



Doctoral Thesis

## Processing of aluminum alloys in the semi-solid state basic principles and constitutive models

**Author(s):**

Wahlen, Arne

**Publication Date:**

2001

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004174928> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH Nr. 14166

# Processing of Aluminum Alloys in the Semi-Solid State

Basic Principles and Constitutive Models

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of

Doctor of Technical Sciences

presented by

Arne Wahlen  
Dipl. Ing. ETH  
born on 14th June 1972  
citizen of Rubigen (BE)

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. J. Reissner, examiner  
Prof. Dr. P. J. Uggowitzer, co-examiner

2001

*"Don't fear failure so much that you refuse to try new things. The saddest summary of life contains three descriptions: could have, might have, and should have."*

Louis E. Boone

## Summary

Thixoforming, an innovative technique in which metals are formed in their semi-solid state, permits the cost-efficient production of components with improved properties and performance compared to conventional pressure die casting. First developed in the USA based on a discovery made in the early 1970s at the Massachusetts Institute of Technology, thixoforming is now practised on a worldwide scale. Since this process is still relatively new, great technical advances can be expected in the near future. These advances should allow production of near-net-shape components with good mechanical properties, combined with low manufacturing cost. Due to the distinct thixotropic flow pattern of the semi-solid slurry, high production speeds similar to those of conventional pressure die casting can be achieved, yet the disadvantages of the latter are eliminated: thixoformed components possess a good combination of strength and ductility, and they are heat-treatable and weldable.

Thixotropy is a property of some materials of becoming fluid when stirred or sheared, and setting solid again when left standing. The requirement for thixotropic flow behavior is a particular microstructure in the semi-solid state. At the onset of forming, the solid phase of the material must exhibit a globular morphology, a feature that can be produced with rigorous stirring during solidification. The first part of the thesis deals with the production of such stir-cast feedstock material using a prototype caster with a mechanical stirring device. Cast billets of AlSi7 and resulting microstructures show the feasibility of the chosen process variant, and a mass and heat transfer model facilitates the optimal settings of the process parameters during the casting runs.

In the second part of the thesis, the governing constitutive models for the distinct flow behavior of thixotropic aluminum alloys in the semi-solid state are derived with respect to temperature, strain rate and microstructure. Experimental techniques such as deformation tests, backward extrusion experiments, differential thermal analysis and quantitative metallurgy provide the necessary data to calibrate the materials models. For the implementation in a special-purpose FE software package, constitutive models for the thixotropic flow stress, the specific heat capacity and the thermal conductivity of cast and wrought aluminum alloys in the semi-solid state are provided.

The objective of the third part of this thesis is to implement these models in the FE software package *ThixoForm* for the optimization of the thixoforming manufacturing process. The constitutive flow model as well as the knowledge of related characteristic materials properties such as the agglomeration ratio of the solid phase in the semi-solid metal, the amount of fraction liquid and other thermal variables enable the materials scientist to optimize the thixoforming process significantly. The simulation results are compared with industrial experiments and used for process control with the objectives

of high-quality parts and maximum productivity. They prove that the software package *ThixoForm* has promise as a tool in the thixoforming industry.

Because of insufficient fundamental knowledge, the focused research on specific topics and the lack of process control stability of this complex forming process, there exists a demand for a holistic research approach. The aim of this thesis is to fill this gap: it should be become possible to control the whole thixoforming process chain with models and simulations in order to *virtually* process thixoformed components from the stir-cast billet to the formed component.

# Zusammenfassung

Thixoforming ist ein Formgebungsverfahren, bei dem metallische Werkstoffe im halbflüssigen Zustand umgeformt werden. Dieses innovative Verfahren hat in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen und besitzt ein grosses Potenzial für die kostengünstige Fertigung von endgeometrienahen Bauteilen mit äusserst ansprechenden mechanischen Eigenschaften. Basierend auf einer Entdeckung am Massachusetts Institute of Technology in den Siebziger Jahren, wurde zunächst in den USA die Entwicklung dieses Verfahrens vorangetrieben. Heutzutage hat Thixoforming aber eine weltweite Verbreitung erlangt: verschiedene Hersteller bieten bereits thixogeformte Bauteile als Bestandteil ihrer Produktpalette an. Da dieser Umformprozess noch relativ jung ist, sind in naher Zukunft noch grosse technische Fortschritte zu erwarten.

