

NGHIÊN CỨU XÁC ĐỊNH ĐƯỜNG ĐI CỦA VẾT NỨT CỦA MẪU THỬ VẬT LIỆU HÀN BẰNG PHƯƠNG PHÁP TƯƠNG QUAN ẢNH SỐ VÀ PHẦN TỬ HỮU HẠN

IDENTIFICATION OF CRACK PROPAGATION OF A LEAD-FREE SOLDER MATERIAL USING DIC AND FEM METHODS

Tào Quang Bằng¹, Lê Văn Dương²

¹Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng; tqbang@dut.udn.vn

²Công ty THACO, Khu công nghiệp Chu Lai, Quảng Nam

Tóm tắt - Đối với các thiết bị điện tử, mối hàn liên kết giữa các chi tiết là phần dễ bị hư hỏng nhất trong quá trình làm việc. Vì vậy, việc chẩn đoán hư hỏng của mối hàn đặc biệt là xác định được đường đi của vết nứt có ý nghĩa rất quan trọng để chi tiết làm việc với tuổi thọ cao nhất. Việc phát triển kỹ thuật đo đạc phân tích vết nứt hiện đại đang rất cần thiết và đã nhận được sự quan tâm lớn của các nhà khoa học trên thế giới. Một trong những phương pháp mới được đưa ra để giải quyết vấn đề đó là phương pháp tương quan ảnh số (Digital Image Correlation) cùng với phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH). Vì vậy, trong bài báo này chúng tôi nghiên cứu sự phát triển của vết nứt trong chi tiết chế tạo bằng vật liệu hàn InnoLot bằng thực nghiệm và PTHH. Kết quả nghiên cứu có ý nghĩa quan trọng trong việc dự đoán sự phá hủy của vật liệu nhằm tìm cách ngăn ngừa phá hủy xảy ra.

Từ khóa - Đường đi của vết nứt; DIC; phương pháp tương quan ảnh số; vật liệu hàn; cơ tính

1. Đặt vấn đề

Việc dự đoán sự phát triển của vết nứt để kiểm soát được sự hư hại của chi tiết là công việc rất quan trọng. Ở khía cạnh khác, việc xác định biến dạng của chi tiết khá phức tạp đặc biệt đối với các chi tiết có kích thước nhỏ như các vi mạch điện tử. Vì thế, phương pháp quang học, và phương pháp đo không tiếp xúc và đo biến dạng trên toàn bộ chi tiết, thường được sử dụng bởi vì một vùng đo nhỏ ngăn cản việc sử dụng phương pháp tiếp xúc truyền thống như cảm biến chuyển vị (contact extensometer). Để đáp ứng được yêu cầu đó, phương pháp tương quan ảnh số (Digital Image Correlation – DIC) được phát triển và đã đưa vào sử dụng vì những ưu điểm nổi trội của nó so với các phương pháp đo truyền thống khác. Phương pháp tương quan ảnh số là một phương pháp không tiếp xúc, không phá hủy để đo lường chuyển vị và biến dạng. Phương pháp DIC được đề xuất bởi các nhà nghiên cứu ở Đại học Southern Carolina (Mỹ) vào đầu những năm 1980. Tuy nhiên, trong những năm gần đây, phương pháp DIC mới được quan tâm hơn để đo các trường biến dạng trong nhiều lĩnh vực ứng dụng khác nhau. Cụ thể, phương pháp này đã được sử dụng trong nhiều lĩnh vực và cho các vật liệu khác nhau như vật liệu sinh học, kim loại, hợp kim, polyme, hoặc geomaterials và đã được ứng dụng thành công trong thiết bị điện tử [1-4]. Hơn nữa, sự kết hợp của DIC với việc đo (kiểm tra) độ bền tại chỗ đã được phát triển để xác định biến dạng chi tiết ở kích thước micro và nano. Sự kết hợp này đã được sử dụng rộng rãi để xác định trường phân bố biến dạng, trường biến dạng gần vết nứt, các tính chất cơ học của vật liệu bao gồm module đàn hồi, hệ số Poisson cũng như các hệ số cường độ ứng suất.

Phương pháp tương quan ảnh số là phương pháp mạnh mẽ để phát hiện biến dạng trên bề mặt vật liệu hoặc thành

Abstract - For electronic devices, solder joint is a weakness part that is easily to failure during working. Therefore, the diagnosis of failure of the joint, especially determining the path of a crack, is very important. The development of modern analytical measurement techniques is very necessary and has received a great attention from scientists around the world. One of the newly method to solve the problem is Digital Image Correlation (DIC) and FEM as well. Thus, in this study, the digital image correlation and FEM methods will be used to determine the crack propagation of InnoLot lead-free material. The results of the study are important in predicting the failure of materials in order to prevent failure happens.

Key words - Crack propagation; DIC; digital image correlation; solder materials; mechanical properties

phần khác và được sử dụng phổ biến nhất trong các ứng dụng liên quan đến:

- Kiểm tra vật liệu và đặc tính của nó;
- Nghiên cứu về sự phá hủy và môi;
- Theo dõi độ tin cậy của chi tiết;
- Vật liệu có thành phần hoặc hình dạng phức tạp;
- Đo tĩnh và động của biến dạng hoặc chuyển động.

