STRETCH FLANGEABILITY OF ALUMINIUM ALLOYS IN CIRCULAR AND SQUARE HOLE FLANGING PROCESSES

VINAY KUMAR

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

NEW DELHI-110016, INDIA

OCTOBER 2024

STRETCH FLANGEABILITY OF ALUMINIUM ALLOYS IN CIRCULAR AND SQUARE HOLE FLANGING PROCESSES

by

VINAY KUMAR

Department of Mechanical Engineering

Submitted

In fulfilment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

OCTOBER 2024

Dedicated to

My Parents

and

Grandparents

CERTIFICATE

This is to certify that the thesis entitled **"Stretch Flangeability of Aluminium Alloys in Circular and Square Hole Flanging Processes"** being submitted by **Mr. Vinay Kumar** to the **Indian Institute of Technology Delhi** for the award of the degree of **Doctor of Philosophy** in Department of Mechanical Engineering is a bonafide research work carried out by him under my supervision and guidance. To the best of my knowledge the thesis has reached the requisite standard. The research reports and the results presented in this thesis have not been submitted in parts or in full to any other University or Institute for the award of any degree or diploma.

D. Ravi Kumar

Professor

Department of Mechanical Engineering

Indian Institute of Technology Delhi

New Delhi - 110016

ACKNOWLEDGEMENT

I would like to express my profound gratitude and heartfelt thanks to my esteemed supervisor, **Prof. D. Ravi Kumar** for providing me with the opportunity to undertake this research under his expert guidance. His mentorship has been the base of my academic and research endeavours. He consistently offered guidance, encouragement, and scholarly insight that have significantly enriched the depth and scope of my research. His commitment to fostering intellectual growth has left an indelible mark on my academic journey. I am grateful to him in all respects.

I extend my heartfelt gratitude to the eminent members of my research committee, **Prof.(s) S. Aravindan, Naresh V. Datla,** and **Sushma Santapuri**. The thoughtful critiques, constructive feedback, and probing questions during various presentations have not only refined the contours of this thesis but have also broadened my scholarly perspective. Their collective expertise ensured the rigor and excellence of this research.

I thank the head of Central Workshop **Prof. S. Aravindan** and staff members **Mr. Madan, Mr. Ankit, Mr. Karan, Mr. Sumit, Mrs. Mamta** and **Mrs. Bharti**, for their helpful attitude and willingness to provide their support. I would also like to thank **Mr. Pankaj Sansanwal** and **Mr. Paras Gupta** of Mechanical Engineering Department for their help and support. Their contributions have been indispensable, equipping me with the practical skills necessary for the execution of various facets of my research.

I wish to express my sincere thanks to the senior research scholars **Dr. Amit Kumar**, **Dr. Ved Prakash**, **Dr. Kandarp Changela, Dr. Sunil Kumar, Dr. Archit Shrivastava, and Dr. Srijan Prabhakar.** I express profound gratitude to my lab mates of Integrated Design and Manufacturing Lab (DFM Lab) **Mr. Ravinder Kumar, Mr. K. Mahesh, Mr. Reeturaj Tamuly**, **Mr. M. Suresh**, **Mr. Khanish Gupta**, **Ms. Shruti Singh, Mr. Salman Ansari, Mr. Subhrajit**

Chand and Mr. Rahul Chaurasia. Their association, intellectual engagement, and collective problem-solving have encouraged an environment that exceeds the challenges of research. The synergy within our research space has not only enhanced the quality of the work but has also made the entire journey more enriching and enjoyable.

I express my gratitude toward to dear friends **Dr. Tulja Bhavani, Dr. Bharat Kumar, Dr. Shitanshu Arya, Mr. Khushi Ram, Mr. Abhishek Kandpal, Dr. Ranjna, Mr. Gaurav Kumar, Ms. Pooja Sarin and Ms. Shivangi Sarabhai** due to their presence with me here in IIT, my whole journey is very pleasant, inspiring and a memorable experience.

