

Hàn ma sát khuấy chi tiết dập bán lỏng từ hợp kim nhôm AK4-1

Friction stir welding of thixoformed AK4-1 aluminum alloy

Ngô Thanh Bình^{1,*}, Лаптева А.Ю.², Đào Ngọc Lâm¹, Huỳnh Đức Thuận¹, Đỗ Mạnh Dũng¹

¹Trường Sĩ quan Kỹ Thuật Quân Sự

²Trường Đại học Tổng hợp Kỹ thuật Quốc gia Matxcova mang tên N.E. Bauman

*Email: binhbauman85@gmail.com

Mobile: 0974889785

Tóm tắt

Từ khóa:

AK4-1; Dập bán lỏng; Hàn ma sát khuấy; Hợp kim nhôm biến dạng; Piston.

Sự chuyển biến của cấu trúc tế vi và cơ tính của vùng chịu ảnh hưởng nhiệt - cơ đã được nghiên cứu trong quá trình hàn ma sát khuấy chi tiết dập bán lỏng từ hợp kim nhôm biến dạng AK4-1. Các kết quả chỉ ra rằng động học của quá trình kết tinh lại và sự phân ly cơ học là những cơ chế chính của tinh luyện hạt. Sơ đồ công nghệ "chi tiết dập bán lỏng + hàn ma sát khuấy" là một giải pháp triển vọng để tối ưu hóa cho các giải pháp thiết kế và công nghệ nhằm chế tạo các chi tiết từ hợp kim nhôm có độ bền cao phục vụ các ngành công nghiệp tên lửa - hàng không vũ trụ và ngành công nghiệp ô tô.

Abstract

Keywords:

AK4-1; Thixoforming; Friction stir welding; Piston; Wrought aluminum alloy.

The microstructural evolution and mechanical properties of thermo-mechanically affected zone were investigated during the friction stir welding (FSW) of the thixoformed wrought aluminum alloy AK4-1. The results indicated that the dynamic recrystallization and mechanical separation are the main mechanisms of grain refinement. A technological scheme of "thixoformed part + friction stir welding treatment" is a promising technique for the optimization of designing and technological solutions for manufacturing components made from high-strength aluminum alloys used rocket-aerospace technology and automotive industries made.

Ngày nhận bài: 13/7/2018

Ngày nhận bài sửa: 08/9/2018

Ngày chấp nhận đăng: 15/9/2018

1. GIỚI THIỆU

1.1. Công nghệ bán lỏng (semi-solid processing)

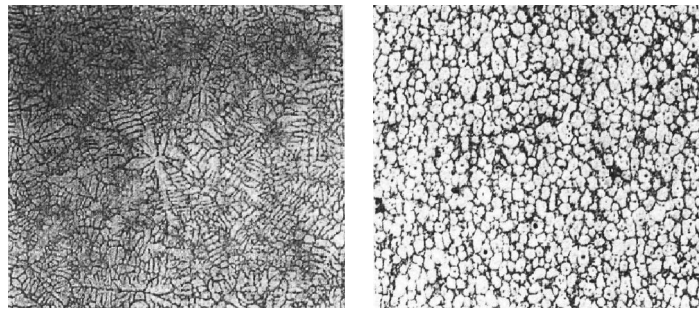
Cuối thế kỷ XIX - đầu thế kỷ XX trong lĩnh vực công nghệ chế tạo phiôi người ta đặc biệt chú ý đến các công nghệ, bằng các công nghệ này quá trình tạo hình các hợp kim không phải ở trạng thái lỏng (như các công nghệ đúc) hay trạng thái rắn (như công nghệ dập, rèn...) mà ở trạng thái hai pha, tức là tồn tại một tỉ phần pha rắn nhất định phân bố đều trong dung dịch kim loại nóng chảy - gọi là công nghệ bán lỏng SSP (semi-solid processing) hay SSM (semi-solid

metal) [1-3]. Điểm đặc biệt của công nghệ này là việc sử dụng hợp kim và kim loại với những đặc tính công nghệ mới, chỉ xuất hiện ở trạng thái bán lỏng và cho phép tạo hình sản phẩm phức tạp qua một bước công nghệ duy nhất với hao phí năng lượng thấp. Những đặc tính công nghệ mới đó là tính xúc biến (thixotropy) và tính siêu giả dẻo (pseudo-superplastic), đã được biết nhiều trong hình thái học nhưng ít được sử dụng trong các lĩnh vực công nghệ tạo hình kim loại và hợp kim. Dung dịch kim loại nóng chảy chỉ xuất hiện các đặc tính nêu trên khi tồn tại hai điều kiện chính: (1)- xuất hiện trong một khoảng tỉ phần pha rắn xác định; (2)- sự phân bố và hình thái học của các phân tử (hạt, tinh thể) rắn trong một khoảng xác định. Những điều kiện này xác định cấu trúc của các công nghệ mới và nó cần phải có những giai đoạn tiên quyết sau:

