Design of an Integrated Process Chain to Support the Manufacturing of Ti6Al4V Components

Von der Fakultät für Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.- Ing.)

genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Master of Science

Algebra Veronica Vargas Aparicio

geboren am 05.02.1978
in Mexiko Stadt, Mexiko

Vorsitzender:	**Prof. Dr.-Ing. Arnold Kühhorn**
Gutachter:	**Prof. Dr.-Ing. Ulrich Berger**
Gutachter:	**Prof. Hans N. Hansen** **Technical University of Denmark,** **Department of Mechanical Engineering**
Tag der mündlichen Prüfung:	**08.07.2010**

Berichte aus dem Lehrstuhl Automatisierungstechnik
BTU Cottbus
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Berger

Algebra Veronica Vargas Aparicio

Design of an Integrated Process Chain to Support the Manufacturing of Ti6Al4V Components

Shaker Verlag
Aachen 2010

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at http://dnb.d-nb.de.

Zugl.: Cottbus, BTU, Diss., 2010

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9675-9
ISSN 1864-5789

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen
Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9
Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Die Automatisierungstechnik bildet eine Schlüsseltechnologie für die Steigerung der Produktinnovation und die Verbesserung von Wertschöpfungsprozessen. Als Konsequenz einer globalen Wirtschaftsstruktur müssen alle Unternehmensbereiche wie Entwicklung, Produktion und Güterverkehr in einen übergreifenden Kontext gestellt und behandelt werden. Dabei steht die informationstechnische Verknüpfung verbundener Unternehmen und Unternehmensbereiche bei stetig veränderlichen Aufgabenstellungen und Randbedingungen eine besondere Herausforderung dar. Die Automatisierung des betrieblichen und betriebsübergreifenden Informationsflusses sowie die Einbindung des Menschen in allen Phasen des Entwicklungs- und Leistungsprozesses bildet daher die vordringliche Aufgabenstellung für Forschung und Entwicklung. Durch den zielgerichteten, systematischen Einsatz und die ständig aktualisierte Beurteilung und Bewertung automatisierungstechnischer Lösungen wird die schnelle Umsetzung und Einführung hochwertiger und zukunftsweisender Innovationen gesichert.

Ziel der Forschungsarbeiten am Lehrstuhl Automatisierungstechnik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus (BTU) ist die kontinuierliche Verbesserung der automatisierungstechnischen Methoden und Verfahren im Hinblick auf fortgeschrittene Produktionsstrukturen. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Entwicklung integrierter Fertigungs- und Montagesysteme unter Einsatz neuartiger Steuerungstechnik. Dazu werden leistungsfähige Entwurfswerkzeuge der *Digitalen Fabrik* erprobt und weiterentwickelt. Durch die Bereitstellung modernster Laborausstattung und die Zusammenarbeit mit industriellen und institutionellen Technologieführern wird der Stand der Technik in Wissenschaft und Forschung aktualisiert abgebildet. Nationale und internationale Forschungsarbeiten zu ganzheitlichen Automatisierungskonzepten, den *Industrial Life Cycle Automation*, runden das Aufgaben- und Leistungsspektrum des Lehrstuhls ab.

Die in dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen aus den Forschungsarbeiten des Lehrstuhls Automatisierungstechnik der BTU Cottbus. In diesen Bänden werden neue Resultate und Erkenntnisse aus Forschung und Entwicklung veröffentlicht. Die Berichte aus dem Lehrstuhl Automatisierungstechnik sollen Forsch8ung, Entwicklung und Anwendung zu automatisierungstechnischen Fragestellungen enger verknüpfen und daraus Potential für zukünftige Innovationen erzeugen.

Ulrich Berger

Kurzfassung

Komplexe Mehrwerterzeugnisse, die aus Materialien mit attraktiven Eigenschaften, wie hohe Festigkeit, niedrige Dichte und eine gute Korrosionsbeständigkeit gefertigt werden, sind für die effektive Herstellung innovativer Produkte von besonderer Bedeutung. Dazu wurden in letzter Zeit vornehmlich in der Fahrzeugindustrie Titanlegierungen eingeführt, um leichtere und umweltfreundliche Fahrzeuge produzieren zu können. In der Flugzeugindustrie werden beispielsweise für die Herstellung von Triebwerken Vierzig Prozent Titanlegierungen verwendet. Gegenwärtig ist das Design des Flugzeugtriebwerkes so ausgereift, dass sich die Hersteller auf die Produktivitätssteigerung und die Entwicklung neuer Technologien und Prozesse konzentriert haben. Das beinhaltet insbesondere die Schaffung neuen Fertigungsstrategien und Prozessketten.