Lastly, I extend my gratitude to my parents, brother, family, and friends. Their unwavering love, encouragement, and belief in my capabilities have been a source of constant inspiration. Their enduring support has provided the foundation for my academic pursuits. I would like to acknowledge the assistantship received from MHRD. This thesis is not just an individual achievement, but a collective success shaped by the support and contributions of these remarkable individuals. I am sincerely thankful for the impact each of you has had on my academic and personal growth.

(VINAY KUMAR)

IIT DELHI

ABSTRACT

The growing emphasis on fuel efficiency and environmental sustainability has significantly propelled the demand for lightweight materials in the automotive industry. Aluminium alloys, known for their high strength-to-weight ratio, have a high potential for replacing steel in manufacturing various sheet metal parts for automotives. However, formability of aluminium alloys is a critical factor in the success of sheet metal forming operations. In the assessment of formability of sheet metals, stretch flangeability is an important aspect. The stretch flangeability refers to the local edge formability to avoid cracking during the expansion of a hole in a sheet metal part to form a flange. It is evaluated by determination of hole expansion ratio (HER), which is the ratio of final hole diameter to initial hole diameter in a hole expansion test and it is a measure of the local formability at the edge of the hole. Besides the material properties, hole making method also influences the stretch flangeability of sheet metals. While the stretch flangeability of steels has been well reported, it has been studied only to a very limited extent in the case of aluminium alloys. In view of this, the present work is aimed at an investigation into the hole expansion test and stretch flanging processes, particularly focusing on aluminium alloys of different grades and comparing their performance with steels.

In the first part of the work, stretch flangeability of five different aluminium alloys (AA2024, AA5083, AA5754, AA6061 and AA7075) and two grades of steel (DP600 steel and EDD Steel) has been investigated by numerical simulation of the hole expansion test (HET) along with characterisation of their tensile properties, anisotropy and forming limits. The HET experiments were carried out on a customised formability testing machine to validate the predicted hole expansion ratio, and strain and thinning at failure. It has been found that AA5754 and AA6061 exhibited the highest hole expansion ratio (HER≈67%) among the Al alloys studied in the present work and it is significantly higher than that of DP600 steel also. AA2024 and AA5083 also exhibited higher stretch flangeability than DP600 steel in HET making these four alloys potentially suitable for lightweighting of sheet metals parts involving stretch flanging operations.

The quality of the hole edge plays a major role in the determination of stretch flangeability of sheet metals. Therefore, the effect of hole making method on HER has been studied in the second part of the work by preparing the samples using three different hole making methods (punching, abrasive waterjet cutting and laser cutting) from two aluminium alloys (AA5083 and AA5754) and DP600 steel. A hydro-pneumatic press along with a suitable die assembly has been developed for punching the holes. The hole edge quality has been found to be very high in laser cut samples resulting in the highest HER in all the three materials. An improvement of 36.8% and 22.5% has been obtained with laser cutting when compared to punching in the case of AA5083 and AA5754, respectively. Though WJC produced a better-quality hole edge than punching, the presence of a small notch resulted in early cracking resulting in lower HER when compared to laser cutting. However, in the case of DP600 steel, WJC resulted in a much higher improvement. In punched holes, presence of voids and microcracks and work hardening due to plastic deformation caused lower HER.

In the actual manufacturing of sheet metal parts involving stretch flanging, circular hole flanging and square hole flanging processes are commonly used. Therefore, in the third part of the work, stretch flangeability of Al alloys has been investigated in circular hole flanging and square hole flanging processes by numerical simulation and experimental validation and the results of formability, strain distribution, thinning and flange height are compared with steels. Among the aluminium alloys, AA5754 and AA5083 alloys showed highest formability in circular hole flanging indicated by their lowest minimum hole flanging coefficient (HFC_{min}) and AA7075 exhibited the highest HFC_{min}. It has been observed that HFC_{min} of AA5754 and AA5083 alloys is nearly equal to that of DP600 steel. The final flange thickness in circular hole flanging has been analytically predicted incorporating the anisotropy of sheet metals. AA5754, AA5083 and AA6061 showed better formability in square hole flanging process as indicated by their HFC_{min} values which are lower than or equal to that of DP600 steel. But in general, all the materials showed lower formability in square hole flanging than in circular hole flanging due to very high strain localization causing severe thinning and failure at the corners of the hole as indicated by the effective strain and thinning (%) distributions in the simulation.