- chuẩn bị những phân dung dịch bán lỏng từ kim loại nóng chảy bằng cách gián đoạn quá trình chuyển pha kết tinh. Trong dung dịch bán lỏng bắt buộc phải có tỉ phần pha rắn, hình thái của tinh thể rắn và số lượng mầm tinh thể trong một đơn vị thể tích (khoảng 700 mầm/mm³) phù hợp với công nghệ bán lỏng;

- biến dạng tạo hình phải được thực hiện ở chế độ phù hợp nhất cho việc xuất hiện đặc tính xúc biến của dung dịch bán lỏng.

Dung dịch lý tưởng cho các công nghệ bán lỏng là dung dịch có chứa một tỉ phần pha rắn nhất định (40-90 %), có dạng tinh thể cầu tròn ($d_{\text{hạt}} < 100 \mu\text{m}$), phân bố đều bên trong thể tích (Hình 1). Nó không phải là chất lỏng Newton, đây là điểm khác biệt với dung dịch kim loại lỏng bình thường khác. Với dung dịch bán lỏng kể trên ứng suất với vận tốc cắt có mối quan hệ phức tạp hơn định luật Newton. Độ nhớt của các dung dịch bán lỏng phụ thuộc vào tỉ phần pha rắn (tức nhiệt độ), vận tốc cắt, áp suất và thời gian, vì vậy để đánh giá nó người ta sử dụng giá trị độ nhớt biểu kiến.



Hình 1. Cấu trúc nhánh cây điển hình (a) và cấu trúc dạng cầu tròn của hợp kim sau khi đông rắn (b)

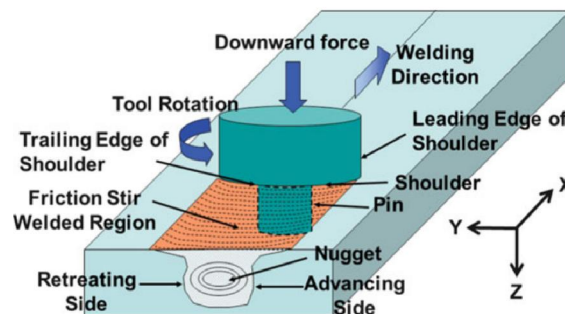
Để ứng dụng các công nghệ bán lỏng cần phải nắm chắc 3 công nghệ ở mức độ cao: luyện kim sản xuất phôi bán lỏng; công nghệ gia nhiệt chuẩn bị phôi bán lỏng để đảm bảo sự xuất hiện hiệu ứng xúc biến; và thành thạo các chế độ, phương pháp đặc biệt để định hình các phôi bán lỏng.

1.2. Công nghệ hàn ma sát khuấy FSW

Trong những năm gần đây đã xuất hiện và ghi nhận sự ứng dụng rộng rãi trong công nghiệp một phương pháp gia công hàn mới đầy triển vọng ở trạng thái rắn, gọi là hàn ma sát khuấy, mà đi kèm với nó là sự thay đổi mãnh liệt về cấu trúc vật liệu được gia công. Trong phương pháp này nhiệt sinh ra do ma sát làm vật liệu nung nóng đến trạng thái dẻo. Sự mài mòn mãnh liệt và việc tổ chức dòng chảy của quá trình khuấy nhờ chuyển động quay và tịnh tiến của dụng cụ chuyên dụng (Hình 2).

