

CHẾ TẠO TẤM KHUÔN BẰNG PHƯƠNG PHÁP TẠO HÌNH THEO LỚP

MANUFACTURE A MOLD USING THE LAYERED FORMING METHOD

Nguyễn Thuỳ Diễm Quyên, Trần Thanh Thương, Vũ Quang Huy, Đỗ Văn Đại*

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh

Email: 21144118@student.hcmute.edu.vn; thuongtt@hcmute.edu.vn;

huyvq@hcmute.edu.vn; *daidv@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu ứng dụng công nghệ Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) để chế tạo khuôn cho sản phẩm nhựa 2D, nhằm đánh giá khả năng tạo khuôn chính xác, tiết kiệm chi phí và thời gian so với phương pháp truyền thống. Nghiên cứu gồm hai phần: lý thuyết và thực nghiệm. Phần lý thuyết phân tích cơ chế WAAM, vật liệu sử dụng và ứng dụng trong ngành khuôn mẫu. Phần thực nghiệm chế tạo khuôn với các thông số tối ưu như dòng điện hàn và loại dây kim loại. Kết quả cho thấy WAAM là giải pháp hiệu quả, linh hoạt và tiết kiệm, hứa hẹn ứng dụng rộng rãi trong sản xuất khuôn mẫu để tối ưu hóa quy trình.

Từ khóa: WAAM; Khuôn phun ép nhựa; Tối ưu hóa; Thời gian phun ép.

ABSTRACT

This paper explores the use of Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) for producing molds used in 2D plastic product fabrication. It aims to assess WAAM's efficiency and viability in achieving precise molds while reducing time and costs compared to conventional techniques. The study is divided into two sections: theoretical and experimental analysis. The theoretical section reviews literature on WAAM, examining its operational principles, suitable materials, and applications in mold production. In the experimental section, molds for 2D plastic products are fabricated using WAAM, with optimized parameters like welding current and metal wire type. The findings validate WAAM as a practical and effective approach for mold manufacturing. Offering cost-effective customization and streamlined production, WAAM shows significant promise for broad adoption in the mold-making industry, particularly for enhancing efficiency and minimizing production time.

Keywords: Ex-WAAM; Injection mold; Production process; Cycle time.

1. TỔNG QUAN

Công nghệ Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) đang nổi lên như một giải pháp tiên tiến trong chế tạo khuôn phun ép nhựa, một thành phần thiết yếu trong ngành sản xuất nhựa [1]. WAAM sử dụng hồ quang điện và dây kim loại để tạo cấu trúc từng lớp, mang lại lợi ích vượt trội như giảm chi phí, rút ngắn thời gian sản xuất và tăng tính linh hoạt trong thiết kế [2]. So với các phương pháp gia công truyền thống như phay CNC, WAAM cho phép chế tạo khuôn có hình dạng phức tạp với hiệu quả kinh tế cao, đồng thời giảm thiểu lãng phí vật liệu [3]. Trong bối cảnh ngành công nghiệp nhựa Việt Nam đang phát triển mạnh mẽ, việc ứng dụng WAAM để chế tạo tấm khuôn không chỉ đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật mà còn nâng cao năng lực sản xuất trong nước, giảm phụ thuộc vào công nghệ nhập khẩu [4].

Khuôn phun ép nhựa đòi hỏi độ chính xác cao, độ bền cơ học tốt và khả năng chịu nhiệt để đảm bảo chất lượng sản phẩm nhựa [5]. Các yếu tố như thông số công nghệ (dòng điện hàn, tốc độ nạp dây, góc nghiêng) và tính chất vật liệu (độ co rút, độ cứng) ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu suất và chất lượng của khuôn [6]. WAAM cho phép kiểm soát chính xác các thông số này, tạo ra các tấm khuôn chất lượng cao, phù hợp với các sản phẩm nhựa 2D và 3D [7]. Tuy nhiên, quá trình WAAM đối mặt với các thách thức như ứng suất dư do nhiệt, biến dạng vật liệu và độ hoàn thiện bề mặt chưa tương đương với các phương pháp truyền thống, đòi hỏi nghiên cứu sâu hơn để tối ưu hóa quy trình [8].

