

Modellierung der Mikrostruktur von Aluminium-Legierungen

Modelling the Microstructure of an Aluminium Alloy

Romain Bureau

Zu verstehen, welche Mechanismen hinter der Formgebung von metallischen Legierungen stecken, ist ein wichtiges Anliegen der Industrie. Dabei spielen vor allem Kaltverformung und Rekristallisation, die sowohl Produktionsprozess als auch Materialeigenschaften wesentlich beeinflussen, eine zentrale Rolle.

Aluminium und seine Legierungen sind heute nach Stahl die am zweitmeisten verwendeten Metalle. Vom Transport bis zur Verpackung, in Bauteilen und Fassaden, als dekoratives Element, in der chemischen Industrie oder am Bau – Aluminium ist ein zentraler Bestandteil vieler Anwendungen. Ein Vorteil ist vor allem sein geringes Gewicht bei hoher Stabilität – ein wichtiger Faktor vor allem in der Flug- und Fahrzeugindustrie.

Allzwecklegierungen, die auf dem Al-Mg-Si-System basieren wie 6082, sind für gewöhnlich als Blech oder extrudiertes Produkt zu finden. Sie werden in einer Folge von thermomechanischen Produktionsschritten hergestellt und exakt nach den gewünschten Produktmerkmalen designt.

Obwohl das Design technologischer Legierungen immer noch experimentell ist, können numerische mikroskopische Modelle viele Erkenntnisse über die Beziehung von Mikrostruktur und makrostrukturellen Eigenschaften liefern. Auf diese Werkzeuge sind Industrie und Forschung immer stärker angewiesen.

Kaltverformung

Während des Walzvorgangs verfestigt das Walzgut zunehmend. Der Walzdruck muss daher kontinuierlich erhöht werden, um das Material weiterzuverformen. Dieses physikalische Phänomen, auch Kaltverfestigung genannt, entsteht durch die Zunahme mikrostruktureller Defekte im Material, die während der plastischen (= bleibenden; im Gegensatz zur elastischen) Verformung auftreten. Berücksichtigt man nun die >

Understanding and modelling the mechanisms involved in shaping metallic alloys has become a major concern of manufacturers. Amongst those mechanisms, strain hardening and recrystallization play a critical role, as they impact the production process as well as the material properties.

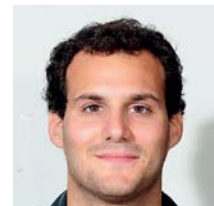
Nowadays, aluminium and its alloys rank second in consumption volumes among metallic materials, surpassed only by steel. From packaging to transportation, in structural parts and facades or for decorative purposes, in the chemical industry, in construction, aluminium has become a key component in all kinds of applications. Especially, its low strength-to-weight ratio has been the primary factor for the development of the aeronautic and automotive industries.

General purpose alloys such as the 6082, based on the Al-Mg-Si system, are commonly found as sheets and extruded products, and are manufactured by a succession of thermo-mechanical steps designed to achieve the desired product characteristics.

Even though the design of technological alloys still relies heavily on experimentation, numerical microscopic models can provide a great deal of insight on the relationship between microstructure and macroscopic properties. For that reason, they are a tool on which industries and research departments rely more and more.

Strain hardening

During the rolling process, the mechanical strength of the material increases. It is then necessary to continuously raise the roll pressure in order to further deform the material. This physical phenomenon, known as strain-hardening, is a result of the rapid increase of microstructural defects in the material during plastic (permanent, in opposition to elastic) deformation. Taking >



Romain Bureau ist Doktoratsstudent am Institut für Werkstoffkunde, Fügetechnik und Umformtechnik. Das vorgestellte Projekt ist seine Abschlussarbeit.

Romain Bureau is PhD student at the Institute of Materials Science and Welding and carried out the project as his thesis.

Abbildung 1:
Fließspannung (links) und Versetzungsdichte (rechts).
Evolution während der Verformung mit einer Dehnungsgeschwindigkeit von 1 s^{-1} und bei verschiedenen Temperaturen. Die Marker sind experimentelle Daten, die kontinuierlichen Linien die Resultate der Modellierung.
Figure 1:
Flow stress (left) and dislocation density (right) evolution during deformation at a strain rate of 1 s^{-1} and various temperatures. The markers are experimental data, and the continuous lines are the model results.

Mechanismen, bei denen kristalline Linienfehler – sogenannte Versetzungen – sich multiplizieren und auslöschen, dann ist es möglich, Stoffmodelle zu designen, die die Änderung der Fließspannung – also die Kaltverfestigung – eines Materials mit seinem mikroskopischen Zustand in Verbindung setzen.

into account the mechanisms by which crystalline line defects – called dislocations – multiply and annihilate, it is possible to design constitutive models able to relate the evolution of the flow stress of a material, i.e. the strain hardening, to its microscopic state.

