

Diss. ETH No. 13210



Modeling and Control for the Isothermal Extrusion of Aluminum

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH
for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by
CARLOS FERNANDO CUÉLLAR MATAMOROS

Dipl. Chem.-Ing. ETH
born October 28, 1967
citizen of El Salvador

accepted on the recommendation of

Prof. M. Steiner, examiner
Prof. Dr. P. Hora, co-examiner
Dr. A. Schmid, co-examiner

1999

Abstract

As competitiveness in the metal and metal forming industry grows more and more, great efforts must be paid to achieve targets on product quality. Within the aluminum industries, extrusion plays an important role. In this process, it is of superior importance to achieve uniform product quality while minimizing the discard. The exit temperature of the extrudate profile is a measure of product quality. It is desired to run the process in such a manner, that this temperature remains constant throughout the whole extrusion cycle. This is known as isothermal extrusion. Developing model-based control strategies to achieve isothermal extrusion was the aim of this thesis.

Starting from industrial data, empirical in-house process knowledge shared by the industrial partner of this thesis, as well as from literature on metal-forming processes, a first-principles model of the aluminum extrusion process investigated was developed. The motivation for developing such a model was driven by the fact that other solution approaches, such as system identification methods, would have required disturbing the production through extensive experimenting on the plant. This was clearly undesirable and a strong constraint on the development of any type of model. In addition, a model based just on experimental data would have only been valid for the plant from which the data originated. This would have meant developing numerous models, one for each machine, so as to capture the dynamics of each particular system.

This detailed model was the starting point for developing control strategies for the isothermal extrusion of aluminum. As a consequence of the complexity and thoroughness of this first-principles model, an open-loop control strategy was chosen as a first solution to the problem. This choice had two motivations: on the one hand open-loop strategies were simpler to implement in the existing

distributed control system (DCS) at the plant. Additionally, this type of approach was more likely to be understood and accepted by the plant personnel. On the other hand, more sophisticated closed-loop strategies could be developed subsequently, exploiting the existing detailed model and the open-loop trajectories derived therefrom.

This led to the second part of this work where, starting from the understanding and knowledge gained through the more sophisticated first-principles model, a simplified model of the aluminum extrusion process was derived. This step was a natural consequence of the mathematical as well as computational requirements imposed by a closed-loop control strategy, which could hardly have been met based on the model derived in the first part of this thesis. The development of closed-loop control strategies is of advantage to exploit the valuable information provided by the measurement of the temperature of the extrudate. This allows to take into account process/model mismatches and disturbances (e.g. noise) entering the system, two factors neglected by any open-loop strategy. At the same time, constraints on the system had to be taken into account. This led to the choice of model predictive control (MPC). This methodology allows various types of constraints on the system to be considered directly during the design of the control strategy.

Relying on the measurements of the temperature of the extrudate for closed-loop control obviously means ensuring that this information is accurate. As the temperature sensors found in industrial practice are prone to partial failure, a monitoring algorithm was designed to detect faults on this sole source of information for the closed-loop controller. Here, statistical methods based on cumulative sum (CUSUM) algorithms were chosen. Once again the choice of this strategy was driven by the simplicity with which this algorithm may be implemented in industrial practice. In addition, the introduction of such a monitoring scheme could increase the acceptance of closed-loop controllers by the operators.

Zusammenfassung

Wettbewerbsfähigkeit in der Metallindustrie verlangt, dass die Prozesse möglichst effizient und produktiv laufen. Innerhalb der Aluminiumverarbeitungsindustrie spielt das Strangpressen eine zentrale Rolle. Hier ist es vor allem wichtig, dass man eine homogene Produktqualität gewährleistet, bei minimalem Ausschuss. Ein Mass für die Qualität des Produktes ist die Austrittstemperatur des gepressten Profils. Es ist erwünscht, den Prozess so zu betreiben, dass die Temperatur des gepressten Profils während des ganzen Presszyklus möglichst konstant bleibt. Dies nennt man isothermes Strangpressen von Aluminium. Die Entwicklung einer modellbasierten Regelstrategie für diesen Zweck ist das Ziel dieser Arbeit.

Im ersten Teil dieser Arbeit wird ein Modell des Prozesses entwickelt. Dafür sind experimentelle Methoden wenig geeignet, da diese umfangreiche Versuchskampagnen an der Anlage voraussetzen. Dies hätte zu unerwünschten Störungen oder gar Unterbrüchen des Produktionsbetriebs geführt. Zudem ist ein empirisches Modell lediglich für genau die Anlage gültig, auf welcher die Experimente durchgeführt werden. Dies bedeutet, dass die Herleitung eines Modells für jede Maschine wiederholt werden muss, um die Dynamik des jeweiligen Systems zu beschreiben. Somit kommt nur die Herleitung eines auf der Physik des Prozesses basierten Modells in Frage.

Dieses detaillierte physikalische Modell ist der Ausgangspunkt für die Entwicklung von Regelstrategien für das isotherme Strangpressen von Aluminium. Bedingt durch die Komplexität des physikalischen Modells werden zunächst Open-loop-Regelstrategien entworfen. Dieser Entscheid beruht auf drei Überlegungen: Erstens sind Open-loop-Regelstrategien einfacher in das vorhandene Leitsystem zu integrieren. Zweitens werden Open-loop-Regelstrategien vom Personal der Anlage rascher verstanden und akzeptiert. Drittens kann ein späterer Entwurf anspruchsvollerer Closed-loop-Regelstrategien auf

die Erfahrungen mit dem vorhandenen physikalischen Modell und die Open-loop-Strategien gestützt werden.