It can be concluded that AA5083, AA5754 and AA6061 have high stretch flangeability in both circular hole flanging and square hole flanging processes and these alloys could be considered as potential materials to replace steel for stretch flanging applications where very high strength is not an essential requirement.

Key Words: Stretch flanging, Aluminium alloys, Lightweighting, Formability, Simulation

सार

ईंधन दक्षता और पर्यावरणीय स्थिरता पर बढ़ते जोर ने ऑटोमोटिव उद्योग में हल्के सामग्रियों की मांग को काफी हद तक बढ़ा दिया है। उच्च शक्ति-से-वजन अनुपात के लिए प्रसिद्ध एल्युमिनियम मिश्र धातुओं में ऑटोमोटिव के विभिन्न शीट मेटल हिस्सों के निर्माण में स्टील को प्रतिस्थापित करने की उच्च क्षमता है। हालांकि, एल्युमिनियम मिश्र धातुओं की फॉर्मेबिलिटी शीट मेटल फॉर्मिंग ऑपरेशनों की सफलता में एक महत्वपूर्ण कारक है। शीट मेटल की फॉर्मेबिलिटी के आकलन में, स्ट्रेच फ्लैन्जेबिलिटी एक महत्वपूर्ण पहलू है। स्ट्रेच फ्लैन्जेबिलिटी एक शीट मेटल भाग में फ्लैंज बनाने के लिए होल के विस्तार के दौरान क्रैकिंग से बचने के लिए स्थानीय किनारे की फॉर्मेबिलिटी को संदर्भित करती है। इसे होल एक्सपेंशन रेशियो (HER) के निर्धारण द्वारा मापा जाता है, जो होल एक्सपेंशन टेस्ट में अंतिम होल के व्यास और प्रारंभिक होल के व्यास का अनुपात है, और यह होल के किनारे की स्थानीय फॉर्मेबिलिटी का माप है। मटेरियल गुणों के अलावा, होल बनाने की विधि भी शीट मेटल की स्ट्रेच फ्लैन्जेबिलिटी को प्रभावित करती है। जबकि स्टील की स्ट्रेच फ्लैन्जेबिलिटी को अच्छी तरह से रिपोर्ट किया गया है, एल्युमिनियम मिश्र धातुओं के मामले में इसे बहुत सीमित रूप से अध्ययन किया गया है। इसे ध्यान में रखते हुए, वर्तमान कार्य का उद्देश्य होल एक्सपेंशन टेस्ट और स्ट्रेच फ्लैन्जिंग प्रक्रियाओं की जांच करना है, विशेष रूप से विभिन्न ग्रेड की एल्युमिनियम मिश्र धातुओं पर ध्यान केंद्रित करते हुए और उनके प्रदर्शन की तुलना स्टील से करना है।