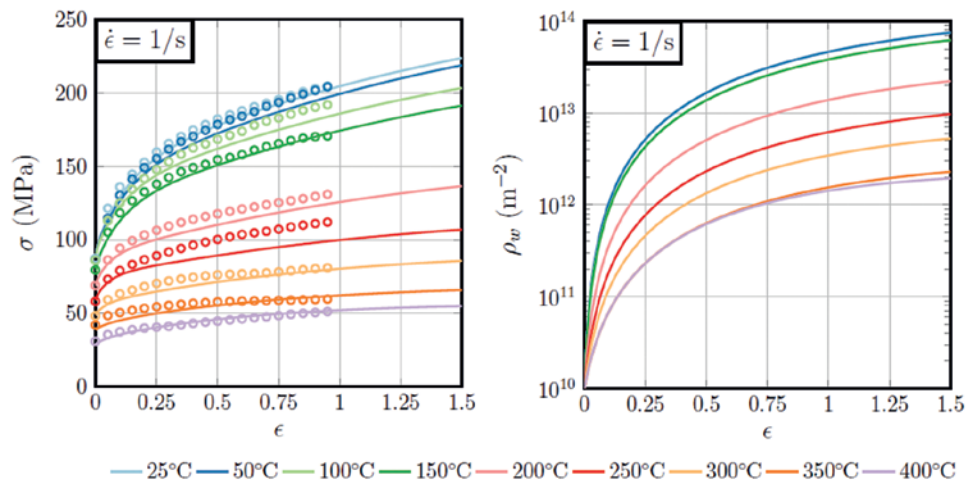


Abbildung 2:
Teilweise rekristallisierte Mikrostruktur nach Plain-strain-Verformung bei Raumtemperatur und Glühung bei 300 °C für 20 Minuten. Die Region mit hohem Verformungsgrad rekristallisiert als Erstes.
Figure 2:
Partially recrystallized microstructure after plain strain compression at room temperature and annealing at 300 °C for 20 minutes. The region of high strain recrystallizes first.

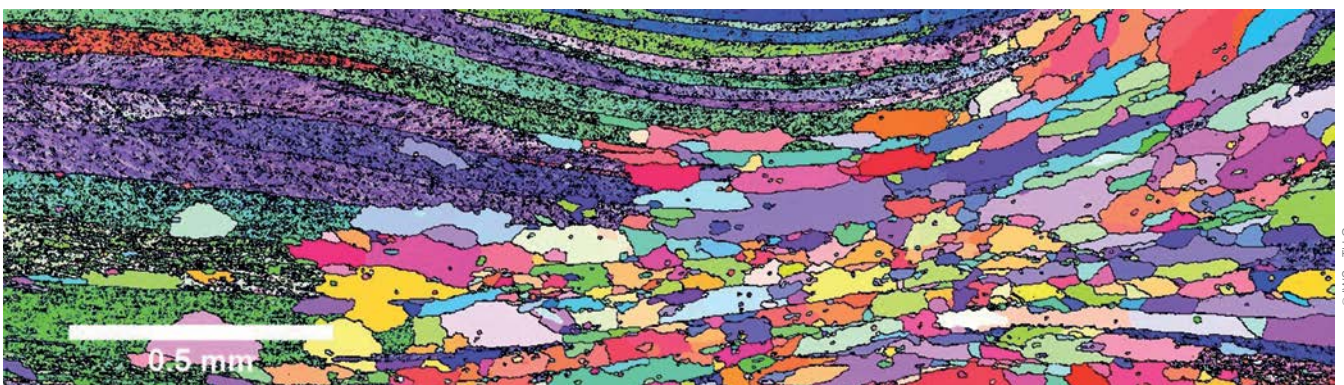
Rekristallisation

Die akkumulierten Defekte in der Mikrostruktur – Versetzungen und Grenzflächen – erhöhen die im Material gespeicherte Energie. Beim Aufheizen werden von Diffusion kontrollierte Mechanismen initiiert, die zur Erholung der kristallinen Struktur und einer Energieabnahme führen. Ist die Glüh-temperatur hoch genug, können neue, defektlose Kristalle in hochverformten Regionen nukleieren und in die deformierte Matrix hineinwachsen – dieses Phänomen wird Rekristallisation genannt. Die Korngröße der neu entstandenen Kristalle hängt vom vorangegangenen Deformationslevel ab.

Recrystallization

The defects accumulated in the microstructure under the form of dislocations and interfaces raise the energy stored within the material. Upon annealing, diffusion-controlled mechanisms are promoted. They allow the crystalline structure to recover and lower its energy by getting rid of the defects. Additionally, when the annealing temperature is high enough, new defect-free crystals can nucleate in the regions of high energy and grow into the deformed matrix – this phenomenon is called recrystallization. The radius of the fully grown crystalline grains depends on the level of deformation previously achieved, i.e. the amount of energy stored in the material, the annealing temperature and the eventual particles of second phase present in the microstructure.

