

# Thermomechanische Verfahren bei der Metallverarbeitung

## *Thermomechanical Treatments in Metalworking*

Cecilia Poletti

Das Schmieden von Metallen ist eine der ältesten Arbeitstechniken der Menschheit und etwa 6.000 Jahre alt. Die Technik wurde benutzt, um Waren zu produzieren, um Landwirtschaft, Wohnen, Medizin, Transport und jede Art von menschlichen Aktivitäten zu entwickeln. Hochleistungsmetalle und -legierungen werden auch bei hohen Temperaturen umgeformt, um komplexe Formen und hervorragende Eigenschaften zu erzielen.

Ein großer Teil unserer alltäglichen Produkte wird aus Metallen und Legierungen hergestellt. Von Schneidwerkzeugen bis hin zu Satelliten wurden Metalle und Legierungen entwickelt, um die technologische Entwicklung zu unterstützen. Daraus hat sich eine gesamte Produktionskette, angefangen bei der Erzgewinnung bis hin zur Weiterverarbeitung, entwickelt. Die Herstellung von Schwertern ist ein typisches Beispiel für thermomechanische Behandlungen. Obwohl das Schmieden von Metallen in unserem Allgemeinwissen integriert ist, ist die Notwendigkeit dieses Prozesses nicht jedem bewusst. Warum schmelzen wir nicht einfach ein Metall und gießen es in die Form eines beliebigen Produkts?

Thermomechanische Prozesse wie das Schmieden ermöglichen eine Erwärmung und eine plastische Verformung des Materials, um zwei gewünschte Ziele zu erreichen: Dem Werkstück wird eine gewünschte Form gegeben und das Gefüge des Materials wird dadurch modifiziert. Aber warum soll das Gefüge überhaupt verändert werden? Kann man die Mikrostruktur designen?

### **Mikrostrukturänderungen**

Metalle und Legierungen sind heterogene Materialien im Mikro- und Nanometerbereich – wesentliche Veränderungen sind für unser Auge daher auch nicht sichtbar. Die Mikrostruktur von Metallen und Legierungen wird in der Regel als eine Anordnung von Defekten in einem perfekten >

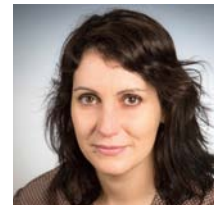
*The forging of metals is one of the oldest working techniques of mankind and about 6,000 years old. It has been used to produce goods to develop agriculture, housing, medicine, transport and any kind of human activity. Advanced metals and alloys are also formed at elevated temperatures to achieve a unique combination of complex shapes and excellent properties.*

*Many of our day-to-day products are made of metals and alloys. From cutting tools to satellites, metals and alloys have been developed to support technological evolution. The whole production chain from extraction of ores up to finishing has evolved accordingly. In this sense, the production of swords is a typical example of a thermomechanical treatment. Although the forging of metals is somehow incorporated in our general knowledge, not everyone is aware of the intricacies of this process. Why don't we just melt a metal and pour it into a mold with the shape of any desired product?*

*During thermomechanical processing, such as forging, the work-piece is heated and plastically deformed to achieve two main objectives: to obtain a desired shape and to modify the material at the microstructural scale. Although the first objective seems to be more or less obvious, what is the meaning and importance of microstructural changes? Can we design the microstructure?*

### **Microstructural modifications**

*Metals and alloys are heterogeneous materials at the micro and nano scales – essential modifications are imperceptible to the eyes. Their microstructure is usually described as an arrangement of defects in a perfect crystal: punctual defects such as voids and linear defects such as dislocations and stacking faults. Dislocations are further arranged into 3D structures called subgrain and grain boundaries to delimit crystallographic homogeneous areas such as subgrains and grains, respectively. In some alloys, such as titanium alloys and steels, allotropic >*



Cecilia Poletti, in Argentinien geboren, studierte Verfahrenstechnik an der Universidad Nacional del Comahue in Neuquén. Seit 2011 ist sie am Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik tätig, 2012 Habilitation im Fach Werkstoffkunde, seit Juni 2014 Assoc. Professorin. Poletti beschäftigt sich mit Forschungsthemen im Bereich thermomechanischer Prozesse von metallischen Werkstoffen.

