EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SEQUENTIAL LASER AND CONVENTIONAL MICROMACHINING PROCESSES

ASHISH KUMAR SAHU

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

MARCH 2022

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SEQUENTIAL LASER AND CONVENTIONAL MICROMACHINING PROCESSES

by

ASHISH KUMAR SAHU

Department of Mechanical Engineering

Submitted

In fulfillment of the requirements of the degree of

Doctor of

Philosophy to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

MARCH 2022

Dedication

The thesis is dedicated to my beloved father, Late Shri Narayan Prasad Sahu,

who believed in me and always shown the right path in life.

CERTIFICATE

This is to certify that the thesis entitled "Experimental Investigation of Sequential Laser and Conventional Micromachining Processes" submitted by Mr. Ashish Kumar Sahu to the Indian Institute of Technology Delhi, for the award of the degree of Doctor of Philosophy, in the Department of Mechanical Engineering is a record of bonafide original research work carried out by him under my guidance and supervision.

The results contained in it have not been submitted in part or full to any other institute or university for the award of any degree/diploma.

Prof. Sunil Jha
Department of Mechanical Engineering
Indian Institute of Technology Delhi
New Delhi – 110 016, India

Place: New Delhi

ACKNOWLEDGEMENT

I am extremely grateful to "God" for having blessed me to rise and take up this challenge to successfully complete the highest degree in the engineering discipline. I would like to express my sincere thanks to all of them who directly or indirectly participated or assisted me in this journey.

Foremost, I express my deep sense of gratitude and sincere thanks to my thesis supervisor *Prof. Sunil Jha*. His excellent guidance, constant encouragement and optimistic outlook have been a constant source of motivation for me throughout this research work. His expert guidance, encouragement, constructive criticism and inspiring advice on the subject enabled me to think in different dimensions of research and realize the value of hard work and investigating approach. The technical and personal lessons that I learned by working under him are now base supports for the rest of my life. Besides being a source of immense knowledge and experience, *Prof. Sunil Jha* is very kind and caring with great compassion and love for the students. I will forever cherish my close association with him.

I am very much thankful to my SRC chairman Prof. P. M. Pandey, and expert members Prof. G. S. Khan and Prof. S. Ghosh, for their constructive criticism and valuable guidance during the course of my presentations. I am also thankful to Mr. Tulsiram, Mr. Subhash, Mr. Paras and other central workshop staff who helped me successfully complete my experimental work.

I express my sincere gratitude to my seniors Dr. Dilshad Ahmad Khan, Dr. Faiz Iqbal and Dr. Zafar Alam, for providing me with their motivational support and technical know-how throughout my research work. I am also thankful to my colleague at IIT Delhi, Mr. Jitin Malhotra, Mr. Hardik Patel, Mr. Harish Chauhan, Mr. Onkar Chawla, Mr. Tarun and friends from Automation Lab, Mr. Navdeep Singh, Mr. Chandan Singh, Mr. Aman Kumar, Mr. Arun Kumar who made my life enjoyable and memorable in the IIT Delhi campus.

I am indebted to my mother Mrs. Khema Sahu, for her blessings, motivations and constant support throughout the research work. I am thankful to my elder brother and younger sister, Mr. Abhishek Sahu and Miss Pragati Sahu, for providing me with moral support and taking care of many social responsibilities, which helped me to focus on my work all the time. Without their support, this research contribution would have never been possible, and thanks are not enough to express my feelings.

At last, but not least, I am thankful to everyone at IIT Delhi or outside who helped me directly or indirectly to complete this work.

(Ashish Kumar Sahu)

ABSTRACT

Microchannels have applications in micro-heat exchangers, -coolers, -heat tubes, gas turbine blade cooling, automotive cooling, chemical reactors, microelectronics, flow boiling heat transfers, liquid flow in biomedical on titanium and it's alloys. Common manufacturing techniques for microchannels are tool based mechanical cutting, wet and dry etching, lithography embossing, imprinting, injection molding and laser micromachining. Microchannel manufacturing faces many challenges in tool-based micromachining techniques related to the cutting forces, burrs, surface finish, tool failure, integrity of channels geometry, and other post-processing requirements. To tackle such problems, laser micromachining has been evolved and enabled to solve the problems to a wide extent. However, high temperature inherited with the process severely changes the surface roughness, surface integrity, and micro-structure, affecting the channel's quality. A laser-based sequential process can provide an alternative technique to overcome the limitations of both methods. In the present study, laser-based hybrid methods have been developed for the fabrication of microchannels on titanium by considering challenges with conventional tool and laser-based manufacturing techniques. An advanced micromachining system is developed for hybrid processes equipped with in-situ measurement system.

