

NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM ẢNH HƯỞNG CỦA RUNG ĐỘNG SIÊU ÂM ĐẾN LỰC TẠO HÌNH TRONG QUÁ TRÌNH TẠO HÌNH TẤM BẰNG PHƯƠNG PHÁP TẠO HÌNH ĐA ĐIỂM

AN EXPERIMENTALLY INVESTIGATING THE EFFECTS OF ULTRASONIC VIBRATION ON THE FORMING FORCE DURING INCREMENTAL SHEET FORMING PROCESS

La Ngọc Tuấn¹, Nguyễn Quang Thanh¹, Nguyễn Hồng Ngoan¹, Hồ Ký Thanh^{2,*}

¹Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vinh

²Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp, Đại học Thái Nguyên

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày một số kết quả nghiên cứu thực nghiệm công nghệ tạo hình đa điểm có và không có rung động siêu âm trợ giúp gia công tấm hợp kim nhôm Al 5052 với các chiều dày 0.5 và 1.0mm. Trong quá trình thực nghiệm, dụng cụ biến dạng dẻo chuyển động theo đường xoắn vít với tốc độ 2400mm/ph và bước tiến theo phương dọc trục 0.5mm để tạo thành sản phẩm dạng nón cụt có góc thành tường 45° và chiều sâu tạo hình 20mm. Kết quả cho thấy, nhờ rung động siêu âm trợ giúp, lực tạo hình chính F_z và các lực cản trở chuyển động của dụng cụ biến dạng theo phương ngang đều giảm mạnh. Bên cạnh đó, dưới tác dụng của rung động siêu âm, thành phần lực tạo hình chính F_z nhanh chóng đạt giá trị cực đại rồi có xu hướng giảm đến khi kết thúc quá trình tạo hình. Ngoài ra, kết quả thực nghiệm còn cho thấy hiệu quả giảm lực biến dạng nhờ rung động siêu âm trợ giúp của tấm dày lớn hơn so với tấm mỏng.

Từ khóa: Rung động siêu âm; Siêu âm trợ giúp; Tạo hình đa điểm; Lực biến dạng; Giảm lực tạo hình.

ABSTRACT

In this work, the incremental sheet forming (ISF) process with and without the assistance of ultrasonic vibration was deployed to form Al 5052 aluminum alloy sheet with two thicknesses of 0.5mm and 1.0mm. During the experiment, a spiral tool trajectory with a feed rate of 2400mm/min and a step depth of 0.5mm was used to form truncated cone products with a wall angle of 45° and a forming depth of 20mm. The results showed that, with the assistance of ultrasonic vibration, the main forming force F_z and the forces hindering the horizontal movement of the forming tool F_x and F_y were significantly reduced. The results also showed that, due to ultrasonic vibration, the main forming force F_z quickly reached its maximum value then tended to decrease. In addition, the experimental results also showed that the reduction efficiency of major forming force F_z for 1.0mm thick plates was greater than that of 0.5mm thick plates.

Keywords: Ultrasonic vibration; Ultrasonic-assisted; Incremental sheet forming; Forming force; Reduction.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ngày nay, rung động siêu âm đã và đang được nghiên cứu, ứng dụng phổ biến trong các lĩnh vực sản xuất công nghiệp và trong đời sống [1]. Năng lượng siêu âm cường độ lớn có thể kích hoạt một loạt các cơ chế, chẳng hạn như nhiệt, khuấy trộn, khuếch tán, xáo trộn bề mặt tiếp xúc, ma sát, phá hủy cơ học và các hiệu ứng hóa học [2]. Trong lĩnh vực gia công cắt gọt, các nghiên cứu cho thấy, rung động siêu âm trợ giúp đã mang lại những hiệu quả tích cực, chẳng hạn như giảm lực dọc trục, mô-men và công cắt khi khoan [3]; cải thiện độ nhám khi phay [4]; ổn định quá trình cắt và dễ thoát phoi khi tiện [5].