काम के पहले भाग में, पांच अलग-अलग एल्युमिनियम मिश्र धातुओं (AA2024, AA5083, AA5754, AA6061 और AA7075) और दो ग्रेड के स्टील (DP600 स्टील और EDD स्टील) की स्ट्रेच फ्लैन्जेबिलिटी की होल एक्सपेंशन टेस्ट (HET) के संख्यात्मक अनुकरण द्वारा जाँच की गई है, साथ ही उनके तन्यता गुणों, एनीसोट्रॉपी और फॉर्मिंग लिमिट्स के गुणों का वर्णन किया गया है। HET प्रयोगों को होल एक्सपेंशन अनुपात की भविष्यवाणी को मान्य करने के लिए और विफलता के समय तनाव और थिनिंग को सत्यापित करने के लिए एक कस्टमाइज्ड फॉर्मेबिलिटी टेस्टिंग मशीन पर किया गया। यह पाया गया कि AA5754 और AA6061 ने अध्ययन में शामिल एल्युमिनियम मिश्र धातुओं में से सबसे उच्च होल एक्सपेंशन अनुपात (HER≈67%) प्रदर्शित किया, जो DP600 स्टील से भी काफी अधिक है। AA2024 और AA5083 ने भी HET में DP600 स्टील से अधिक स्ट्रेच फ्लैन्जेबिलिटी दिखाई, जिससे ये चार मिश्र धातुएं स्ट्रेच फ्लैन्जिंग ऑपरेशनों में शामिल शीट मेटल पार्ट्स के हल्के वजन के लिए संभावित रूप से उपयुक्त हैं।

होल के किनारे की गुणवत्ता शीट मेटल की स्ट्रेच फ्लैन्जेबिलिटी के निर्धारण में एक प्रमुख भूमिका निभाती है। इसलिए, काम के दूसरे भाग में तीन अलग-अलग होल बनाने की विधियों (पंचिंग, एब्रैसिव वॉटरजेट कटिंग और लेजर कटिंग) का उपयोग करके दो एल्युमिनियम मिश्र धातुओं (AA5083 और AA5754) और DP600 स्टील से नमूने तैयार करके HER पर होल बनाने की विधि का प्रभाव अध्ययन किया गया। पंचिंग के लिए हाइड्रो-न्यूमैटिक प्रेस और एक उपयुक्त डाई असेंबली विकसित की गई है। लेजर कटे हुए नमूनों में होल के किनारे की गुणवत्ता बहुत अधिक पाई गई, जिससे तीनों सामग्रियों में उच्चतम HER प्राप्त हुआ। AA5083 और AA5754 के मामले में लेजर कटिंग की तुलना में पंचिंग की तुलना में क्रमशः 36.8% और 22.5% सुधार

हुआ। यद्यपि WJC ने पंचिंग से बेहतर गुणवत्ता वाला होल का किनारा उत्पन्न किया, लेकिन एक छोटे से कटाव की उपस्थिति ने जल्दी दरार का कारण बना, जिसके परिणामस्वरूप लेजर कटिंग की तुलना में कम HER प्राप्त हुआ। हालांकि, DP600 स्टील के मामले में, WJC में काफी सुधार हुआ। पंच किए गए होल्स में voids और माइक्रोक्रैक्स की उपस्थिति और प्लास्टिक विरूपण के कारण वर्क हार्डनिंग के कारण कम HER हुआ।