In the present dissertation, the thermal ablation mechanism of the laser micro milling process has been studied by a finite element-based heat transfer model to predict the geometrical parameters of microchannel by simulating the temperature and compared with experimental results. Two-stage phase transformations of material state have been considered in simulation at varied heat flux levels considering the thermophysical properties of a phase.

Further parametric study of the laser micro milling process has been carried out to analyze the effect of pulse repetition rate, scanning velocity, scanning times, assist gas pressure on microchannels quality, i.e., top kerf width, taper, surface roughness, and metal removal rate. Thermal stress was also studied by analyzing the surface cracks of microchannels through scanning electron microscopy. In addition, redeposition was observed on the titanium surface at a slower scanning velocity and pulse repetition rate. Oxidation degrades the surface integrity and affects aspect ratio of micro-channels.

Extensive experimental work has been done in the present study by using laser pre channel micro milling (LPCMM) and laser assisted sequential micro milling (LASMM) in overcoming the problems of laser micro milling for microchannel fabrication. In both processes, the lower cutting forces and top burr width were observed on microchannels edges than conventional micro milling (CMM). The resultant cutting force decreased by 24% and 60% in LASMM and LPCMM methods compared to CMM. A comparison of both processes was carried out at varied cutting speed and tool feed.

Further, a laser assisted micro grinding (LAMG) approach using a micro pencil grinding tool has been used sequentially and compared with conventional micro grinding (CMG). The impact of laser structuring on CMG forces and surface finish demonstrated the superior performance of the LAMG process. The microchannel obtained with LAMG has better dimensional accuracy and surface finish at lower tangential and normal force. Increasing laser input energy density reduced the forces at cost of surface finish.

Keywords: laser micromachining, laser assisted machining, microchannels, sequential machining, laser machining, micro milling, micro grinding

सार

टाइटेनियम और उसकी मिश्र धातुओं पर बनाए गए माइक्रो चैनलों का उपयोग माइक्रो -ऊष्मा विनिमायक, शीतक, माइक्रो-हीट एक्सचेंजर्स, -कूलर, -हीट ट्यूब, गैस टर्बाइन ब्लेड कूलिंग, ऑटोमोटिव कूलिंग, केमिकल रिएक्टर, माइक्रोइलेक्ट्रॉनिक, फ्लो बॉयलिंग हीट ट्रांसफर, बायोमेडिकल में तरल प्रवाह के अनुप्रयोग हैं। माइक्रो चैनल के लिए सामान्य निर्माण तकनीकें उपकरण आधारित यांत्रिक कटाई, गीली और सूखी नक़्क़ाशी, लिथोग्राफी एम्बॉसिंग, इम्प्रिंटिंग, इंजेक्शन मोल्डिंग और लेजर माइक्रो मशीनिंग हैं। माइक्रो चैनल निर्माण को टूल-आधारित माइक्रोमशीनिंग तकनीकों में कटिंग बल, बर्र, सतह परिष्करण, टूल फेल्योर, चैनल ज्योमेट्री की अखंडता और अन्य पोस्ट-प्रोसेसिंग आवश्यकताओं से संबंधित कई चुनौतियों का सामना करना पड़ता है । ऐसी समस्याओं से निपटने के लिए, लेजर माइक्रोमशीनिंग विकसित की गई है, जो समस्याओं को व्यापक रूप से हल करने में सक्षम है । हालांकि, प्रक्रिया के साथ मिला उच्च तापमान सतह की खुरदरापन, सतह की अखंडता और माइक्रो संरचना को गंभीर रूप से बदल देता है, जिससे चैनल की गुणवत्ता प्रभावित होती है।

एक लेज़र-आधारित अनुक्रमिक प्रक्रिया दोनों विधियों की कमियों को दूर करने करने के लिए एक वैकल्पिक तकनीक प्रदान कर सकती है। वर्तमान अध्ययन में, पारंपरिक उपकरण और लेजर-आधारित निर्माण तकनीकों के साथ चुनौतियों पर विचार करके टाइटेनियम पर माइक्रोचैनल के निर्माण के लिए लेजर-आधारित हाइब्रिड विधियों का विकास किया गया है। इन-सितु मापन प्रणाली से लैस हाइब्रिड प्रक्रियाओं के लिए एक उन्नत माइक्रोमशीनिंग प्रणाली विकसित की गई है।