Từ phát hiện của Langnecker về hiện tượng ứng suất chảy giảm dưới tác dụng của rung động siêu âm [6], nhiều công nghệ tạo hình bằng các phương pháp biến dạng dẻo khai thác rung động siêu âm trợ giúp đã được triển khai nghiên cứu và ứng dụng vào thực tiễn sản xuất. Rung động siêu âm trợ giúp giảm lực cần thiết để biến dạng dẻo, tăng khả năng biến dạng, cải thiện chất lượng tạo hình và chất lượng bề mặt, chẳng hạn như khi trợ giúp quá trình dập vuốt [7-8], kéo dây [9], ép đùn [10], chôn nóng [11]; tăng khả năng thẩm thấu biến dạng dẻo khi chôn nguội [12].

Khoảng một thập kỷ trở lại đây, các nghiên cứu khai thác rung siêu âm trợ giúp công nghệ tạo hình đa điểm (incremental sheet forming, gọi tắt là công nghệ ISF) ứng dụng để chế tạo các sản phẩm dạng tấm, vỏ bắt đầu được triển khai trên thế giới. Được phát minh năm 1967 [13], công nghệ ISF có mục đích khắc phục các nhược điểm cố hữu của công nghệ dập vuốt truyền thống, chẳng hạn tính đặc thù công nghệ, chi phí vận hành lớn và công nghệ phức tạp [14]. Công nghệ ISF dựa trên sự

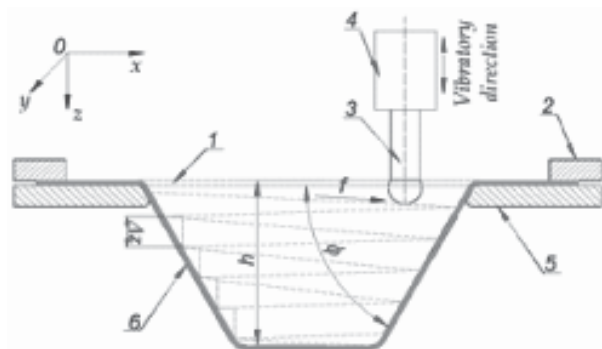
biến dạng cục bộ liên tục phối tấm bằng cách sử dụng dụng cụ biến dạng dẻo có đỉnh dạng chỏm cầu di chuyển trên một quỹ đạo xác định cho đến khi hoàn thành sản phẩm. Quỹ đạo chuyển động của dụng cụ thường được lập trình bởi các máy CNC hoặc cánh tay rô-bốt [15]. Ưu điểm nổi bật của công nghệ ISF là rất linh hoạt trong sản xuất sản phẩm, chi phí khuôn và dụng cụ biến dạng thấp, không cần thiết bị đắt tiền, có khả năng cải thiện chất lượng bề mặt sản phẩm [16], chi phí phần mềm thấp và giúp cải thiện khả năng biến dạng dẻo của vật liệu [14]. Tương tự như quá trình tạo hình bằng biến dạng dẻo khác, nghiên cứu quá trình tạo hình bằng công nghệ ISF có rung động siêu âm trợ giúp (ultrasonic-assisted incremental sheet forming, gọi tắt là công nghệ UAISF) cho thấy, lực tạo hình giảm [17-20], khả năng biến dạng dẻo tăng [17], hiện tượng đàn hồi ngược giảm [17], phân bố biến dạng đồng đều hơn [21].

Tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu trước đây đã công bố về UAISF chỉ thực hiện với tốc độ tiến dụng cụ biến dạng khá thấp (chỉ đến 2000mm/ph) [17, 18, 22], hoặc ứng dụng tạo hình các vật liệu dễ biến dạng dẻo như hợp kim nhôm AA 1050 và AA 1060 [17, 18, 20, 21]. Các nghiên cứu ứng dụng công nghệ UAISF thực hiện ở tốc độ cao hơn 2000mm/ph, khá hiếm các nghiên cứu triển khai với vật liệu khó biến dạng hơn, chẳng hạn như các hợp kim nhôm kết cấu hoặc thép kết cấu.