Nghiên cứu này tập trung phát triển và tối ưu hóa quy trình chế tạo tấm khuôn bằng WAAM, với mục tiêu xác định các thông số kỹ thuật tối ưu như cường độ dòng điện, tốc độ

nạp dây kim loại và loại vật liệu dây [9]. Một trong những mục tiêu quan trọng là so sánh chi phí sản xuất khuôn bằng WAAM với các phương pháp truyền thống để đánh giá tính khả thi kinh tế, đặc biệt trong điều kiện sản xuất tại Việt Nam, nơi các doanh nghiệp thường đối mặt với hạn chế về nguồn vốn [10]. Ngoài ra, nghiên cứu phân tích các đặc tính cơ học của khuôn WAAM, bao gồm độ bền, độ cứng, khả năng chịu nhiệt và độ chính xác hình học, nhằm so sánh với các khuôn chế tạo bằng gia công cơ khí truyền thống [11]. Những phân tích này cung cấp cơ sở để đánh giá ưu thế kỹ thuật của WAAM và khả năng ứng dụng thực tiễn trong ngành công nghiệp nhựa, đặc biệt đối với các sản phẩm nhựa 2D [12].

Về phương pháp, nghiên cứu kết hợp mô phỏng số và thử nghiệm thực nghiệm. Các phần mềm như ANSYS được sử dụng để dự đoán ứng suất và biến dạng trong quá trình tạo hình theo lớp, từ đó tối ưu hóa thiết kế khuôn và quy trình chế tạo. Các thí nghiệm thực nghiệm tập trung vào việc chế tạo các tấm khuôn mẫu bằng WAAM, sử dụng các loại dây kim loại như thép không gỉ hoặc hợp kim nhôm, và đánh giá chất lượng sản phẩm thông qua các phép đo cơ học và kiểm tra không phá hủy. Kết quả nghiên cứu cung cấp các tiêu chuẩn quy trình để đảm bảo chất lượng và độ tin cậy của khuôn WAAM, đồng thời đề xuất các cải tiến nhằm nâng cao hiệu suất và mở rộng phạm vi ứng dụng của công nghệ này.

Về mặt kinh tế, WAAM có tiềm năng giảm chi phí thiết bị và vật liệu so với các phương pháp truyền thống, giúp các doanh nghiệp Việt Nam tiếp cận công nghệ tiên tiến với chi phí hợp lý. Công nghệ này cũng cho phép sản xuất khuôn theo yêu cầu.



2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) là công nghệ in 3D kim loại sử dụng dây kim loại và hồ quang điện để đắp lớp, tạo ra các chi tiết lớn với tốc độ cao và đa dạng vật liệu như thép không gỉ, nhôm, titan. Quy trình WAAM, điều khiển bằng CAD/CAM, làm nóng chảy dây kim loại, đắp từng lớp để tạo hình chính xác. Đối với khuôn nhựa, thép không gỉ và nhôm được ưu tiên nhờ độ bền và khả năng dẫn nhiệt.

WAAM vượt trội với chi phí thấp, giảm lãng phí vật liệu, và không cần khuôn đúc đắt đỏ như phương pháp truyền thống. Công nghệ này cho phép sản xuất nhanh, tạo chi tiết lớn, phức tạp mà các phương pháp như SLM khó thực hiện. WAAM linh hoạt trong thiết kế, dễ dàng chỉnh sửa qua mô hình CAD, đồng thời đảm bảo độ bền và tính chất cơ học tối ưu thông qua điều chỉnh thông số như dòng điện và tốc độ dây.

Trong chế tạo khuôn nhựa 2D, WAAM giảm chi phí và thời gian sản xuất, hỗ trợ tùy chỉnh thiết kế linh hoạt, tạo khuôn phức tạp với độ bền, chịu nhiệt cao. Công nghệ này giảm thiểu lãng phí vật liệu, cho phép tái sử dụng và sửa chữa khuôn, hứa hẹn ứng dụng rộng rãi trong ngành nhựa.