शीट मेटल पार्ट्स के वास्तविक निर्माण में जिसमें स्ट्रेच फ्लैन्जिंग शामिल है, सर्कुलर होल फ्लैन्जिंग और स्क्वायर होल फ्लैन्जिंग प्रक्रियाओं का सामान्य रूप से उपयोग किया जाता है। इसलिए, काम के तीसरे भाग में, स्ट्रेच फ्लैन्जेबिलिटी का अध्ययन संख्यात्मक अनुकरण और प्रयोगात्मक सत्यापन द्वारा किया गया और स्ट्रेन वितरण, थिनिंग और फ्लैन्ज की ऊँचाई के परिणामों की तुलना स्टील्स के साथ की गई। एल्युमिनियम मिश्र धातुओं में, AA5754 और AA5083 मिश्र धातुओं ने सर्कुलर होल फ्लैन्जिंग में सर्वोच्च फॉर्मेबिलिटी दिखाई, जिसे उनके सबसे न्यूनतम होल फ्लैन्जिंग कोफिसिएंट (HFC_{min}) द्वारा इंगित किया गया और AA7075 ने सबसे अधिक HFC_{min} प्रदर्शित किया। यह देखा गया कि AA5754 और AA5083 मिश्र धातुओं का HFC_{min} लगभग DP600 स्टील के बराबर है। सर्कुलर होल फ्लैन्जिंग में अंतिम फ्लैन्ज की मोटाई का विश्लेषणात्मक रूप से पूर्वानुमान किया गया है जिसमें शीट मेटल्स की एनीसोट्रॉपी को शामिल किया गया है। AA5754, AA5083 और AA6061 ने स्क्वायर होल फ्लैन्जिंग प्रक्रिया में बेहतर फॉर्मेबिलिटी दिखाई, जैसा कि उनके HFC_{min} मूल्यों द्वारा इंगित किया गया है जो कि DP600 स्टील के बराबर या उससे कम हैं। लेकिन सामान्य तौर पर, सभी सामग्रियों ने स्क्वायर होल फ्लैन्जिंग में सर्कुलर होल फ्लैन्जिंग की तुलना में कम फॉर्मेबिलिटी दिखाई, क्योंकि कोनों पर उच्च तनाव स्थानीयकरण के कारण तीव्र थिनिंग और विफलता होती है, जैसा कि सिमुलेशन में प्रभावी तनाव और थिनिंग (%) वितरण द्वारा इंगित किया गया है।

यह निष्कर्ष निकाला जा सकता है कि AA5083, AA5754 और AA6061 दोनों सर्कुलर और स्क्वायर होल फ्लैन्जिंग प्रक्रियाओं में उच्च स्ट्रेच फ्लैन्जेबिलिटी रखते हैं और इन मिश्र धातुओं को उन स्ट्रेच फ्लैन्जिंग अनुप्रयोगों के लिए स्टील के प्रतिस्थापन के रूप में संभावित सामग्रियों के रूप में माना जा सकता है जहाँ बहुत अधिक शक्ति की आवश्यकता नहीं है।

मुख्य शब्द: स्ट्रेच फ्लैन्जिंग, एल्युमिनियम मिश्र धातुएं, हल्के वजन, फॉर्मेबिलिटी, अनुकरण.

ABBREVIATIONS

AHSS	Advanced High Strength Steel
BCC	Body-Centred Cubic
BH	Bake Hardened
BHF	Blank Holder Force
CNC	Computerised Numerical Control
CP	Complex Phase
CT	Coldwork Tool Steel
DAQ	Data Acquisition
DH	Differential Hardening
DP	Dual-Phase
EDD	Extra-Deep Drawing
EDM	Electric Discharge Machining
FB	Ferrite and Bainite
FCC	Face-Centred Cubic
FE	Finite Element
FEA	Finite Element Analysis
FEM	Finite Element Method
FLC	Forming Limit Curve
FLD	Forming Limit Diagram
GPA	Grid Pattern Analyser
HAZ	Heat Affected Zone
HB	Hyper Burring
HER	Hole Expansion Ratio
HET	Hole Expansion Test
HFC_{min}	Minimum Hole Flanging Coefficient
HRC	Rockwell Hardness C
IF	Interstitial-Free
IH	Isotropic Hardening
LC	Laser Cutting

LDH	Limiting Dome Height
LDR	Limiting Draw Ratio
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
ND	Normal Direction
PHS	Press Hardening Steel
PLC	Programmable Logic Controller
RD	Rolling Direction
SAZ	Shear Affected Zone
SEM	Scanning Electron Microscope
SF	Super Formable Steel
SPIF	Single Point Incremental Forming
SRS	Strain Rate Sensitivity
SS	Stainless Steel
TD	Transverse Direction
TE	Total Elongation
TRIP	Transformation Induced Plasticity
TWIP	Twinning Induced Plasticity
UAT	Uniaxial Tensile Test
UE	Uniform Elongation
UTS	Ultimate Tensile Strength
WJC	Waterjet Cutting
YS	Yield Strength

TABLE OF CONTENTS

LIST OF FIGURES

LIST OF TABLES