Năm 1991 viện hàn TWI đã được cấp bằng sáng chế 9125978.8 về phương pháp hàn ma sát khuấy [4]. Từ thời điểm đó bắt đầu hàng loạt nghiên cứu về công nghệ này ở các nước Thụy Sĩ, Mỹ, Hà Lan, Nhật Bản... Xuất hiện hàng loạt bằng sáng chế và công bố quốc tế, tuy nhiên các thông số chính của quá trình công nghệ và chế độ hàn vẫn là bí mật. Trong giai đoạn chuyển giao này, đã ghi nhận hàng loạt các nghiên cứu về cơ tính và cấu trúc của mối hàn, và bắt đầu các xu hướng về nghiên cứu để ứng dụng trên các biên dạng bề mặt khác nhau từ các loại vật liệu. Hai năm một lần tại một trong các nước khác nhau người ta tổ chức hội nghị thảo luận về những tiến bộ đạt được của công nghệ này.

Mối hàn FSW chất lượng hơn so với hàn hồ quang điện truyền thống. Đây là phương pháp hàn có năng suất và chất lượng cao, cho nên hiện nay nó đã và đang được sử dụng để lắp ghép các chi tiết phổ biến trong công nghệ tên lửa, hàng không vũ trụ, đóng tàu, ô tô và các lĩnh vực khác. Tuy nhiên việc ứng dụng công nghệ FSW vào sản xuất còn có nhiều hạn chế, nguyên nhân chủ yếu phải kể đến là do cần phải có thiết bị chuyên dụng (máy móc và robot công nghiệp) và yêu cầu khắt khe trong chuẩn bị liên kết giáp mối trước khi hàn. Những hạn chế kể trên được bù lại bằng các mối ghép hàn chất lượng, tốc độ hàn tương đối cao và độ bền mối ghép gần độ bền vật liệu gốc.



Hình 2. Hàn ma sát khuấy [5]

Vài chục năm gần đây công nghệ thay đổi cơ tính cục bộ của vật liệu bằng phương pháp FSW đã gây được sự chú ý đặc biệt của các trung tâm nghiên cứu lớn. Cụ thể, piston động cơ đốt trong là một sản phẩm được tối ưu hóa cho nhu cầu sản xuất hàng loạt, nên cần giảm trọng lượng của nó. Chính nguyên nhân này mà những năm gần đây khi sản xuất piston, chủ yếu dùng công nghệ đúc, người ta chuyển từ các hợp kim nhôm đúc sang hợp kim nhôm biến dạng có độ bền cao hơn. Piston cấu tạo gồm phần váy (mỏng) và phần đỉnh (dày) đều yêu cầu cơ tính cao, riêng phần đỉnh còn cần thêm khả năng chịu nhiệt. Trên Hình 3 (trái) là cấu trúc piston được tối ưu bằng các công nghệ truyền thống. Hình 3 là hai phương án piston cùng loại, được sản xuất bằng cùng một công nghệ và từ một hợp kim như nhau. Tuy nhiên chúng khác nhau về khối lượng. Hình 3 (phải) là sản phẩm nâng cao cơ tính phần đỉnh piston bằng FSW. Chiều sâu của lớp gia công chính là chiều sâu lỗ khuyết do phần đầu chót (mũi hàn) để lại trên hình cắt bổ đôi của piston. Cơ tính, khả năng chịu nhiệt phần đỉnh piston sau FSW đã được cải thiện đáng kể, và cấu trúc tế vi vật liệu qua khuấy tốt hơn hẳn [9].

Khi cần phải nâng cao cơ tính cục bộ nào đó của sản phẩm ta có thể sử dụng các giải pháp công nghệ khác nhau. Piston máy nén khí DPII-85 được chế tạo bằng công nghệ dập bán lỏng là một ví dụ, yêu cầu đặt ra là nâng cao cơ tính phần đỉnh. Để giải quyết vấn đề trên nhóm tác giả chọn phương pháp hàn ma sát khuấy FSW.



Hình 3. Piston sau khi xử lý qua FSW (cấu trúc tế vi của piston đã được cải thiện đáng kể)