Das heißt: von der im Material gespeicherten Energie, der Glüh-temperatur und von Ausscheidungen einer zweiten Phase, die in der Mikrostruktur vorhanden sind.



Der Einfluss der Erholung ist nicht zu unterschätzen und muss gewissenhaft in jedes Rekristallisationsmodell eingearbeitet werden. Ein solches Modell enthält für gewöhnlich eine Avrami-Gleichung, die, wenn sie mit einem maßgeschneiderten Keimbil-

The influence of recovery on recrystallization is not trivial. It needs to be thoroughly taken into account in any recrystallization model. The latter usually feature an Avrami-type equation, which, when combined with a tailored nucleation model, becomes

dungsmodell kombiniert ist, die Rekristallisationskinetik vorhersagen kann. Die Korngröße vorherzusagen zu können, ist eine wichtige Erkenntnis für jeden Hersteller. Sie hat direkte Auswirkungen auf die Materialeigenschaften – wie die Festigkeit, die Atomdiffusion oder die Rissausbreitung.

Mehrskalenmodellierung

Ein großes Anliegen der Industrie ist es, die Produktionsprozesse auf verschiedenen Größenskalen darzustellen. Klassischerweise ist ein Finite Element Model gut geeignet, um die makroskopische Skala abzudecken. Integriert man die konstruktiven und Rekristallisationsmodelle mikroskopischer Vorgänge, kann man die verschiedenen thermo-mechanischen Schritte im Produktionsprozess einer metallischen Platte verfolgen. Beispielsweise ist es möglich, den aus einem Deformationsprozess resultierenden Spannungszustand oder die resultierende Korngröße bei kontinuierlicher Glühung bei 550 °C zu berechnen.

Diese Projekt wurde in Kooperation mit der AMAG rolling GmbH, der TU Wien und dem Austrian Institute of Technology durchgeführt.

Finanzielle Unterstützung kam von der Österreichischen Bundesregierung (im Speziellen vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie und vom Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft), vertreten durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH sowie der Steirischen und der Tiroler Landesregierung, vertreten durch die Steirische Wirtschaftsförderungsgesellschaft mbH und die Standortagentur Tirol, innerhalb der COMET-Programme. ■

able to predict the recrystallization kinetics. Being able to forecast the grain structure is a critical matter for any manufacturer because it directly impacts several material properties, such as mechanical strength, solid state atomic diffusion, and crack propagation, etc.

Multiscale modelling

It has become a major concern of industries to model their production processes at multiple scales. The macroscopic scale is classically dealt with fairly well with a finite element model. By implementing the constitutive and recrystallization models in microscopic routines within the finite element framework, one can follow the various thermo-mechanical steps involved in the production of metallic plates.

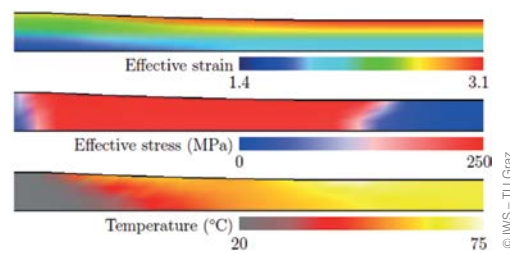


Abbildung 3:
2D-FE-Modell des Walzprozesses mit dem konstitutiven Modell.

Figure 3:
2D modelling of the rolling process with the constitutive model.

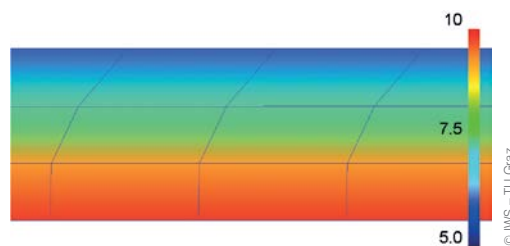


Abbildung 4:
Korngrößenverteilung in der Dicke der Platte nach einer Glühung bei 550 °C für 20 s (in µm).

Figure 4:
Grain size distribution in the thickness of the plate after annealing at 550°C during 20 s (in µm).

For instance, it is possible to calculate the stress involved in the deformation process, or predict the grain radius after continuous annealing at 550 °C. This project was made in collaboration with AMAG rolling GmbH, TU Wien and the Austrian Institute of Technology.

Financial support from the Austrian Federal Government (in particular from Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie and Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft) represented by Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH and the Styrian and the Tyrolean provincial government, represented by Steirische Wirtschaftsförderungsgesellschaft mbH and Standortagentur Tirol, within the framework of the COMET funding programme is gratefully acknowledged. ■