Im zweiten Teil der Arbeit werden der Entwurf und die Untersuchung von Closed-loop-Regelstrategien in Angriff genommen. Dafür wird ein vereinfachtes Modell des Prozesses hergeleitet. Dies wird durch die bei der Entwicklung des detaillierten physikalischen Modells gewonnenen Erfahrungen und Prozesskenntnisse ermöglicht. Die Herleitung eines vereinfachten Modells ist auch die logische Konsequenz der mathematischen bzw. rechentechnischen Ansprüche, die eine Closed-loop-Regelstrategie erfordert. In diesem Zusammenhang sind hauptsächlich die Anforderungen an die Rechenzeiten bei der Simulation des Prozesses mit dem komplexeren Modell nicht erfüllt. Eine Closed-loop-Regelstrategie ist dazu noch vorteilhaft, um die Messung der Temperatur des Profils ausnutzen zu können. Somit können eventuelle Modellfehler und Störungen (z.B. Rauschen), die das System beeinflussen, beim Entwurf der Regelstrategien in Betracht gezogen werden. Gleichzeitig müssen auch physikalische Begrenzungen des Systems betrachtet werden, was zur Wahl der Methode der Modell-prädiktiven Regelung führt. Verschiedene Begrenzungen des Systems können somit direkt beim Entwurf des Reglers berücksichtigt werden.

Um die Temperaturmessung des Profils ausnutzen zu können, muss man ihre Genauigkeit gewährleisten. Da die Temperatursensoren, die in der Regel beim Strangpressen eingesetzt werden, dazu neigen, Fehler zu entwickeln (z.B. Drifts, Bias), ist es nötig, diese Sensoren zu überwachen. Dafür wird im dritten Teil der Arbeit ein statistischer Algorithmus eingesetzt, um Fehler bei der Messung der Temperatur zu detektieren. Dieser Algorithmus wird aufgrund seiner Einfachheit hinsichtlich Implementierung in einer industriellen Umgebung gewählt.

Resumen

A medida que la competitividad en la industria metalúrgica aumenta, mayor énfasis y esfuerzo se deben poner para poder garantizar y cumplir con las normas de calidad establecidas. En la industria del aluminio el proceso de extrusión juega un papel central. En este proceso es imprescindible garantizar una calidad homogénea de los productos, manteniendo siempre al mínimo los desperdicios de material. La temperatura del perfil de extrusión es una medida importante de la calidad del producto. Es necesario que el proceso corra de tal manera que esta temperatura permanezca constante durante todo el ciclo de extrusión. Esto se conoce como *extrusión isotérmica*. El fin de esta tesis es el desarrollo de estrategias de control basadas en un modelo del proceso que garanticen una extrusión isotérmica de aluminio.

En la primera parte de la tesis se desarrolla un modelo fundamentado en la física del proceso de extrusión de aluminio. Este modelo está basado en conocimientos empíricos sobre el proceso proporcionados por la empresa conjunto a la cual se llevo a cabo el proyecto, así como también en la literatura referente a procesos metalúrgicos. El desarrollo de un modelo experimental, basado quizás en métodos como la identificación de sistemas, no fue posible ya que ésto hubiera significado perturbar la producción con extensas campañas experimentales en la planta. Esto último era claramente inaceptable y representa una gran limitante al desarrollar cualquier tipo de modelo del proceso, sea éste un modelo experimental o un modelo basado en la física del proceso. Por otra parte, un modelo empírico del proceso basado solamente en datos experimentales hubiera sido válido sólo para la máquina de la cual se originaban los datos. Esto hubiera implicado desarrollar un modelo para cada una de las máquinas presentes en la planta que reflejase la dinámica particular de cada sistema.

El modelo detallado, fundamentado en la física del proceso, forma

la base para el diseño de estrategias de control para la extrusión isotérmica de aluminio. Debido a la complejidad del modelo detallado, una estrategia de control de lazo abierto fue seleccionada como primera solución a este problema. Otros aspectos de tipo práctico tales como la facilidad de implementación de las estrategias de control de lazo abierto en el sistema de control distribuido presente en la planta, así como también la aceptación de este tipo de estrategias por el personal técnico, fueron determinantes para inclinarse por esta decisión.

En la segunda parte de la tesis se deriva un modelo simplificado del proceso para poder desarrollar estrategias de control de lazo cerrado. Esto fue posible gracias a los conocimientos del proceso obtenidos al desarrollar el modelo detallado en la primera parte. El desarrollo de un modelo simplificado es también una consecuencia lógica de los requerimientos computacionales que una estrategia de control de lazo cerrado suponen, los cuales no hubieran podido ser cumplidos con el modelo desarrollado en la primera parte. El control de lazo cerrado es ventajoso para poder explotar la información proporcionada por el sensor de temperatura del perfil de extrusión. Esto último permite tomar en cuenta factores como incongruencias entre el modelo y la planta, así como también perturbaciones que entran en el sistema (e.g. ruido). Por otra parte, en el proceso de diseño de un controlador es imperativo tomar en cuenta los límites físicos del sistema. Para este fin se utilizó el método de modelo de control predictivo.

Para hacer uso de la medición de la temperatura del perfil es necesario garantizar su exactitud. Puesto que los sensores de temperatura que se utilizan en este tipo de procesos tienden a desarrollar bias y otros tipos de errores, se utilizó un algoritmo para la detección de fallas en los sensores. Este algoritmo está basado en métodos estadísticos y adicionalmente ofrece la ventaja de una fácil implementación en condiciones industriales.