Nhằm mở rộng khả năng ứng dụng của công nghệ UAISF, trong nghiên cứu này, tốc độ tiến dụng cụ biến dạng dẻo được khảo sát đến 2400mm/ph. Đồng thời, hợp kim nhôm kết cấu Al 5052, một hợp kim khó biến dạng hơn nhiều so với các hợp kim nhôm AA 1050 và AA 1060, với hai chiều dày 0.5mm và 1.0mm được sử dụng trong quá trình nghiên cứu thực nghiệm.



2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU



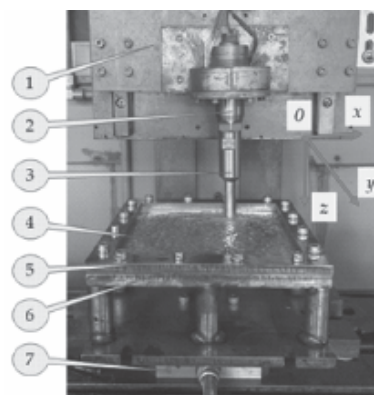
Hình 1. Sơ đồ quá trình tạo hình bằng công nghệ UAISF

Sơ đồ chung quá trình tạo hình sản phẩm dạng tấm vỏ bằng công nghệ UAISF được thể hiện như trên hình 1. Phôi ban đầu (1) được kẹp chặt bởi chặn phôi (2) và tấm đế (5). Dụng cụ biến dạng (3) được kẹp chặt trên bộ phát rung siêu âm (4) và có thể di chuyển theo quỹ đạo phù hợp với tốc độ tiến f và bước tiến theo phương dọc trục Δz đến khi kết thúc quá trình gia công để tạo thành sản phẩm (6). Trong quá trình tạo hình, bộ phát rung siêu âm được cấp điện và thực hiện rung theo phương dọc trục tạo nên sự tiếp xúc gián đoạn giữa bề mặt dụng cụ biến dạng và bề mặt phôi gia công.

Các công bố trước đây về công nghệ ISF cho thấy, ứng xử của các thành phần lực trong quá trình tạo hình là chịu ảnh hưởng mạnh bởi các thông số đầu vào, chẳng hạn như bước tiến theo phương dọc trục Δz , đường kính dụng cụ biến dạng d , góc thành tường ϕ , tốc độ tiến dụng cụ f và chiều dày tấm t , quỹ đạo tiến dụng cụ... Sự thay đổi của các thông số này sẽ gây ra sự thay đổi lớn của các thành phần lực tạo hình cũng như khả năng tạo hình sản phẩm.

Mô hình thực nghiệm quá trình tạo hình bằng công nghệ UAISF được trình bày trên hình 2, trên cơ sở nghiên cứu trước đây

của nhóm tác giả [22]. Trong đó, bộ phát rung siêu âm (2) làm việc ở tần số 20 kHz được kẹp chặt trên đầu máy phay (1) tại điểm nút (điểm có biên độ rung động bằng “không”). Dụng cụ biến dạng dẻo (3) được chế tạo dưới dạng một đầu khuếch đại thứ hai và được kẹp chặt trên đầu bộ phát rung bằng mối ghép ren. Phôi (4) được kẹp chặt trên bộ đồ gá gồm chặn phôi (5) và tấm đế (6) bởi các bu-lông. Trong quá trình tạo hình, lực kéo 03 thành phần được sử dụng để thu thập tín hiệu của các thành phần lực tạo hình tác dụng lên phôi về máy tính và dùng để xử lý kết quả về sau. Trong nghiên cứu này, dụng cụ biến dạng dẻo được chế tạo bằng thép C45, đỉnh dạng chỏm cầu có đường kính 16mm. Các nghiên cứu trước đây [21, 23, 24] cho thấy, tốc độ quay của dụng cụ không ảnh hưởng nhiều đến thành phần lực tạo hình, do đó trong nghiên cứu thực nghiệm, phương án dụng cụ biến dạng dẻo không quay được lựa chọn cho tất cả các thí nghiệm.