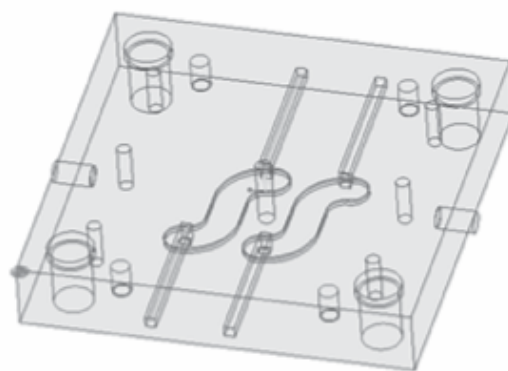
3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Creo Parametric, phát triển bởi PTC, là phần mềm CAD/CAM/CAE mạnh mẽ, hỗ trợ thiết kế, mô phỏng và sản xuất cơ khí. Phần mềm này cho phép mô phỏng chính xác, tối ưu hóa thiết kế và sản xuất khuôn ép nhựa, đảm bảo hiệu quả và độ tin cậy. Kết quả mô phỏng giúp điều chỉnh các thông số, nâng cao chất lượng quy trình sản xuất.

Trong thiết kế sản phẩm nhựa 2D, Creo Parametric mô phỏng hình dạng sản phẩm, hỗ trợ phân tích và tối ưu hóa. Sau khi tách khuôn, phần mềm tạo ra tấm cavity và tấm core. Thay vì giữ nguyên khối, các tấm này được cắt thành nhiều lớp (layer), hình thành các lòng khuôn từ các tầng mỏng. Quy trình này tăng tính linh hoạt, giảm chi phí và thời gian sản xuất so với phương pháp truyền thống.



Hình 1. Hình dạng sản phẩm



Hình 2. Tấm khuôn của khuôn phun ép sản phẩm nhựa dạng 2D

Hình ảnh minh họa từ Creo Parametric cho thấy sản phẩm nhựa 2D và các tấm cavity, core sau khi phân lớp, thể hiện rõ khả năng mô phỏng chi tiết và chính xác của phần mềm. Creo Parametric không chỉ hỗ trợ thiết kế mà còn cải thiện hiệu suất chế tạo khuôn, phù hợp với các yêu cầu phức tạp trong ngành sản xuất nhựa.

Bảng 1. Chỉ số cấp bền Thép C45

Mác thép	Tiêu chuẩn	Độ bền đứt σ_b (Mpa)	Độ bền đứt σ_c (Mpa)	Độ bền dẫn tương đối δ (%)	Độ cứng HRC
C45	TCVN 1766-75	610	360	16	23

Bảng 2. Thành phần hóa học của Thép C45

Mác thép	C (%) min-max	Si (%) min-max	Mn (%) min-max	P (%) tối đa	S (%) tối đa	Cr (%) min-max
C45	0,42-0,50	0,15-0,35	0,50-0,80	0,025	0,025	0,20-0,40

Bảng 3. Đặc tính cơ học của Thép C45

Mác thép	Điều kiện	Yield Strength (Mpa)	Sức căng (Mpa)	Elongation A5 (%)	Độ cứng HRC	Nhiệt độ	Benda- khả năng	Độ dày danh nghĩa, t	
								1,95mm ≤ t ≤ 10.0mm	
								Cán	Nung
C45	Cán	460	750	18	58	820	Bán kính uốn cong (≤90°)	2,0 x t	1,0 x t
	Nung	330	540	30	55	860			
	Nước ngập nước		2270						
	Dầu ngập		1980						

4. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

Trong những năm gần đây, công nghệ sản xuất phụ gia bằng hồ quang dây (Wire Arc Additive Manufacturing - WAAM) đã dần khẳng định vị trí quan trọng trong lĩnh vực chế tạo các chi tiết kim loại kích thước lớn và phức tạp. Một trong những ứng dụng nổi bật là gia công khuôn ép nhựa thông qua hàn đắp các lớp vật liệu kim loại. Hình 3 minh họa chi tiết các mối hàn sau khi tiến hành hàn đắp từng lớp kim loại để hình thành cấu trúc tấm khuôn.