2. CÔNG NGHỆ CHẾ TẠO PISTON BẰNG DẬP BÁN LỎNG VÀ THỰC HIỆN FSW

2.1. Chế tạo chi tiết piston bằng công nghệ dập bán lỏng [8]

Chế tạo phôi bán lỏng có cấu trúc dạng cầu tròn: Hợp kim nhôm AK4-1 được nấu chảy trong lò điện trở, kim loại lỏng ở nhiệt 660°C được rót vào khuôn kim loại hình trụ thành mỏng (dày 2 mm) nhờ máng nghiêng làm lạnh bằng nước. Khi kim loại lỏng tiếp xúc với thành máng lạnh sẽ bị kết tinh và phát triển thành các nhánh cây. Các nhánh cây vừa sinh ra sẽ bị phá gãy bởi dòng kim loại lỏng đang rót xuống, và chúng bị cuốn vào khuôn, những phần gãy vụn của các nhánh cây sẽ tạo thành các mầm kết tinh trong lòng khuôn. Những phần gãy vụn kể trên khi lăn tròn trên máng nghiêng sẽ được cầu hóa một phần. Ngoài cách mầm kết tinh được hình thành như trên, mầm kết tinh sinh ra cũng có thể do kim loại lỏng tiếp xúc trực tiếp với khuôn, ta sẽ được vô số mầm bên trong lòng khuôn. Giai đoạn tiếp theo là phải điều khiển quá trình lớn lên của các mầm kết tinh này để chúng có thể phát triển thành những hạt dạng cầu tròn. Khi tỉ phần pha rắn của dung dịch bán lỏng đạt khoảng 40-60%, khuôn và phôi bán lỏng sẽ được tô trong nước để lưu giữ được cấu trúc tế vi dạng cầu tròn, là cấu trúc thích hợp cho công nghệ bán lỏng.

Gia nhiệt cho phôi đến trạng thái bán lỏng để tiến hành dập tạo hình: các thỏi đúc chế tạo ở bước trên sẽ được cắt ra thành từng đoạn với khối lượng xác định phù hợp với chi tiết dự kiến sẽ dập ép tạo hình. Trước khi tạo hình, phôi bán lỏng phải được gia nhiệt đến nhiệt độ bán lỏng (620°C) để tiến hành dập. Quá trình này cũng rất quan trọng, phải kiểm soát chặt chẽ về nhiệt và tốc độ gia nhiệt khi nung. Ở nhiệt độ bán lỏng phôi vẫn còn khả năng giữ được hình dáng bên ngoài, nếu giữ nhiệt lâu hoặc nhiệt độ vì một lý do gì đó tăng cao hơn $1-2^{\circ}\text{C}$ so với yêu cầu cũng có thể tạo thành hình “chân voi”, lúc đó không còn thích hợp cho tạo hình.



Hình 4. Mẫu phôi piston máy nén khí ДПЦ-85

Giai đoạn tạo hình sản phẩm piston máy nén khí ДПЦ-85: để tránh mất mát và giảm gradient nhiệt cho phôi, người ta đồng thời nung nóng khuôn và chày ép đến nhiệt độ 250°C .

Phôi sau khi được gia nhiệt đến nhiệt độ thích hợp cho tạo hình sẽ được chuyển đến máy ép thủy lực để tiến hành dập. Piston được dập trên máy ép thủy lực 400 tấn. Sản phẩm sau dập được tôi trong nước. Hình dáng bề ngoài mẫu phôi piston máy nén khí ДПК-85 từ hợp kim nhôm AK4-1 (Hình 4).

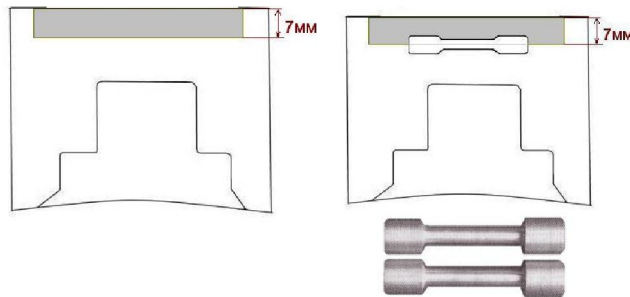
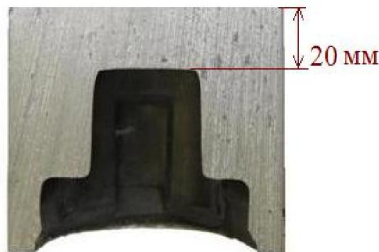
2.2. Hàn ma sát khuấy phần đỉnh piston

Phôi chuẩn bị cho hàn ma sát khuấy (Hình 5). Hàn FSW phần đỉnh piston được thực hiện trên máy phay đứng, được trang bị dụng cụ chuyên dụng phục vụ cho FSW. Các thông số hàn được lựa chọn phù hợp với hợp kim được nghiên cứu. Chiều sâu hàn 7 mm, phương pháp hàn tịnh tiến với bước 2 mm. Sơ đồ bố trí gia công giống như trong các nghiên cứu [6, 7]. Phần được gia công FSW sẽ được cắt ra để chế tạo các mẫu thử kéo và đo độ cứng (Hình 6).