Die Einführung von Materialien mit hohen Leistungsfähigkeiten ist eine neue Herausforderung für die Fertigungstechnologie, da diese Materialien schwer zu zerspannen sind und die Prozesse durch ein hohes Wissen über die Materialleistung gekennzeichnet sind. Eine Kostreduzierung ist nur möglich, wenn das Erfahrungswissen für die Prozessplanung systematisch erfasst und damit wieder verwendbar wird.

Zurzeit ist ein Trend zur Herstellung von Industrieprodukten mit Mikro-Komponenten und Mikro-Features in verschiedenen Bereichen, wie zum Beispiel in der Fahrzeugindustrie, in der Flugzeugindustrie und in der Biomedizintechnik, zu beobachten. Die Komplexität der Prozessplanung wird allein schon durch die Mikrobearbeitung erhöht, da viele dieser Prozesse, wenn es um die Fertigung von 3D-Freiformen auf hartem Metall geht, eingeschränkt sind.

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Systematik zur Unterstützung der Planung von Fertigungsprozessen entwickelt, die speziell auf die kostengünstige Herstellung von Titankomponenten abzielt. Dazu wurden folgenden Schwerpunkte untersucht:

- Analyse der Fertigungsprozesse zur Herstellung von Verdichterschaufeln aus Titanlegierungen und Entwurf einer Prozesskette für die kostenoptimierten Produktion dieser Komponenten.
- Untersuchung des Fertigungsprozesses zu Herstellung von Mikrofeatures, die beispielsweise die Eigenschaften von Verdichterschaufeln verbessern können.
- Entwicklung einer integrierten Methodologie auf Basis des Axiomatik-Designs zur Steigerung der Produktivität und damit der Reduktion der Kosten zur Herstellung von Makrokomponenten und Mikrofeatures.
- Schaffung einer Datenbasis zu Erfassung von Fertigungswissen, welches bei der Entwicklung der Prozesskette benutzt wird. Diese Datenbasis wird mithilfe eines semantischen Netzes benutzerfreundlich dargestellt.

Im Ergebnis dieser Arbeit lassen sich verschiedene integrierte Prozesse zur Herstellung von Titankomponenten hinsichtlich der Produktivität, der Technologie, des Ressourcenseinsatzes und der Prozessparameter optimieren.

Abstract

Nowadays, the industry evolves towards the production of complex components with added value; most of them are made of materials with higher capabilities, such as the titanium alloys. Titanium alloys have attractive characteristics, e.g. high strength, low density and good corrosion resistance, which offer many potential applications. In the automotive industry, titanium alloys have been recently introduced with the aim of developing new vehicles with reduced weight, and thus optimized fuel consumption. In the aerospace industry, titanium alloys are currently the most used materials in aero engines, with a volume fraction of approximately 40%. On the one hand, the maturity in the aero engine design has been reached to a point where the manufacturers are focusing more on productivity, which implies the development of new technologies and processes, thus the development of new manufacturing strategies and new process chains. The introduction of materials with new capabilities represents challenges for the manufacturing technologies as these materials are difficult to machine. Their processes are defined and characterised only when knowledge and deep understanding about the material performance is available. And cost minimisation can take place when manufacturing knowledge is retrieved and reused in the process planning. On the other hand, more and more micro components and micro features have been introduced into diverse types of industrial products and market sectors. Micro components and micro features are used in the aerospace and automotive industry and for medical and biomedical applications. There are several micro manufacturing processes but they are quite limited to machine 3D free-form micro structures in a wide range of materials, mainly hard metals. Thus, a combination and integration of micro manufacturing processes is required.

Thus, facing these challenges, the aim of this work is to design an integrated process chain to support the manufacturing of titanium components using a formal approach. Such approach may include a scientific method to fulfil design and quality requirements and minimise costs; and a tool to retrieve, characterise and share relevant engineering data, generated during the manufacturing process in order to avoid the loss of manufacturing knowledge. Summarising, this research is focus on the following issues.

- Analysis of the machining processes to manufacture titanium compressor airfoils and the design of an integrated process chain to reduce manufacturing costs.
- Research on diverse technologies to manufacture micro features which, for instance, may add functionality to compressor components.
- Development of an integrated methodology, based on axiomatic system design, to enhance productivity and reduce manufacturing costs.
- Design and development of a technology data catalogue to characterise manufacturing knowledge necessary for the development of process chains. And development of semantic nets, components of the technology data catalogue, which enable the dynamic navigation through the information assuring the easy sharing of knowledge.