*Cecilia Poletti, born in Argentina, studied chemical engineering at the Universidad Nacional del Comahue in Neuquén. Since 2011 she has worked at the Institute of Materials Science and Welding, and did her habilitation in materials science in 2012. Since June 2014 Associate Professor Poletti has conducted research in the field of thermomechanical processing of metallic materials.*

Kristall beschrieben. Die Defekte können nulldimensionaler (Leerstellen) und zweidimensionaler (Versetzungen und Stapelfehler) Art sein. Versetzungen werden weiteres in 3-D-Strukturen, Subkorn- und Korngrenzen eingeteilt, um kristallografisch homogene Bereiche wie Subkörner bzw. Körner abzugrenzen. Titanlegierung und Stahl ermöglichen durch allotrope Umwandlungen die Kombination vieler metallischer Phasen. In den meisten Legierungen können sich intermetallische und harte keramische Partikel während der Erstarrung oder Wärmebehandlung abscheiden.

transformations allow the combination of many metallic phases. And in most alloys, intermetallic and ceramic hard particles precipitate during solidification or heat treatments.

Plastic deformation and thermally activated phenomena occurring during thermomechanical processes are responsible for the modification of the microstructure of alloys, as illustrated in Figure 1. A general raising of the dislocation density hardens the material by plastically deforming it. When processing metals at high temperatures, the mi-

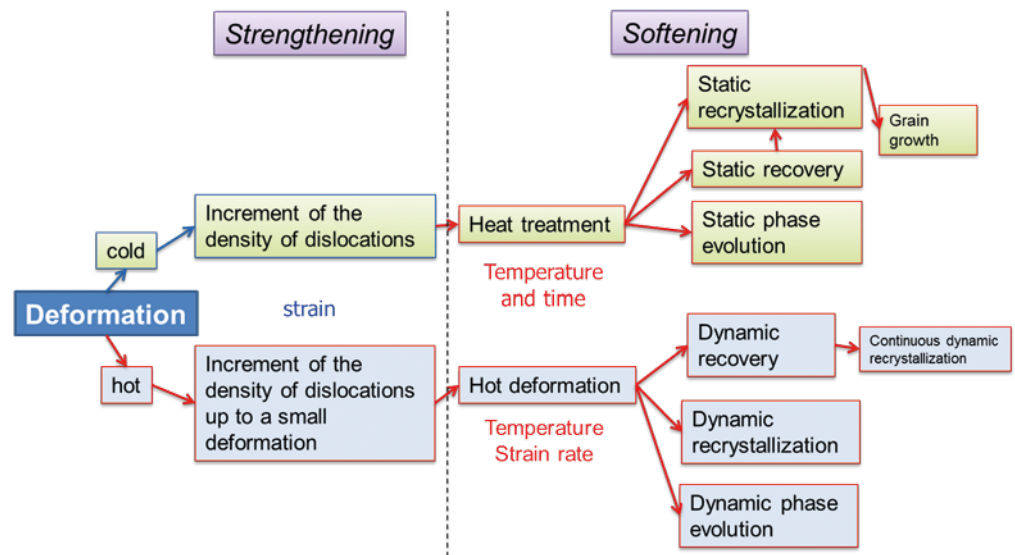


Abbildung 1:  
Gefügeänderungen während thermomechanischer Verfahren.  
Figure 1:  
Microstructural evolution during thermomechanical processing.

Plastische Verformung und thermisch aktivierte Phänomene, die während thermomechanischer Prozesse stattfinden, verändern das Gefüge von Legierungen (Abbildung 1). Eine allgemeine Erhöhung der Versetzungsdichte wird mittels der plastischen Verformung das Material aushärten. Das Materialgefüge modifiziert sich durch erhöhte Temperaturen: Das Material erholt sich oder rekristallisiert. Statische und postdynamische mikrostrukturelle Veränderungen treten

crostructure is modified by recrystallization and recovery phenomena as a function of time or deformation. Static and post-dynamic microstructural changes occur frequently after hot deformation. After recrystallization, grains grow by capillarity. Precipitates further influence the plastic deformation of metallic materials. While small precipitates hinder the movement of dislocations and boundaries, larger ones can act as nucleation sites for recrystallization. The first ones are

Abbildung 2:  
Gefüge und Materialeigenschaften.  
Figure 2:  
Microstructure and materials properties.