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kết quả thử nghiệm kéo

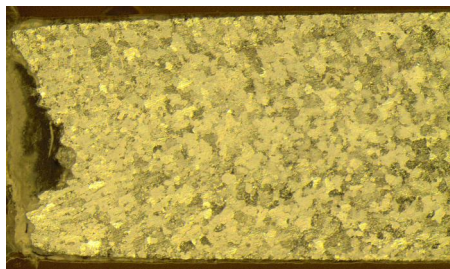
Hình 7-9 là kết quả nghiên cứu vật liệu của 3 mẫu thử kéo được cắt ra từ vị trí gia công FSW. Nhìn vào các cấu trúc tế vi và bề mặt chỗ đứt của các mẫu dễ dàng thấy rằng, phần vật liệu được khuấy chỉ chiếm một phần trong mẫu thử kéo. Mẫu 1 gần như là cấu trúc của vật liệu dập bán lỏng ban đầu, tỉ lệ vật liệu qua FSW khoảng 25%; mẫu 2- khoảng 70%; mẫu 3- cho kết quả kéo cao nhất, vì phần vật liệu qua FSW khoảng 80%, làm ảnh hưởng đáng kể đến cơ tính vật liệu, đặc biệt là độ dẻo so với hai mẫu còn lại.



Hình 5. Phôi chuẩn bị cho hàn ma sát khuấy

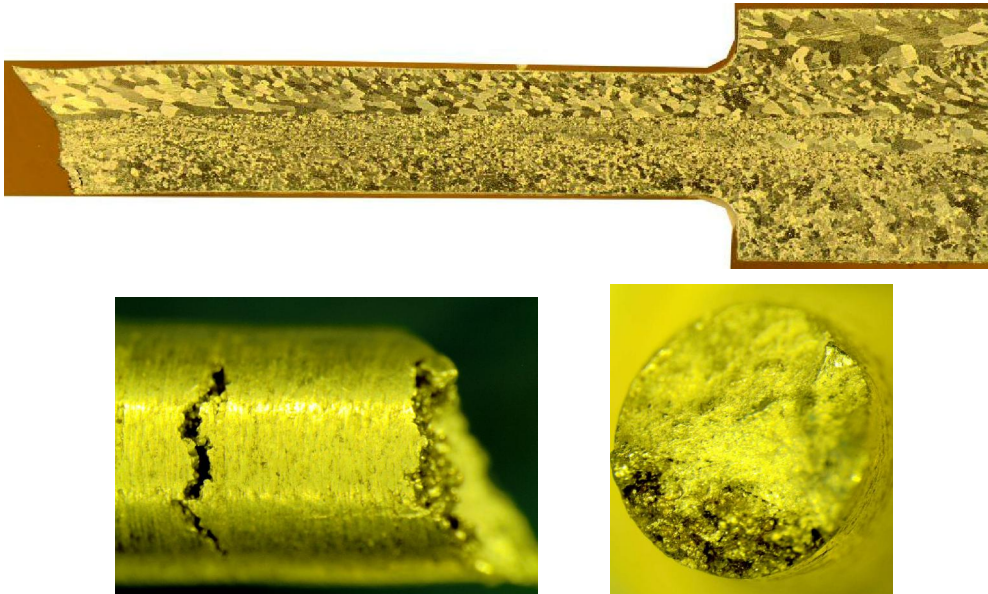
Hình 6. Vùng thực hiện FSW và vị trí cắt mẫu để thử nghiệm kéo

Trong quá trình gia công tiện mẫu, các khuyết tật dạng rỗ hờ của vật liệu dập bán lỏng đã bị che khuất nên mắt thường không thể nhìn thấy, trong các công đoạn nhiệt luyện (NL) tiếp theo nếu thực hiện trong không khí các bề mặt rỗ hờ này sẽ bị oxy hóa.



