf gekrümmten Oberflächen auftreten. Experimentelle Visualisierungen und numerische Simulationen von Phänomenen welche Bruchteile von Millisekunden dauern und in stark deformierenden, flüssigen Strukturen von der Grössenordnung eines Bruchteils eines Millimeters stattfinden, werden präsentiert und diskutiert. Das numerische Model basiert dabei auf den „Navier-Stokes“-Gleichungen und der damit gekoppelten Energiegleichung für den Wärmeaustausch. Zusätzlich sind Erstarrung, „slip“ an der Kontaktlinie sowie thermischer Kontaktwiderstand modelliert. Als Annahmen werden Inkompressibilität des flüssigen Materials sowie konstante thermophysikalische Eigenschaften aller involvierter

Materiale vorausgesetzt. Die vorherrschenden physikalischen Mechanismen des „Pile Up“-Prozesses, welche simultan auftreten, werden sowohl experimentell als auch numerisch identifiziert und quantifiziert. Diese sind die Fluidmechanik (kontrolliert durch den Anfangsimpuls sowie die freie, deformierende Oberfläche des auftreffenden Tropfens), Benetzungseffekte, Erstarrung (kontrolliert durch die Anfangstemperaturen des Tropfens und des Substrates), sowie thermischer Kontaktwiderstand an den Grenzflächen. Die prädiktiven Möglichkeiten des zeitgemässen „Finite Elemente Model“ werden quantifiziert und diskutiert. Letzteres basiert auf einer Lagrange-Formulierung der beschreibenden partiellen Differentialgleichungen und bezieht die Erzeugung von unstrukturierten Berechnungsgittern in einem stark deformierenden Simulationsbereich mit ein. Desweiteren wird der Parameterbereich, in welchem das numerische Model zuverlässige Resultate liefert, in Form von relevanten dimensionslosen Kennzahlen identifiziert. Diese sind die Reynolds- und die Weber-Zahl für die Fluidmechanik, die Stefan- und die Biot-Zahlen für den Wärmeaustausch und die Erstarrung. Die Parameterbereiche der dimensionslosen Kennzahlen sind dabei: $Re = 281 - 453$, $We = 2.39 - 599$, $Ste = 0.187 - 0.895$. Dies entspricht Aufprallgeschwindigkeiten von $1.12 - 1.74$ [m/s] bei Tropfendurchmessern von ≈ 78 [μm]. Die Anfangstemperaturen des Substrates liegen im Bereich von $25 - 150$ [$^{\circ}\text{C}$]. Die Anfangstemperatur für die aufprallenden Tropfen beträgt konstant 210 [$^{\circ}\text{C}$]. Die Resultate dieser Dissertation liefern wesentliche neue Beiträge zum Verständnis der Aufprall- und Erstarrungsmechanik von Tropfen auf Substraten („Pile Up“) und damit eine erweiterte Grundlage für zukünftige Entwicklungen in diesem Anwendungsbereich.