EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION ON DYNAMIC FRACTURE OF ALUMINIUM ALLOYS

SANJAY KUMAR

DEPARTMENT OF APPLIED MECHANICS

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

AUGUST 2021

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION ON DYNAMIC FRACTURE OF ALUMINIUM ALLOYS

by

SANJAY KUMAR

Department of Applied Mechanics

Submitted

in fulfilment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

AUGUST 2021

Dedicated to

My father Late **Shree Kedar Nath Singh**

CERTIFICATE

This is to certify that the thesis entitled, **"EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION ON DYNAMIC FRACTURE OF ALUMINIUM ALLOYS"** submitted by **Mr. Sanjay Kumar** for the award of degree of **Doctor of Philosophy** to the **Indian Institute of Technology, Delhi** is a record of bonafide research work carried out by him under my guidance and supervision.

Mr. Sanjay Kumar has fulfilled all the prescribed requirements and the thesis is, in my opinion, worthy of consideration for the degree of Doctor of Philosophy in accordance with the regulations of the Institute. The contents of this thesis have not been submitted in part or in full to any other University or Institute for the award of any degree or diploma.

Dr. Vikrant Tiwari
Associate Professor
Department of Applied Mechanics
Indian Institute of Technology Delhi
New Delhi-110016
India

Place: New Delhi
Date:

ACKNOWLEDGMENTS

I would like to express my sincere and deepest gratitude to my supervisor, honorable **Dr. Vikrant Tiwari,** for his expert guidance, inspiration, support, and continuous encouragement. This work would not have been possible without their guidance and support. His wisdom, knowledge, intellectual, and moral support at every stage of my research enabled me to complete my research work.

Besides my supervisor, I would also like to thank my research committee members **Prof. Maloy K Singha, Prof. Suhail Ahmed,** and **Prof. S.P. Singh,** for their valuable suggestions throughout the research work and presentations.

I would like to thank all faculty members of the Department of Applied Mechanics for their help and support. I am thankful to Prof. R. K. Pandey for his immense help to study microstructure and factographs viewed from a scanning electron microscope.

I would like to mention special thanks to honorable Vice-Chancellor **Prof. Yogesh Singh,** Delhi Technological University, Delhi, for his support in continuing and sponsoring me to study for Ph.D. under the quality Improvement Programme (Q.I.P). I am grateful to the Directorate of Training and Technical Education(DTTE) of National Capital Territory (NCT), Delhi, and Delhi Technological University, Delhi, to allow me to perform research work under the scheme of quality improvement Programme (Q.I.P) of the government of India.

I would like to thank all faculty and staff members of the Delhi Technological University, Delhi, for their help and support. I am thankful to Prof. Vijay Gautam, in charge of Metal Forming Laboratory, DTU, and his staff members, Mr. Om Prakash and Mr. Techchand, help me to conduct experiments.

My sincere thanks to all my friends Anoop Kumar Pandouria, Dr. Amit Yadav, Purnashis Chakraborty, Dr. Danish Iqbal, Dr. Gaurav Singh, Kuldeep Yadav, Rohit Kumar, Ashish Kumar Khanna and other scholars of the institute who made my life as well as research comfortable at IITD.

I thank Dr. Sangeeta Khare, Dr. Kirankumar Namala, Dr.Prince Sharma, Dr. Mohit Gupta, Mr. Qyaum Ansari, and Mr. V. Patil, for their valuable support during research.

I thank technical staff members Mr. Rishi P. Dagar, Mr. Anil Kumar, Mr. Madan, for their help in conducting experiments at the "workshop" and "strength of materials" lab in the Department.

I would also like to acknowledge my childhood friends Ranjit Pathak, Vijay Kumar, Anil Kumar, and Sudhir were always ready to help with any kind of problem.

Finally, I would like to thank my parents and family members and relatives for their support during research work. They encouraged me at every step by spending their significant time. Their unconditional love and blessings have enabled me to reach this point in my life.

Sanjay Kumar

ABSTRACT

Materials having high strength/weight as well as stiffness/weight ratio are preferably used as conventional materials in the aerospace and automotive industry with the aim of reducing the weight of structures. Among nonferrous metals aluminum alloys are lightweight metallic materials having high strength to weight ratio and are hence used for crashworthy applications. The structure made from aluminium alloys may be subjected to different loading conditions such as tensile, compressive, and flexural during service. The stress-strain behavior of materials at high strain rates under dynamic loading is significantly different from that observed under quasi-static conditions. It is seen that some materials exhibit positive strain rate sensitivity, whereas some materials show negative strain rate sensitivity and some poor strain rate sensitivity.

The aim of the present study is to investigate the material behavior of AA7075-T651 and AA6063-T6 at quasi-static and dynamic conditions. The aluminium alloy AA7075-T651 was characterized to study the plastic flow and failure of the material. Tensile tests were carried out on AA7075-T651 and AA6063-T6 at different strain rates, stress triaxialitiy, and temperatures. Quasi-static tests at low strain rate were performed on a standard universal testing machine (UTM), while a split Hopkinson pressure bar (SHPB) was used to conduct high strain rate tests. The quasi-static tests at different temperatures and at reference strain rate (10^{-3}/s) were also conducted on a special UTM having a heating system. From the above experiments, a force-displacement curve was obtained, and it was converted to a true stress-strain curve.