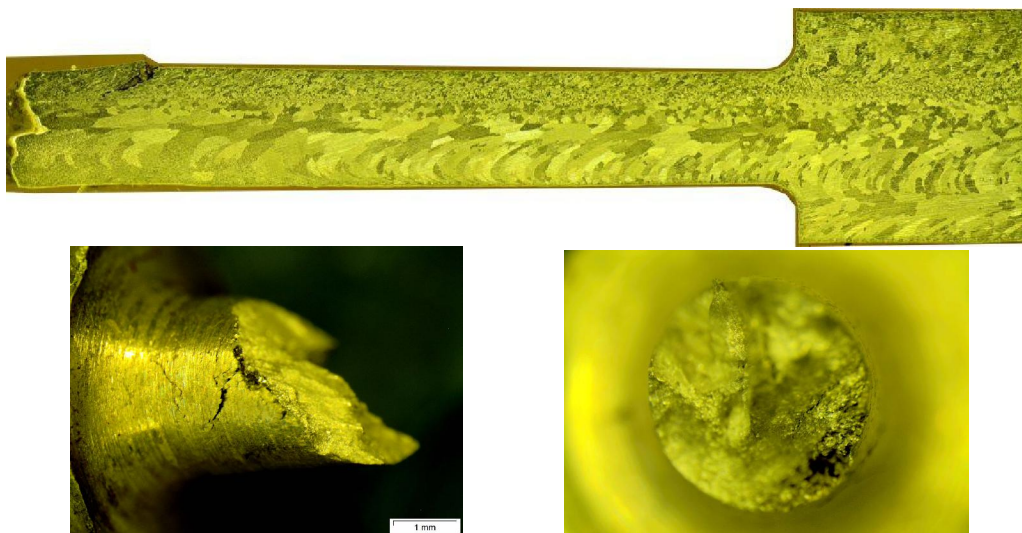
Hình 7. Cấu trúc tế vi (a) và bề mặt chỗ đứt (b) của mẫu №1 sau khi thực hiện FSW và thử kéo

Khi mũi hàn đi qua thì các vùng chịu ảnh hưởng nhiệt - cơ sẽ có sự xáo trộn mạnh về cấu trúc vật liệu, các hạt α -Al đã bị làm mịn. Những cơ chế chính của tinh luyện hạt này là động học của quá trình kết tinh lại và sự phân ly cơ học. Qua quan sát cấu trúc tế vi ở cả 3 mẫu không nhận thấy sự tồn tại của các khuyết tật như lỗ rỗng, rỗ khí... thường gặp của FSW.



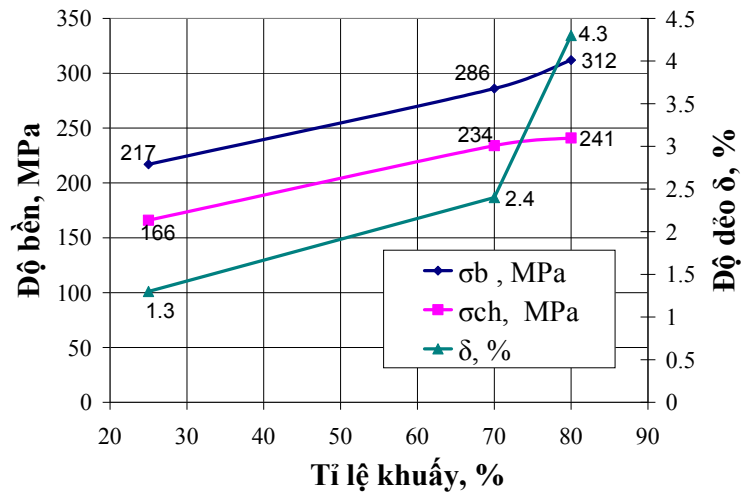
Hình 8. Cấu trúc tế vi (a) và bề mặt chỗ đứt (b, c) của mẫu №2

Các mẫu №2, 3 kích thước hạt α -Al đã bị thay đổi đáng kể và không đồng nhất theo chiều dày của vật liệu được gia công, nhưng tương đối đồng nhất dọc theo hướng gia công. Nhìn vào bề mặt chỗ đứt khi kéo ta dễ dàng nhận thấy khu vực đã trải qua FSW, ở đó kích thước hạt tương đối mịn.



Hình 9. Cấu trúc tế vi (a) và bề mặt chỗ đứt (b, c) của mẫu №3

Ảnh hưởng của FSW và tỉ lệ được hàn khuấy trong mẫu thử đến cơ tính của hợp kim AK4-1 trong chi tiết piston chế tạo bằng công nghệ đập bán lỏng thể hiện qua Hình 10.