Hình 2. Ảnh chụp hệ thống thiết bị thí nghiệm

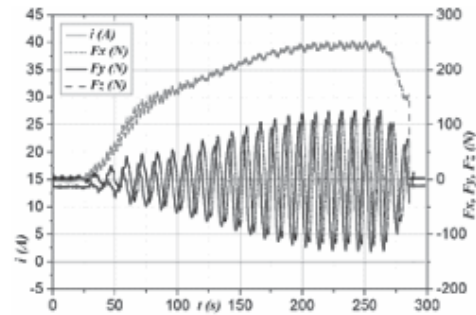
Phôi thí nghiệm là hợp kim nhôm Al 5052 tấm được cắt thành các tấm vuông có kích thước 240mm x 240mm với hai loại chiều dày 0.5mm và 1.0mm. Tốc độ tiến dụng cụ biến dạng dẻo được lựa chọn khảo sát là 2400mm/ph. Tất cả các thí nghiệm được thực hiện dưới điều kiện bôi trơn bằng dầu công nghiệp. Lượng tiến dụng cụ theo phương dọc trục Δz , chiều

sâu tạo hình h và góc thành tường ϕ (xem hình 1) được lựa chọn cố định, lần lượt là 0.5mm, 20mm và 45° . Đồng thời, quỹ đạo tiến dụng cụ được lựa chọn dạng xoắn vít không gian cho mọi thí nghiệm.

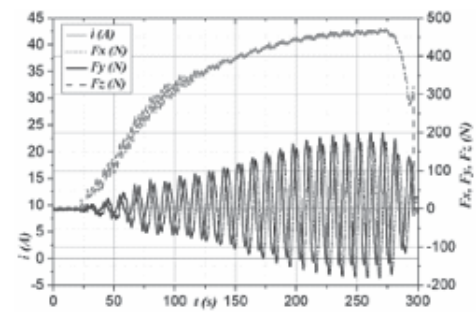
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Biểu đồ các thành phần lực biến dạng khi tạo hình bằng công nghệ ISF thông thường cho các tấm có chiều dày 0.5 mm và 1.0 mm được trình bày lần lượt trên các hình 3 và 4. Dễ dàng nhận thấy, thành phần lực tạo hình chính F_z lớn hơn nhiều so với các thành phần lực tạo hình theo phương ngang F_x và F_y . Ngoài ra, kết quả còn cho thấy, khi tăng chiều sâu tạo hình h thì các thành phần lực tạo hình có xu hướng gia tăng. Với tấm có chiều dày 0.5 mm, khi chiều sâu tạo hình đạt khoảng 15 mm thì các thành phần lực đạt giá trị cực đại và có xu hướng không đổi. Với chiều dày tấm này, giá trị cực đại của thành phần lực tạo hình chính F_z khoảng 250N; trong khi đó các thành phần lực theo phương ngang F_x và F_y , giá trị cực đại đạt khoảng 125N. Tuy nhiên, với tấm dày hơn (chiều dày 1.0 mm), giá trị cực đại của các thành phần lực chỉ đạt được khi chiều sâu tạo hình h tăng đến khoảng 18mm. Với tấm dày, giá trị cực đại của thành phần lực F_z khoảng 450N; các lực theo phương ngang F_x và F_y đạt cực đại khoảng 175N. Hiện tượng tăng lực tạo hình chính F_z khi tăng chiều sâu tạo hình h trong quá trình tạo hình bằng công nghệ ISF thông thường có thể được giải thích bởi sự hóa bền của vật liệu. Đồng thời, các thành phần lực theo phương ngang tăng bởi lực cản do ma sát tiếp xúc giữa dụng cụ biến dạng và bề mặt vật liệu. Tuy nhiên, khi đạt đến chiều sâu tạo hình h nhất định, sự cân bằng giữa biến mỏng thành và hóa bền biến dạng dẫn đến thành phần lực tạo hình chính F_z đạt giá trị cực đại và có xu hướng

không thay đổi. Kết quả này làm cho các thành phần lực cản trở chuyển động của dụng cụ theo phương ngang F_x , F_y cũng có xu hướng không đổi.