Kết quả chế tạo bằng phương pháp WAAM cho thấy hiệu quả rõ rệt trong việc tạo hình các tấm kim loại dùng làm phần cavity và core của khuôn (Hình 4). Những tấm này là thành phần chính cấu thành lòng khuôn và lõi khuôn trong khuôn ép nhựa. So với các phương

pháp chế tạo khuôn truyền thống vốn đòi hỏi gia công cơ khí tốn kém thời gian và chi phí, phương pháp hàn đắp lớp bằng WAAM giúp rút ngắn đáng kể chu trình sản xuất và tiết kiệm nguyên vật liệu. Thay vì phải phay tiện nguyên khối, kỹ thuật WAAM cho phép xây dựng lòng khuôn bằng cách đắp từng lớp vật liệu kim loại theo hình dạng mong muốn, tạo ra cấu trúc rỗng bên trong để cải thiện khả năng làm mát và giảm khối lượng.



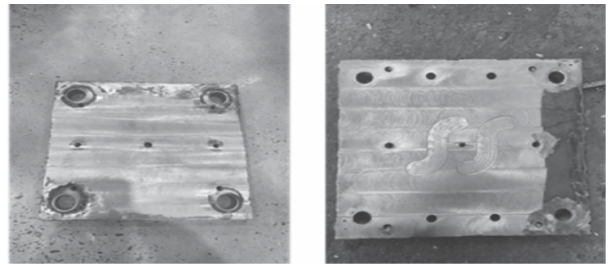
Hình 3. Mối hàn sau khi hàn đắp các tấm



Một trong những lợi ích quan trọng mà WAAM mang lại chính là khả năng tối ưu hóa quá trình chế tạo khuôn. Các đặc điểm như thời gian sản xuất ngắn hơn, chi phí vật liệu thấp hơn, và khả năng tạo hình các kết cấu rỗng cho phép cải thiện hiệu quả làm mát trong khuôn, từ đó tăng tốc độ chu trình ép nhựa và kéo dài tuổi thọ khuôn. Đồng thời, công nghệ này hỗ trợ linh hoạt trong việc tạo các hình học phức tạp, giúp thiết kế khuôn có cấu trúc tối ưu phù hợp với yêu cầu của từng sản phẩm cụ thể.

Tuy nhiên, quá trình áp dụng WAAM vào chế tạo khuôn không phải không có những thách thức. Một trong các vấn đề kỹ thuật thường gặp là độ kín không hoàn hảo của các lớp hàn đắp. Quan sát thực tế cho thấy một số khe hở nhỏ giữa các lớp kim loại chưa được hàn kín hoàn toàn, dẫn đến hiện tượng rò rỉ nước trong quá trình làm mát khuôn. Điều này ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu suất hoạt động của khuôn trong quá trình ép nhựa, đặc biệt là khi cần sử dụng áp suất cao và tuần hoàn nước làm mát. Những lỗi như vậy yêu cầu phải xử lý bề mặt hoặc thực hiện gia công bổ sung để đảm bảo độ kín và độ bền cần thiết cho khuôn vận hành ổn định.

Hình 5 trình bày bộ khuôn hoàn chỉnh sau khi thực hiện các bước hàn đắp và gia công bổ sung. Các chi tiết đã được lắp ráp chính xác, sẵn sàng cho quá trình thử nghiệm. Kết quả từ việc thử ép nhựa bằng bộ khuôn này được minh họa trong Hình 6, với sản phẩm nhựa dạng 2D được tạo hình rõ ràng, đúng với thiết kế ban đầu. Điều này chứng minh rằng công nghệ WAAM hoàn toàn có khả năng đáp ứng các tiêu chuẩn về độ chính xác hình học và độ bền trong chế tạo khuôn cho các sản phẩm nhựa công nghiệp.