The results obtained from the above experiments were used to calibrate the material parameters of the Johnson-Cook (J-C) model, which relates flow stress with effective plastic strain, strain rate, and temperature of the material. Johnson-Cook failure

model, which relates the failure strain with stress triaxiality, strain rate, and temperatures of material, was also calibrated.

The three-point bend tests at different strain rates were conducted on AA7075-T651 and AA6063-T6 to obtain fracture initiation toughness at different strain rates. Three-point bend specimens used in the experiments were machined according to the ASTM-E399 standard. The experimental setup used in this study was a modified Hopkinson pressure bar (MHPB) conjugation with digital image correlation (DIC). It was observed that the dynamic fracture toughness increased with loading rates. Stress intensity factor (SIF) was evaluated using an established load point displacement (LPD) technique and crack mouth opening displacement (CMOD) method, whereas the time of initiation of fracture was obtained using a stereo-configuration of high-speed cameras. The fractography was also performed on the fractured surfaces of the specimen. Trans granular facets, small and large dimples were seen on micrographs, which illustrated the reasons for the increase in fracture toughness with loading rates. In addition to observation of fractography, three-dimensional, and two-dimensional surface profiles were drawn, which showed the relation of undulation with fracture toughness.

In this study, quasi-static and dynamic three-point bend experiments were also performed to investigate the effect of high loading rates on the crack mouth opening displacement (CMOD) and fracture behavior of the Aluminum 6063-T6 alloy. A 3D Digital Image Correlation (DIC) was utilized for measuring the CMOD experiments. Quasi-static three-point bend experiments were performed using UTM and a high-resolution stereo camera system for low loading rates. For the dynamic three-point bend experiment, a Modified Hopkinson pressure bar setup, two high-speed digital cameras, and a dedicated data acquisition system were utilized in measuring load point data and the full field displacement profile. It was found that the dynamic fracture toughness values were significantly higher as compared to static fracture toughness.

Further, the finite element simulation was carried out for three-point bend tests, which were conducted at different loading rates using a three-dimensional solid model. The plastic and failure properties for numerical simulation were substituted from Johnson-Cook constitutive and failure models obtained from experimental results. The results obtained using simulation were found to be in fine agreement with experimental results for AA7075-T651.

सार

संरचनाओं के वजन को कम करने के उद्देश्य से एयरोस्पेस और ऑटोमोटिव उद्योग में उच्च शक्ति/वजन के साथ-साथ कठोरता/वजन अनुपात वाली पदार्थ को पारंपरिक पदार्थ के रूप में उपयोग किया जाता है। अलौह धातुओं में एल्युमिनियम मिश्र धातु हल्के वजन के अनुपात में उच्च शक्ति वाले धातु के पदार्थ होते हैं और इसलिए इनका उपयोग दुर्घटनाग्रस्त अनुप्रयोगों के लिए किया जाता है। एल्यूमीनियम मिश्र धातुओं से बनी संरचना सेवा के दौरान विभिन्न लोडिंग स्थितियों जैसे तन्यता, संपीड़ित और फ्लेक्सुरल के अधीन हो सकती है। गतिशील लोडिंग के तहत उच्च तनाव दरों पर सामग्री का तनाव-तनाव व्यवहार अर्ध-स्थिर परिस्थितियों में देखे गए से काफी अलग है। यह देखा गया है कि कुछ पदार्थ सकारात्मक तनाव दर संवेदनशीलता प्रदर्शित करती हैं, जबकि कुछ पदार्थ नकारात्मक तनाव दर संवेदनशीलता और कुछ खराब तनाव दर संवेदनशीलता दिखाती हैं।

वर्तमान अध्ययन का उद्देश्य अर्ध-स्थिर और गतिशील स्थितियों में AA7075-T651 और AA6063-T6 के पदार्थ व्यवहार की जांच करना है। एल्यूमीनियम मिश्र धातु AA7075-T651 को प्लास्टिक के प्रवाह और पदार्थ की विफलता का अध्ययन करने की विशेषता थी। AA7075-T651 और AA6063-T6 पर विभिन्न तनाव दरों, तनाव त्रिअक्षीयता और तापमान पर तन्यता परीक्षण किए गए। कम स्ट्रेन दर पर अर्ध-स्थिर परीक्षण एक मानक यूनिवर्सल टेस्टिंग मशीन (UTM) पर किए गए थे, जबकि स्प्लिट हॉपकिंसन प्रेशर बार (SHPB) का उपयोग उच्च स्ट्रेन रेट टेस्ट करने के लिए किया गया था। विभिन्न तापमानों पर और संदर्भ तनाव दर (10-3/s) पर अर्ध-स्थिर परीक्षण भी एक विशेष UTM पर एक हीटिंग सिस्टम पर आयोजित किए गए थे। उपरोक्त प्रयोगों से, एक बल-विस्थापन वक्र प्राप्त किया गया था, और इसे एक वास्तविक प्रतिबल-विकृति वक्र में बदल दिया गया था।