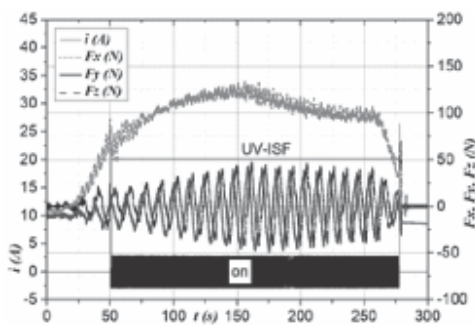
Hình 3. Đồ thị các thành phần lực tạo hình tấm có chiều dày 0.5mm khi gia công bằng công nghệ ISF thông thường



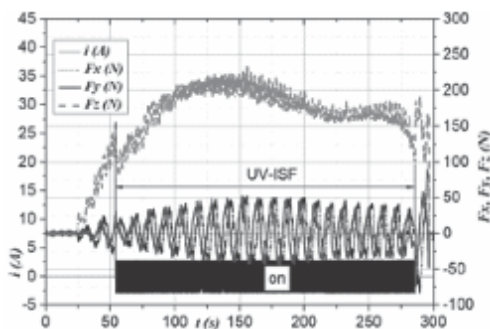
Hình 4. Đồ thị các thành phần lực tạo hình tấm có chiều dày 1.0mm khi gia công bằng công nghệ ISF thông thường

Hình 5 và 6 lần lượt trình bày đồ thị các thành phần lực tạo hình tấm có chiều dày 0.5 và 1.0mm bằng công nghệ UAISF. Kết quả cho thấy, tương tự như khi tạo hình bằng công nghệ ISF thông thường, thành phần lực tạo hình chính F_z lớn hơn nhiều so với các thành phần lực theo phương ngang F_x và F_y . Tuy nhiên, các thành phần lực này nhỏ hơn nhiều so với khi tạo hình bằng công nghệ ISF thông thường. Điều này khẳng định hiệu quả của rung động siêu âm đối với quá trình tạo hình bằng công nghệ UAISF. Cả hình 5 và 6 đều cho thấy, dưới tác dụng của rung động siêu âm, thành phần lực tạo hình chính F_z nhanh chóng đạt đến giá

trị cực đại (khi chiều sâu tạo hình đạt khoảng 10mm), sau đó giảm xuống. Với tấm có chiều dày 0.5mm, giá trị cực đại của lực F_z chỉ đạt khoảng 125N, bằng khoảng 50% so với khi tạo hình bằng công nghệ ISF thông thường. Trong khi đó, với tấm có chiều dày 1.0mm, lực F_z cực đại chỉ khoảng 200N, bằng khoảng 44% so với khi tạo hình bằng công nghệ ISF thông thường. Hiện tượng giảm mạnh lực tạo hình chính F_z có thể được giải thích bởi năng lượng siêu âm đã kích hoạt các lệch trong lòng vật liệu chuyển động, còn gọi là hiệu ứng thể tích [25]. Hệ quả là vật liệu trở nên mềm hơn, dễ biến dạng dẻo hơn. Nói cách khác, rung động siêu âm giúp giảm lực biến dạng dẻo cần thiết. Ngoài ra, sự chuyển động của lệch và ma sát tiếp xúc giữa bề mặt dụng cụ với bề mặt phôi đều sinh nhiệt. Với tấm có chiều dày lớn hơn, tổn thất nhiệt ra môi trường xung quanh nhỏ hơn, do đó hiệu quả giảm lực của tấm dày cao hơn so với khi tạo hình tấm mỏng.



Hình 5. Đồ thị các thành phần lực tạo hình tấm có chiều dày 0.5mm khi gia công bằng công nghệ UAISF



Hình 6. Đồ thị các thành phần lực tạo hình tấm có chiều dày 1.0mm khi gia công bằng công nghệ UAISF