वर्तमान शोध प्रबंध में, तापमान का अनुकरण करके और प्रयोगात्मक परिणामों की तुलना में माइक्रोचैनल के ज्यामितीय मापदंडों की भविष्यवाणी करने के लिए एक परिमित तत्व-आधारित गर्मी हस्तांतरण मॉडल द्वारा लेजर माइक्रो मिलिंग प्रक्रिया के थर्मल एब्लेशन तंत्र का अध्ययन किया गया है। भौतिक अवस्था के दो-चरण परिवर्तनों को प्रत्येक चरण के थर्मोफिजिकल गुणों पर विचार करते हुए विभिन्न ताप प्रवाह स्तरों पर अनुकरण में माना गया है।

पल्स पुनरावृत्ति दर, स्कैनिंग वेग, स्कैनिंग समय और सहायक गैस के दबाव के प्रभाव का विश्लेषण करने के लिए लेजर माइक्रो मिलिंग प्रक्रिया का आगे पैरामीट्रिक अध्ययन माइक्रोचैनल गुणवत्ता अर्थात् शीर्ष केर्फ चौड़ाई, टेपर, सतह खुरदरापन और धातु हटाने की दर पर किया गया है। स्कैनिंग इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोपी के माध्यम से माइक्रो चैनलों की सतह दरारों का विश्लेषण करके थर्मल तनाव का भी अध्ययन किया गया था। इसके अलावा, टाइटेनियम सतह पर धीमी स्कैनिंग वेग और पल्स पुनरावृत्ति दर पर पुनर्वितरण देखा गया था। ऑक्सीकरण सतह की अखंडता को कम करता है और माइक्रो चैनलों के पहलू अनुपात को प्रभावित करता है।

वर्तमान अध्ययन में माइक्रोचैनल निर्माण के लिए लेज़र प्री चैनल माइक्रो मिलिंग (एलपीसीएमएम) और लेजर असिस्टेड सीक्केंशियल माइक्रो मिलिंग (एलएएसएमएम) का उपयोग करके, लेजर माइक्रो मिलिंग की समस्याओं को कम करने व्यापक प्रयोगात्मक कार्य किया गया है । दोनों प्रक्रियाओं में, पारंपरिक माइक्रो मिलिंग (सीएमएम) की तुलना में कम मशीनन बल और शीर्ष बर्र माइक्रो चैनल किनारों पर देखा गया है । परिणामी काटने के बल में 24% और 60% की कमी में एलपीसीएमएम LASMM और एलएएसएमएम विधियों सीएमएम की तुलना में आई। दोनों प्रक्रियाओं की तुलना विभिन्न काटने की गति और उपकरण फ़ीड पर किया गया था।

इसके अलावा, लेजर सहायता प्राप्त माइक्रो ग्राइंडिंग (एलएएमजी) प्रकिया में, एक माइक्रो पेंसिल ग्राइंडिंग उपकरण का उपयोग का अनुक्रमिक रूप से किया गया है और पारंपरिक माइक्रो ग्राइंडिंग (सीएमजी) के साथ तुलना की गई है । लेजर संरचना का प्रभाव कम मशीनन बलों और बेहतर सतह परिष्करण, एलएएमजी प्रक्रिया का बेहतर प्रदर्शन है । एलएएमजी माइक्रोचैनल बेहतर आयामी सटीकता और सतह, कम स्पर्शरेखा और सामान्य बल के साथ प्राप्त होता है । बढ़ती हुई लेजर इनपुट ऊर्जा घनत्व,सतह परिष्करण की लागत पर **मशीनन** बलों को कम कम करती है।

कीवर्ड: लेजर माइक्रो मशीनन, लेजर सहायता प्राप्त मशीनन, माइक्रोचैनल, अनुक्रमिक मशीनन , लेजरमशीनन , माइक्रो मिलिंग, माइक्रो ग्राइंडिंग

Table of Contents

LIST OF FIGURES

LIST OF TABLES

Abbreviation

LMM laser micro milling

HMG hybrid micro grinding

LASMM laser assisted sequential micro milling

LPCMM pre laser channel micro milling

CMM conventional micro milling

LHMM Laser-based hybrid micromachining

ns nanosecond

CMG conventional micro grinding

LBM laser beam machining

HAZ heat affected zone

PRR pulse repetition rate

LAM laser assisted milling

LAG laser assisted grinding

LAECM laser assisted electro chemical machining

CW continuous wave

FEA finite element analysis

AMMS advanced micromachining system

ANOVA analysis of variance

SV scanning velocity

LAMG laser assisted micro grinding