Hình 4. Hình ảnh tấm cavity và tấm core sau khi hàn đắp

Từ góc độ kinh tế, công nghệ WAAM chứng tỏ ưu thế vượt trội. Chi phí sản xuất khuôn giảm đáng kể nhờ tận dụng nguyên liệu dây hàn sẵn có và loại bỏ các công đoạn phay tiện nặng nề. Tốc độ hàn đắp lớp cao giúp rút ngắn thời gian chế tạo khuôn, nâng cao năng suất, đồng thời giảm thiểu lượng phế liệu phát sinh trong quá trình sản xuất. Nhờ vậy, các doanh nghiệp có thể rút ngắn chu kỳ đưa sản phẩm ra thị trường, tăng tính cạnh tranh và giảm chi phí đầu tư ban đầu.

Về mặt kỹ thuật, khuôn được chế tạo bằng WAAM có khả năng đáp ứng tốt các yêu cầu về cơ tính như độ bền kéo, độ cứng và khả năng chịu lực. Tuy nhiên, chất lượng bề mặt của các chi tiết hàn đắp thường chưa đạt độ bóng cần thiết, đặc biệt là tại các vùng tiếp xúc trực tiếp với sản phẩm nhựa. Do đó, các công đoạn hoàn thiện bề mặt như mài, phay hoặc đánh bóng vẫn là bắt buộc sau khi hàn đắp, nhằm đảm bảo độ nhẵn và chính xác cho bề mặt làm việc của khuôn.



Hình 5. Hình ảnh bộ khuôn hoàn chỉnh

Một điểm mạnh khác của WAAM là khả năng tùy biến linh hoạt trong thiết kế khuôn. Bằng cách sử dụng phần mềm mô phỏng CAD/CAM kết hợp với điều khiển CNC, các kỹ sư có thể thiết kế khuôn theo yêu cầu đặc biệt mà không bị giới hạn bởi hình dạng khối nguyên vật liệu. Kết cấu rỗng bên trong hoặc kênh làm mát tích hợp có thể được tích hợp ngay từ bước thiết kế, thay vì phải khoan hoặc gia công phức tạp như phương pháp truyền thống. Điều này không chỉ cải thiện hiệu suất làm việc của khuôn mà còn giảm chi phí bảo trì và thay thế.

Tuy nhiên, nhược điểm cố hữu của WAAM vẫn tồn tại, điển hình là sự xuất hiện của các khuyết tật như rỗ khí hoặc lỗ hồng nhỏ trong mỗi hàn. Những khiếm khuyết này không chỉ ảnh hưởng đến độ kín mà còn tiềm ẩn nguy cơ nứt vỡ khi khuôn làm việc dưới điều kiện áp suất cao hoặc nhiệt độ dao động mạnh. Do đó, cần có những cải tiến kỹ thuật trong quá trình hàn, chẳng hạn như tối ưu thông số dòng điện, tốc độ di chuyển, góc nghiêng của đầu hàn, hoặc sử dụng khí bảo vệ hiệu quả hơn để hạn chế quá trình oxy hóa và bọt khí trong mỗi hàn.

Ngoài ra, việc tích hợp các kỹ thuật kiểm tra không phá hủy (NDT) như siêu âm, chụp X-quang hoặc kiểm tra dòng xoáy có thể giúp phát hiện sớm các khuyết tật trong mỗi hàn để từ đó điều chỉnh quy trình sản xuất phù hợp. Sự kết hợp giữa WAAM và công nghệ kiểm tra hiện đại sẽ tạo nền tảng vững chắc cho việc ứng dụng công nghệ này trong môi trường sản xuất công nghiệp đòi hỏi độ chính xác và độ tin cậy cao.



Hình 6. Sản phẩm nhựa dạng 2D sau khi ép thử

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu ứng dụng công nghệ Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) trong chế tạo khuôn phun ép nhựa 2D đã mang lại những kết quả đáng ghi nhận, khẳng định tiềm năng của phương pháp này trong ngành sản xuất. Các kết luận chính được liệt kê như sau:

- Hiệu quả kinh tế: WAAM giảm đáng kể chi phí sản xuất và thời gian chế tạo khuôn so với phương pháp truyền thống, tăng tính cạnh tranh cho doanh nghiệp.
- Chất lượng khuôn: Khuôn WAAM đạt yêu cầu về độ bền và độ cứng, phù hợp cho sản xuất sản phẩm nhựa 2D, nhưng cần cải thiện độ chính xác và chất lượng bề mặt.
- Tính linh hoạt: WAAM cho phép tạo khuôn với hình dạng phức tạp, hỗ trợ tùy chỉnh thiết kế nhanh chóng thông qua mô hình CAD, giảm thời gian điều chỉnh.
- Hạn chế kỹ thuật: Các mối hàn đắp layer dễ bị rỗ khí, gây rò rỉ nước qua khe hở, đòi hỏi gia công bổ sung và cải tiến kỹ thuật hàn.