Acknowledgement

I am deeply grateful to Prof. Dr.-Ing. Berger who offered me the great opportunity to work together and for his opportune advices, to Prof. Hansen who had always shown great interest on my work and for his support, to Prof. Dr.-Ing. Kühhorn who was the chairman of the examination commission, and to Prof. Dr.-Ing. Woll who kindly accepted to represent Prof. Berger during the defence.

My special thanks go to the organizers of the International Graduate School Class C: "Verdichter Technologien und Materialen" of the Brandenburg University of Technology Cottbus, in particular to Prof. Dr.-Ing. habil. Michailov and Prof. Dr.-Ing. Leyens for their support and interesting discussions which led me to the successful accomplishment of this dissertation.

I would also like to thank the following persons:

Dr.-Ing. Schulze, Angelika Stahr, Udo Steffen, Kai Henning, Rainer Leege, Dr.-Ing. Ralf Kretzschmann, Jan Noack, Sarfraz Minhas, Yuliya Lebedynska, Christian Lehmann, Oier Zelaieta, Iñigo Galarraga, Dr. José Ignacio Marquinez, Dr. Arnaud De Grave, Dr. Guido Tosello, Jakob Rasmussen, Jakob Nielsen, Yang Zhang, Stefania Gasparin and Lars Sommer for their great support during the running of this project.

My dear husband Denys Martynenko who has done nothing else than giving a new sense to my life and has complemented it with love and understanding.

My dear parents, sisters and brother: Galdino Vargas Neri, V. Minerva Aparicio Huerta, Sigma, Annylú, Minerva, Elizabeth and Aleph Vargas for their immense love, comprehension and support; I am especially grateful to my dear Anny who has left us more than nice memories, she taught us what really matters in life.

My family in law: Igor, Valentyna, Roman, Yuliya and small Igor Martynenko for their kindness and love.

And my dear friends who always believe I could successfully finish this project, especially Naisheli Figueroa Ruiz, Dr.-Ing. Valentyn Solomko and Niklas Lindquist.

Veronica Vargas

Contents

List of Figures

List of Tables

List of abbreviations and formula symbols

Abbreviations

ARIZ	Algorithm to solve an inventive problem
BCBN	Binder-less cubic boron nitride
Blisk	Integrally bladed disk
BUE	Build up edge
CA	Customer attributes
CAD	Computer aided design
CAM	Computer aided manufacturing
CBN	Cubic boron nitride
CCD	Charge coupled device
CMM	Coordinate measurement machine
CNC	Computerized numerical control
Co	Cobalt
Cs	Constraints
DP	Design parameter
EBD	Electron beam drilling
EBM	Electron beam machining
ECD	Electro chemical drilling
ECF	Electro chemical milling with ultra short pulses
ECM	Electro chemical machining
EDM	Electric discharge machining
EOS	Exit order sequence
ERP	Enterprise resource planning
FEM	Finite element modelling
FR	Functional requirement
HPC	High pressure compressor
HSC	High speed cutting
HSS	High speed steel
IBR	Integrally bladed rotor
IHFP	Inductive high frequency pressure welding
IPC	Integrated process chain
ISO	International organization for standardization
IT	Information technology
KV	Knowledge visualization
LBM	Laser beam machining
LFW	Linear friction welding
LPC	Low pressure compressor
Mo	Molybdenum
MCD	Monocrystalline diamond
MQL	Minimal quantity lubricant
NaCl	Sodium chloride
NC	Numerical control
NDM	Near dry machining

NDT	Non destructive testing
Ni	Nickel
NPT	Non productive times
PCD	Polycrystalline diamond
pdf	probability density function
PDM	Product data management
PECM	Precise electrochemical machining
PVD	Physical vapour deposition
PV	Process variable
ROI	Return of investment
SEDM	Sinking electro discharge machining
SEM	Scanning electron microscope
SiC	Silicon carbide
Ta	Tantalum
TDC	Technology data catalogue
Ti	Titanium
TiAlN	Titanium aluminium nitride
TiCN	Titanium carbon nitride
TiN	Titanium nitride
TRIZ	Theory of inventive problem solving
UR	Unite removal
USM	Ultrasonic machining
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
W	Tungsten
WC	Tungsten carbide
WEDM	Wire electric discharge machining

Formula symbols

[A]	Design matrix
a_e	Contact width
a_p	Depth of cut
f_z	Tooth feed rate
l	Evaluation length
Lc	Filter cut-off
Q, Qw	Material removal rate
Ra	Arithmetical mean deviation
Rz	Average height of roughness profile
Rzmax	Maximum height of roughness profile
S	Spindle speed
STD	Standard deviation
V_B	Tool flank wear
V_c	Cutting speed
V_f	Feed rate
Ø	Diameter