Requirement	Mechanism	Microstructure
<b>Mechanical resistance (strength)</b>	Grain refinement Strain hardening Precipitation hardening Martensitic hardening	Fine grains High dislocation density Fine precipitates within grains Martensitic structure
<b>Creep resistance</b>	Avoid grain boundary diffusion Avoid grain/subgrain boundary movement	Large grains (mono-crystal) Boundaries pinned by precipitates
<b>Fatigue resistance</b>	Crack propagation reduction	Intricate microstructure
<b>Electrical conductivity</b>	Reduction of microstructural defects	Low dislocation density, low amount of precipitates

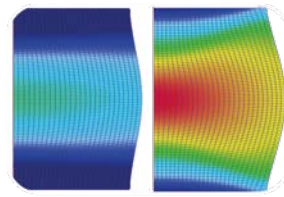
häufig nach der Warmverformung auf. Nach der Rekristallisation vergrößern sich die Körner durch Kapillarwirkung. Weiters beeinflussen die harten Partikel die plastische Verformung von Metallen: Die kleinen Partikel verhindern die Bewegung von Versetzungen und Korngrenzen, die größeren dienen als Keime zur Rekristallisation. Erstere werden verwendet, um das Material zu verfestigen, die großen Ausscheidungen dienen wiederum der Modifizierung der kristallografischen Textur.

All diese Mikrostrukturänderungen können durch einen angemessenen thermomechanischen Prozess gesteuert werden, um erwünschte Eigenschaften zu erzeugen. Manche der beschriebenen Änderungen finden nur statt, wenn das Metall unter plastischer Verformung und Temperatur behandelt wird. Einige Beispiele davon sind in der Tabelle dargestellt (vgl. Abbildung 2).

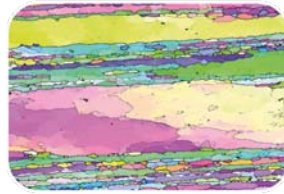
### Entwicklung und Optimierung thermomechanischer Prozesse

Massivumformprozesse wie Extrusion, Warmwalzen und Schmieden werden verwendet, um das Gussgefüge zu modifizieren. Weiterverarbeitungen sowie Gesenkschmieden, Tiefziehen und Proflextrusion ändern die Mikrostruktur und die Form des fertigen Teiles. Während der Umformprozesse verteilen sich Temperatur und Verformungen im Werkstück nicht homogen. Somit werden heterogene Gefüge und Schädigungen durch triaxiale und heterogene Belastungen erzeugt.

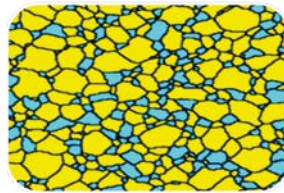
In der letzten Dekade wurden Hypothesen und Theorien sowie neue Charakterisierungsmethoden entwickelt, um thermomechanische Prozesse physikalisch im Detail zu beschreiben. Ziel ist es, Hochleistungslegierungen herzustellen und die Entwicklung von deren Mikrostruktur und Schädigung während der Materialbearbeitung zu interpretieren und vorherzusagen. Dies soll durch die Kombination von kontrollierten Experimenten mit schnellen physikalisch basierten Multiskalenmodellen erfolgen (vgl. Abbildung 3). ■



- Physical simulation at laboratory scale
- FE Numerical simulation



- Microscopy
- Mechanical testing
- Diffraction, DSC, dilatometry



- Materials modelling
- Multiscale modelling

© Cecilia Poletti

used to strengthen the material, and the large ones to modify the crystallographic texture.

All the microstructural changes described above can be controlled in an appropriate thermomechanical process to achieve the desired properties in the final product. Many of these modifications can be achieved only if the metal is subjected to both plastic deformation and temperature. Some examples of microstructure requirements are shown in Figure 2.

### Development and optimization of thermomechanical processes

Bulk metal forming operations such as extrusion, hot rolling and forging are widely used to transform the cast microstructure. Further processing, such as close-die forging, deep drawing and profile extrusion, also modifies the microstructure and, more importantly, the shape of the final part. During forming processes, temperature, strain and strain rate are not homogeneous within the workpiece. Thus, heterogeneous microstructures and damage due to triaxial and heterogeneous loads are generated.

Many scientists and engineers all around the world have been conducting research to find hypotheses and theories as well as characterization methodologies to explain and describe the physical mechanisms involved in thermomechanical processing. The main goals are to design advanced products for high performance applications and to interpret and describe the evolution of their microstructure and damage during processing. The combination of controlled experimental data with fast physically-based multi-scale models is the key for a comprehensive understanding of the phenomena involved (see Figure 3). ■

**Abbildung 3:**  
**Strategie, um thermomechanische Verfahren zu entwickeln und zu optimieren.**

**Figure 3:**  
**Strategy to develop and optimize thermomechanical processing.**