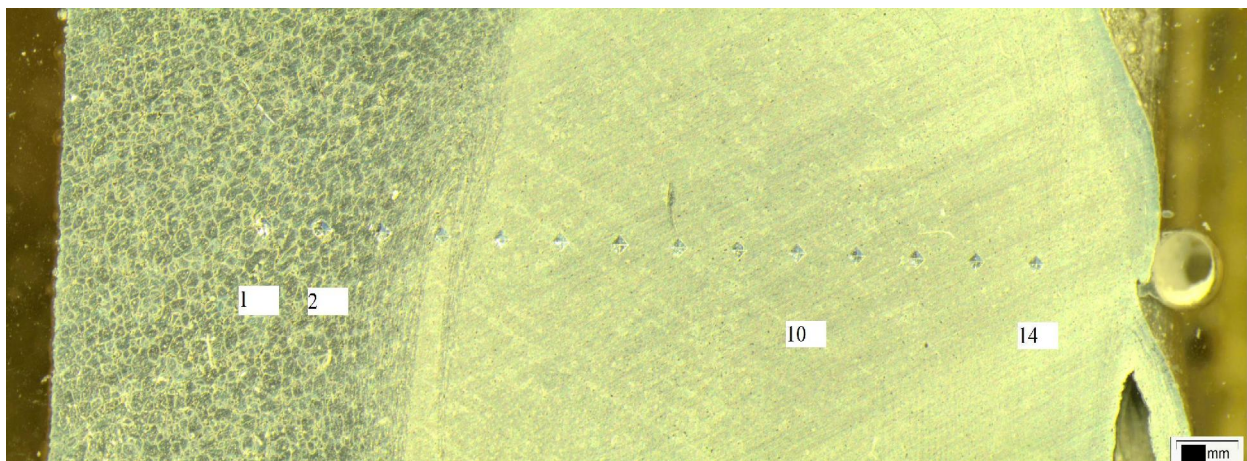
Hình 10. Kết quả thử nghiệm kéo

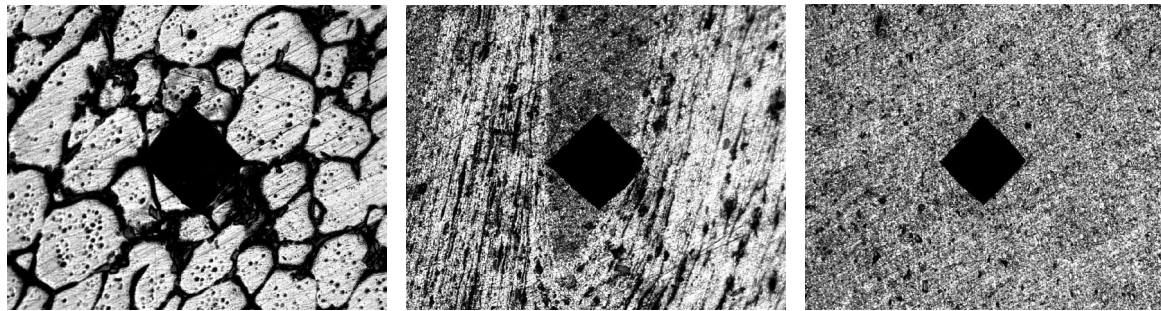
Từ kết quả thử nghiệm kéo có thể đưa ra các kết luận sau đây:

- Các lớp vật liệu dập bằng công nghệ bán lỏng chưa được khuấy sẽ là nơi bị phá hủy sớm do ứng suất tập trung;
- Ứng suất bền và ứng suất chảy tỉ lệ thuận với tỉ lệ phần trăm vật liệu được khuấy, và tiến đến giá trị cơ tính tiêu chuẩn của vật liệu;
- Tăng tỉ lệ khuấy làm tăng mạnh độ dẻo của vật liệu.

3.2. Kết quả khảo sát độ cứng

Độ cứng được đo trên máy đo độ cứng DuraScan 20 ở cả ba vùng (vùng 1-vật liệu dập bán lỏng chưa được khuấy (vùng biến dạng dẻo ít); vùng 2- chuyển tiếp (vùng biến dạng lớn); vùng 3-vùng vật liệu chịu khuấy), đối với vật liệu trước và sau nhiệt luyện (Hình 11). Kết quả đo độ cứng thể hiện trên Bảng 1.





vùng biến dạng dẻo ít

vùng biến dạng dẻo lớn

vùng chịu khuấy

Hình 11. Các vết đo độ cứng và sự thay đổi đặc điểm cấu trúc vật liệu tại các vùng khác nhau trên đỉnh piston trước NL