• Tiềm năng phát triển: WAAM là giải pháp tiên tiến, hứa hẹn mở rộng ứng dụng trong sản xuất khuôn và chi tiết kim loại, cần thêm nghiên cứu để tối ưu hóa quy trình.

Nghiên cứu này đặt nền tảng cho việc ứng dụng WAAM, khuyến nghị đầu tư vào cải tiến công nghệ để nâng cao độ chính xác và chất lượng sản phẩm.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Nguyễn Trọng Hiếu;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Nguyễn Thuỳ Diễm Quyên, Trần Thanh Thưởng, Vũ Quang Huy, Đỗ Văn Đại.

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh đã tài trợ kinh phí cũng như hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này. Bài báo này là sản phẩm của đề tài NCKH với mã số: SV2025-367.❖

Ngày nhận bài: 06/5/2025

Ngày phản biện: 22/5/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Sha, B., Dimov, S., Griffiths, C., & Packianather, M. S. (2007), "Investigation of micro-injection moulding: Factors affecting the replication quality". *Journal of Materials Processing Technology*, 183(2-3), 284-296. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.10.019>
- [2]. Giboz, J., Copponnex, T., & Mélé, P. (2007), "Micro injection molding of thermoplastic polymers: A review". *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 17(6), R96. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/17/6/R02>
- [3]. Bellantone, V., Surace, R., Trotta, G., & Fassi, I. (2013) "Replication capability of micro injection moulding process for polymeric parts manufacturing". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(5-8), 1407-1421. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4577-2>
- [4]. Jelinek, P., & Adámkov, E. (2014), "Lost cores for high-pressure die casting". *Archives of Foundry Engineering*, 14(2), 101-104. <https://doi.org/10.2478/afe-2014-0045>
- [5]. Gong, X., Liu, X., Chen, Z., Yang, Z., Jiang, W., & Fan, Z. (2021), "3D printing of high-strength water-soluble salt cores via layered extrusion forming". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-546973/v1>
- [6]. Liu, F., et al. (2020), "Comparative study on performance and microstructure of composite water-soluble salt core material for manufacturing hollow zinc alloy castings". *Materials Chemistry and Physics*, 252, Article 123257. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123257>
- [7]. Attia, U. M., Marson, S., & Alcock, J. R. (2014), "Design and fabrication of a three-dimensional microfluidic device for blood separation using micro-injection moulding". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 228(6), 941-949. <https://doi.org/10.1177/0954405413510153>
- [8]. Packianather, M., Griffiths, C., & Kadir, W. (2015), "Micro injection moulding process parameter tuning". *Procedia CIRP*, 33, 400-405. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.06.093>
- [9]. Rodrigues, R. O., Lima, R., Gomes, H. T., & Silva, A. M. T. (2015), "Polymer microfluidic devices: An overview of fabrication methods". *U.Porto Journal of Engineering*, 1(1), 67-79. https://doi.org/10.24840/2183-6493_001.001_0007
- [10]. Vaezi, M., Seitz, H., & Yang, S. (2013), "A review on 3D micro-additive manufacturing technologies". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(5-8), 1721-1754. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4605-2>
- [11]. Goodship, V. (Ed.) (2017), "ARBURG practical guide to injection moulding". Smithers Rapra.
- [12]. Sommacal, B., Savic, M., Filippi, A., Kühn, S., & Thieringer, F. (2018), "Evaluation of two 3D printers for guided implant surgery". *International Journal of Oral and Maxillofacial Implants*, 33(4), 743-746. <https://doi.org/10.11607/jomi.6074>