Das thixotrope Fliessverhalten des halbflüssigen Metalls ermöglicht hohe Fertigungsgeschwindigkeiten wie beim Druckgussverfahren, die produzierten Teile verfügen aber nicht über die bekannten Nachteile von gegossenen Bauteilen: Thixogeformte Bauteile sind gekennzeichnet durch eine gute Kombination von Festigkeit und Zähigkeit, sie können wärmebehandelt werden, sind schweisssbar und darüber hinaus relativ kostengünstig.

Unter dem Begriff Thixotropie versteht man die Eigenschaft von manchen Materialien, bei Einwirken einer Scherkraft dünnflüssig zu werden. Hört die Beanspruchung jedoch wieder auf, wird der Werkstoff wieder fest. Voraussetzung für dieses thixotrope Fliessverhalten ist das Vorhandensein einer festen und einer flüssigen Phase, wobei die feste Phase eine globulitische Morphologie aufweisen muss. Diese globulitische Gefügestruktur kann durch Rühren während des Erstarrungsprozesses erreicht werden. Der erste Teil dieser Arbeit behandelt die Herstellung von solchem sog. Vormaterial in Form von Gussbolzen, welche eine globulitische Mikrostruktur besitzen. Mit einer am Institut entwickelten Giessanlage, welche über eine mechanische Rührereinheit verfügt, wurden Bolzen aus der Aluminium-Gusslegierung AlSi7 stranggegossen. Die resultierenden Gefüge bestätigen die Machbarkeit der Vormaterialherstellung mit dem gewählten Verfahren. Ebenfalls wird im ersten Teil ein Modell hergeleitet, welches den Stoff- und Wärmehaushalt der Giessanlage beschreibt und die optimale Einstellung der Prozessparameter während des Giessvorganges erleichtert.

Für das eigentliche thixotrope Umformen im halbflüssigen Zustand werden im zweiten Teil der Arbeit die für eine Beschreibung des Fliessverhaltens notwendigen Werkstoffmodelle entwickelt, unter Berücksichtigung der Einflüsse von Temperatur, Umformgeschwindigkeit und Gefügestand. Experimentelle Untersuchungen wie Stauchversuche am Umformdilatometer, Rückwärts-Fliesspressversuche, Differential-Thermoanalysen und quantitative Metallographie liefern die notwendigen Messdaten und Informationen für die Kalibrierung dieser Werkstoffmodelle. Für eine nachträgliche Implementierung in ein

Finite-Element-Softwarepaket werden Modelle bereitgestellt, welche sowohl die Fließspannung im halbflüssigen Zustand, als auch thermische Eigenschaften wie die spezifische Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit von verschiedenen Guss- und Knetlegierungen aus Aluminium beschreiben.

Der dritte Teil der Arbeit beschreibt die Implementierung dieser Werkstoffmodelle in das FE-Softwarepaket *ThixoForm*, mit dem Ziel vor Augen, beliebige Thixoforming-Prozesse simulieren zu können. Die Simulationsergebnisse werden mit experimentellen Versuchen im Industriemasstab verglichen, um die Übereinstimmung zu überprüfen. Die Simulation dient als Prozesskontrolle, um mit maximaler Produktivität hochwertige Produkte herzustellen. Die Simulationsergebnisse zeigen auf, dass das Softwarepaket *ThixoForm* als nützliches Werkzeug in der Thixoforming-Industrie eingesetzt werden kann.

Wegen dem immer noch lückenhaften Basiswissen und der häufig allzu fokussierten Ausrichtung der Forschung auf ein gewisses Spezialgebiet besteht dringender Bedarf an einer ganzheitlichen Betrachtungsweise dieser Thematik. Das Ziel dieser Arbeit ist es, diese Lücke zu schliessen: Es soll mit Hilfe der vorgestellten Werkstoffmodelle und Grundprinzipien in Zukunft möglich sein, die *gesamte* Thixoforming-Prozesskette zu beherrschen dank einer virtuellen Betrachtungsweise der Herstellung thixogeformter Bauteile, beginnend mit der Modellierung der Vormaterialherstellung bis hin zur Simulation der Bauteilherstellung.