Kết quả thực nghiệm cũng cho thấy, nhờ rung động siêu âm, các thành phần lực theo phương ngang F_x và F_y đều giảm mạnh so với khi tạo hình bằng công nghệ ISF thông thường. Giá trị cực đại của các thành phần lực F_x và F_y trong quá trình tạo hình bằng công nghệ UAISF khoảng gần 50N với tấm dày 0.5mm, giảm khoảng 60% so với khi tạo hình bằng công nghệ ISF thông thường. Trong khi đó, với tấm dày 1.0mm, giá trị cực đại của các thành phần lực F_x và F_y trong quá trình tạo hình bằng công nghệ UAISF là khoảng trên 50N, giảm khoảng 70% khi so với tạo hình bằng công nghệ ISF thông thường. Hiện tượng này có thể giải thích bởi hiệu ứng bề mặt [25]. Theo đó, rung động siêu âm làm gián đoạn tiếp xúc của bề mặt dụng cụ với bề mặt phôi, qua đó giúp cải thiện điều kiện bôi trơn và giảm ma sát tiếp xúc. Kết quả này cũng cho thấy, khi tấm có chiều dày lớn hơn, hiệu quả giảm các thành phần lực theo phương ngang lớn hơn.

4. KẾT LUẬN

Trong công trình này, công nghệ tạo hình ISF có và không có sự trợ giúp của rung động siêu âm được triển khai để tạo hình tấm hợp kim nhôm Al 5052 với hai chiều dày 0.5mm và 1.0mm. Quá trình thực nghiệm sử dụng quỹ đạo xoắn vít với tốc độ tiến dụng cụ 2400mm/ph và bước tiến theo phương dọc trục 0.5mm để tạo hình sản phẩm dạng nón cụt có góc thành tường 45° , chiều sâu tạo hình 20mm. Kết quả cho thấy, so với quá trình tạo hình bằng công nghệ ISF thông thường, quá trình tạo hình bằng công nghệ UAISF có các đặc điểm:

- Lực tạo hình chính F_z và các thành phần lực cản trở chuyển động của dụng cụ theo phương ngang F_x , F_y nhỏ hơn nhiều;
- Lực tạo hình chính F_z đạt giá trị cực đại nhanh hơn, sau khi đạt cực đại thì độ lớn của F_z có xu hướng giảm;

- Hiệu quả giảm lực các thành phần lực tạo hình phụ thuộc vào chiều dày tấm, chiều dày lớn hơn thì mức độ giảm của các thành phần lực lớn hơn.

Lời cảm ơn:

Các tác giả xin bày tỏ lời cảm ơn với những hỗ trợ của Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp, Đại học Thái Nguyên và của Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vinh trong quá trình thực hiện nghiên cứu này.❖