उपरोक्त प्रयोगों से प्राप्त परिणामों का उपयोग जॉनसन-कुक (जे-सी) मॉडल के भौतिक मानकों को जांचने के लिए किया गया था, जो प्रभावी प्लास्टिक तनाव, तनाव दर और पदार्थ के तापमान के साथ प्रवाह तनाव से संबंधित है। जॉनसन-कुक विफलता मॉडल, जो तनाव त्रिअक्षीयता, तनाव दर और पदार्थ के तापमान के साथ विफलता तनाव से संबंधित है, को भी कैलिब्रेट किया गया था।

अलग-अलग स्ट्रेन दरों पर थ्री-पॉइंट बेंड परीक्षण AA7075-T651 और AA6063-T6 पर आयोजित किए गए ताकि विभिन्न स्ट्रेन दरों पर फ्रैक्चर प्रवर्तन दृढ़ता प्राप्त की जा सके। प्रयोगों में प्रयुक्त तीन-बिंदु मोड़ नमूनों को ASTM-E399 मानक के अनुसार मशीनीकृत किया गया था। इस अध्ययन में प्रयुक्त प्रायोगिक सेटअप डिजिटल छवि सहसंबंध (डीआईसी) के साथ एक संशोधित हॉपकिंसन प्रेशर बार (एमएचपीबी) संयुग्मन था। यह देखा गया कि लोडिंग दरों के साथ गतिशील फ्रैक्चर दृढ़ता में वृद्धि हुई। तनाव तीव्रता कारक (एसआईएफ) का मूल्यांकन एक स्थापित लोड पॉइंट विस्थापन (एलपीडी) तकनीक और क्रैक माउथ ओपनिंग विस्थापन (सीएमओडी) विधि का उपयोग करके किया गया था, जबकि फ्रैक्चर की शुरुआत का समय हाई-स्पीड कैमरों के स्टीरियो-कॉन्फ़िगरेशन का उपयोग करके प्राप्त किया गया था। नमूने की खंडित सतहों पर भी फ्रैक्चरोग्राफी की गई थी। ट्रांस ग्रेन्युलर पहलू, छोटे और बड़े डिम्पल माइक्रोग्राफ पर देखे गए, जो लोडिंग दरों के साथ फ्रैक्चर की कठोरता में वृद्धि के कारणों को दर्शाते हैं। फ्रैक्टोग्राफी के अवलोकन के अलावा, त्रि-आयामी और दो-आयामी सतह प्रोफाइल तैयार किए गए थे, जो फ्रैक्चर दृढ़ता के साथ तरंगण के संबंध को दर्शाता है।

इस अध्ययन में, क्रैक माउथ ओपनिंग विस्थापन (CMOD) पर उच्च लोडिंग दरों के प्रभाव और एल्यूमीनियम 6063-T6 मिश्र धातु के फ्रैक्चर व्यवहार की जांच के लिए अर्ध-स्थैतिक और गतिशील तीन-बिंदु मोड़ प्रयोग भी किए गए थे। CMOD प्रयोगों को मापने के लिए एक 3D डिजिटल छवि सहसंबंध (DIC) का उपयोग किया गया था। यूटीएम और कम लोडिंग दरों के लिए एक

उच्च-रिज़ॉल्यूशन स्टीरियो कैमरा सिस्टम का उपयोग करके अर्ध-स्थैतिक तीन-बिंदु मोड़ प्रयोग किए गए थे। गतिशील तीन-बिंदु मोड़ प्रयोग के लिए, एक संशोधित हॉपकिंसन दबाव बार सेटअप, दो उच्च गति वाले डिजिटल कैमरे और एक समर्पित डेटा अधिग्रहण प्रणाली का उपयोग लोड बिंदु डेटा और पूर्ण क्षेत्र विस्थापन प्रोफ़ाइल को मापने में किया गया था। यह पाया गया कि स्थिर फ्रैक्चर दृढ़ता की तुलना में गतिशील फ्रैक्चर दृढ़ता मूल्य काफी अधिक थे।

इसके अलावा, तीन-बिंदु मोड़ परीक्षणों के लिए परिमित अव्यव अनुकरण किया गया था, जो तीन-आयामी ठोस मॉडल का उपयोग करके विभिन्न लोडिंग दरों पर आयोजित किया गया था। संख्यात्मक अनुकरण के लिए प्लास्टिक और विफलता गुणों को प्रयोगात्मक परिणामों से प्राप्त जॉनसन-कुक के गठन और विफलता मॉडल से प्रतिस्थापित किया गया था। सिमुलेशन का उपयोग करके प्राप्त परिणाम AA7075-T651 के प्रयोगात्मक परिणामों के साथ ठीक समझौते में पाए गए।

TABLE OF CONTENTS

LIST OF FIGURES

LIST OF TABLES