Bảng 1. Độ cứng HV1 tại các điểm, giá trị trung bình (TB) tại các vùng khác nhau phần đỉnh piston trước và sau NL

		Vùng vật liệu bán đầu (chế tạo bằng đập bán lỏng)			Vùng chuyển tiếp	Vùng chịu khuấy									
Vật liệu trước NL	Vị trí	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
		HV1	62,9	66,5	63,9	77,4	85,5	86,6	83,9	81,3	81,3	83,4	88,9	86,6	91,9
		TB = 64,4			77,4	TB = 86,1									
Mẫu sau thử nghiệm kéo sau NL	№ 1	TB = 116,4			-	-									
	№ 2	TB = 108,8			-	TB = 114,8									
	№ 3	TB = 126			-	TB = 127									

Phân tích kết quả đo độ cứng các vùng khác nhau phần đỉnh piston trước và sau nhiệt luyện ta có những nhận xét sau:

- Trước nhiệt luyện, độ cứng của vật liệu gốc và vật liệu trải qua FSW từ hợp kim AK4-1 có sự khác nhau đáng kể, FSW làm độ cứng tăng hơn 30 %;
- Sau nhiệt luyện, độ cứng của vật liệu gốc và vật liệu trải qua FSW khác nhau ít và trung bình khoảng 116 HV;

4. KẾT LUẬN

Trong bài viết này tác giả đã giới thiệu hai công nghệ mới, còn ít được ứng dụng tại Việt Nam là công nghệ bán lỏng và công nghệ hàn ma sát khuấy. Đã khảo sát khả năng thực hiện FSW đối với vật liệu chế tạo bằng công nghệ bán lỏng, cụ thể là hợp kim nhôm AK4-1. Kết quả cho thấy FSW là phù hợp với vật liệu chế tạo bằng công nghệ bán lỏng, cơ tính được cải thiện nhiều, do đó cần có nhiều nghiên cứu sâu hơn nữa để cho ra một bộ thông số tối ưu dành cho vật liệu bán lỏng.

Có thể sử dụng FSW để nâng cao cơ tính cục bộ cho sản phẩm chế tạo bằng công nghệ bán lỏng. Sơ đồ công nghệ "chi tiết đập bán lỏng + hàn ma sát khuấy" là một giải pháp triển vọng để tối ưu hóa cho các giải pháp thiết kế và công nghệ nhằm chế tạo các chi tiết từ hợp kim nhôm có độ bền cao phục vụ các ngành tên lửa - hàng không vũ trụ và ngành công nghiệp ô tô.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Nafisi, S., Ghomashchi, R. *Semi-Solid Processing of Aluminum Alloys*. Springer: Berlin, Germany, 2016.
- [2]. Kirkwood, D.H., Suéry, M., Kapranos, P., Atkinson, H., Young, K.P. *Semi-Solid Processing of Alloys*; Springer: Berlin, Germany, 2010.
- [3]. Семенов, Б.И., Куштаров, К.М. *Производство изделий из металла в твердожидком состоянии*. М.: Издательство МГТУ им. Баумана, 2010.
- [4]. Thomas, W.M., Nicholas, E.D., Needham, J.C., Murch, M.G., Templesmith, P., Dawes, C.J., "Improvements to Friction Welding" GB Patent Application No.9125978.8, (1991).
- [5]. Mishra, R.S., De, P.S., Kumar, N. *Friction Stir Welding and Processing: Science and Engineering*, Springer, USA, 2014.
- [6]. Корневич А.П., Семенов Б.И., 2011. Локальное повышение механических характеристик готовых изделий и полуфабрикатов на примере колесного диска большегрузного автомобиля из алюминиевого сплава 2014. *Заготовительные производства в машиностроении*. №8, 8-14.
- [7]. Корневич А.П., Семенов Б.И., Чуфринова Я.В., Шилло Г.В., 2009. Особенности технологии сварки трением с перемешиванием. *Заготовительные производства в машиностроении*, № 9, 7-14.
- [8]. Нго, Т.Б. Тиксоформинг фасонных деталей из эвтектических и деформируемых алюминиевых сплавов: дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 186 с.
- [9]. Sarang Shah, Sabri Tosunoglu, 2012. Friction Stir Welding: Current State of the Art and Future Prospects. *The 16th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics*, USA.