Ngày nhận bài: 27/8/2024

Ngày phản biện: 12/9/2024

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Dale Ensminger and Leonard J. Bond (2011); *“Ultrasonics: Fundamentals, Technologies, and Applications”*, 3rd edition. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [2]. Juan A. Gallego-Juárez and Karl F. Graff (2015); *“Power Ultrasonics: Applications of High-Intensity Ultrasound”*, Woodhead Publishing.
- [3]. Quoc-Huy Ngo, Ky-Thanh Ho (2021); *“An experimental study on ultrasonic assisted drilling of stainless steel AISI SUS 304”*, International Journal of Advances in Engineering and Management, vol. 3(6), pp. 256-261.
- [4]. Mohamed Baraya, Jiwang Yan & Mohab Hossam (2024); *“Improving and Predicting the Surface Roughness and the Machining Accuracy in Ultrasonic Vibration-Assisted Milling”*, Journal of Vibration Engineering & Technologies.
- [5]. Duman, E., et al. (2024); *“Investigation of ultrasonic vibration assisted orthogonal turning under dry and minimum quantity lubrication conditions and performing sustainability analyses”*, Journal of Cleaner Production, vol. 434, pp. 140187.
- [6]. Bertwin Langenecker (1966); *“Effects of Ultrasound on Deformation Characteristics of Metals”*, IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, vol. 13(1), pp. 1-8.
- [7]. A.A. Naderia, S.A. Mokhtar (2021); *“Effect of Process Parameters on Thin-wall Products under High-frequency Vibrating Tools, Case Study: Ultrasonic Assisted Deep Drawing Process”*, Journal of Stress Analysis, vol. 6(1), pp. 105-125.
- [8]. Ehsan Malekipour, Ebrahim Sharifi, Nafiseh Shahbazi Majd, Hossein Heidary (2022); *“Observation on the behavior of ultrasonic micro-hammer and its effects on the deep drawing process: Numerical simulation and experimental study”*, Ultrasonics, vol. 119, pp. 106566.
- [9]. Liu Shen, Xiaobiao Shan, Hengqiang Cao, Tao Xie (2020); *“Finite Element Analysis on Ultrasonic Drawing Process of Fine Titanium Wire”*, Metals, vol. 10(5), pp. 575.
- [10]. Weiqiang Wan, Jianfeng Cheng, Linhong Xu, Fuchu Liu, Haiou Zhang & Guangchao Han (2022); *“Investigation on friction characteristics of micro double cup extrusion assisted by different ultrasonic vibration modes”*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 123(7), pp. 2549-2560.
- [11]. Zhendong Xie, Yanjin Guan, Jiqiang Zhai, Lihua Zhu, Chongkai Zhong (2017); *“Study on ultrasonic vibration assisted upsetting of 6063 aluminum alloy”*, Procedia Engineering, vol. 207, pp. 490-495.
- [12]. Alireza Abbasi, Saeid Amini, and Afshin Emamikhah (2014); *“Design and implementation of the ultrasonic cold forging technology process for improving surface mechanical properties of 6XB2C cold-worked alloy steel tool”*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, vol. 230(2), pp. 267-278.
- [13]. E. Leszak (1967); *“Apparatus and process for incremental dieless forming”*, Patent: US3342051.
- [14]. Agrawal, M.K., et al. (2023); *“A brief review on the perspective of a newer incremental sheet forming technique and its usefulness”*, Advances in Materials and Processing Technologies, vol. 10(2), pp. 506-516.
- [15]. Trung-Kien Le, Duc-Toan Tran, Ngoc-Tam Bui Bui, Thanh-Hai Nguyen (2023); *“Effect of Ultrasonic Vibration on Forming Force in the Single-Point Incremental Forming Process”*, Shock and Vibration, vol. 2023, pp. 1-11.
- [16]. Melania Tera, Cristina Maria Biris (2019); *“Comparison between Deep-Drawing and Incremental Forming Processes from an Environmental Point of View”*, Materials Science Forum, vol. 957, pp. 120-129.
- [17]. Saeid Amini, Ahmad Hosseinpour Gollo & Hossein Paktinat (2017); *“An investigation of conventional and ultrasonic-assisted incremental forming of annealed AA1050 sheet”*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 90(5), pp. 1569-1578.
- [18]. Long, Y., et al. (2018); *“Effects of process parameters on force reduction and temperature variation during ultrasonic assisted incremental sheet forming process”*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 97(1), pp. 13-24.
- [19]. Randy Cheng et al. (2019); *“Applying ultrasonic vibration during single-point and two-point incremental sheet forming”*, Procedia Manufacturing, vol. 34, pp. 186-192.
- [20]. Li, Y., et al. (2020); *“Investigation on the material flow and deformation behavior during ultrasonic-assisted incremental forming of straight grooves”*, Journal of Materials Research and Technology, vol. 9(1), pp. 433-454.
- [21]. Li, J., et al. (2023); *“Multi-stage finite element modeling of the deformation behavior during ultrasonic-assisted incremental sheet forming”*, Journal of Computational Science, vol. 72, pp. 102077.
- [22]. Ngoc-Tuan La et al. (2024); *“Optimization of Ultrasonic-Assisted Incremental Sheet Forming”*, Materials, vol. 17, pp. 3170.
- [23]. Zhang, L., C. Wu, and H. Sedaghat (2021); *“Ultrasonic vibration-assisted incremental sheet metal forming”*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 114(11-12), pp. 3311-3323.
- [24]. Bishnoi, Pawan, and Pankaj Chandna (2022); *“Formability of Aluminum Alloys During Single Point Incremental Forming”*, International Journal of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering, vol. 12(1), pp. 1-26.
- [25]. Jiqiang Zhai et al. (2023); *“Macroscopic mechanism of ultrasonic vibration in ultrasonic-assisted metal forming”*, Journal of Materials Research and Technology, vol. 24, pp. 7852-7864.