Trong ngành công nghiệp sản xuất ô tô, một loại vật liệu hàn mới thuộc nhóm vật liệu hàn không chì (lead-free solders) có tên gọi là InnoLot, đã bắt đầu được đưa vào sử dụng trong các thiết bị, chi tiết vi mạch điện tử. Vật liệu này có nhiều điểm ưu việt hơn so với các vật liệu truyền thống và có khả năng làm việc lâu dài ở điều kiện khắc nghiệt (nhiệt độ cao, rung động lớn...) [5, 6].

Vì vậy, trong bài báo này, nhóm tác giả nghiên cứu sự phát triển của vết nứt trong chi tiết chế tạo bằng vật liệu hàn InnoLot bằng thực nghiệm và mô phỏng số. Nhóm tác giả phát triển một thiết bị thí nghiệm kết hợp với những thiết bị trích xuất hình ảnh để xác định trường biến dạng trên toàn bộ chi tiết. Ngoài ra, nhóm tác giả đã sử dụng phương pháp PTHH để kiểm nghiệm. Dựa trên các đặc tính nhớt dẻo của vật liệu hàn, tiến hành tính toán mô phỏng số bằng PTHH để dự đoán đường đi của vết nứt cũng như biến dạng trong chi tiết mối hàn.

2. Nội dung

Phương pháp tương quan ảnh số kỹ thuật số (DIC) đề cập đến một kỹ thuật đo quang và không tiếp xúc, bao gồm các bước thu nhận, lưu trữ và tương quan hình ảnh được phát minh kể từ những năm 1980. Nó tạo ra trường biến dạng trên toàn bộ chi tiết theo tất cả các hướng. Phương pháp DIC đã phát triển thành một kỹ thuật cho thử nghiệm cơ học tại chỗ với độ nhạy cao.

DIC 2-D trong mặt phẳng xuất phát từ khái niệm camera theo dõi chuyển động tính năng trên bề mặt mẫu. Cảm biến camera tập trung vào bề mặt vật thể phẳng để ghi lại hình ảnh của mẫu vật dưới các tải khác nhau. Mẫu vật được sơn hoặc phun với các màu đen và trắng làm các tính năng để cung cấp cho mỗi pixel một giá trị màu xám nằm trong khoảng từ 0 (đen) đến 255 (trắng). Các nguồn sáng rất quan trọng để chiếu sáng các tính năng trắng và đen trên bề mặt mẫu. Ngoài ra, đơn vị tính toán cơ bản là tập hợp con, bao gồm một vài pixel. Bằng cách nhóm nhiều pixel vào một tập hợp con, nó có khả năng tương quan và nhận ra hình dạng và độ dịch chuyển của mọi tập hợp con. Biến dạng cắt có thể được chứng minh thông qua so sánh hình dạng tập hợp con. DIC 2-D đạt được độ chính xác đo 0,02 pixel.

Kỹ thuật tương quan ảnh số bao gồm so sánh các hình ảnh bị biến dạng của bề mặt mẫu với hình ảnh tham chiếu thu được trước khi biến dạng. Thuật toán tương quan đòi hỏi các hình ảnh bề mặt phải được "mịn", thu được bằng phương pháp lốm đốm. Mẫu được sơn bằng máy phun với đường kính vòi phun 0,2 mm. Đầu phun này được điều chỉnh để tạo ra trên các đốm nhỏ một bề mặt đủ mịn (đốm sơn kích thước nhỏ milimet).

Hình ảnh tham chiếu được chia thành các tập hợp con có vị trí được xác định trên các hình ảnh bị biến dạng. Xem xét một tập hợp con tập trung vào điểm $P(x_0, y_0)$ trong ảnh tham chiếu (xem Hình 1). Một điểm $Q(x_i, y_i)$ trong tập hợp con này trở thành điểm $Q'(x'_i, y'_i)$ sau khi biến dạng trong tập hợp con đích bằng cách biến đổi sau:

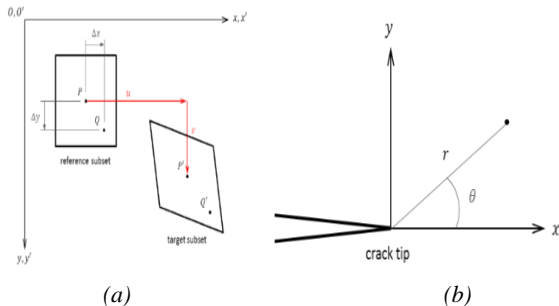
$$\begin{aligned} x'_i &= x_i + u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y \\ y'_i &= y_i + v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y \end{aligned} \quad (1)$$

Trong đó:

u và v là các thành phần chuyển vị của các tập hợp tham chiếu $P(x_0, y_0)$;

$\partial u / \partial x, \partial u / \partial y, \partial v / \partial x, \partial v / \partial y$: là các gradient của chuyển vị $\Delta x = x_i - x_0, \Delta y = y_i - y_0$.

Để ước tính mức độ tương tự giữa tập hợp tham chiếu và tập hợp con bị biến dạng, hệ số tương quan được tính theo một tiêu chí cụ thể từ tập hợp các điểm của tập hợp con. Bằng cách tìm kiếm giá trị cực trị của hệ số này, có thể xác định được độ dịch chuyển của điểm P.



Hình 1. (a) Phương pháp DIC, (b) tham chiếu cực liên quan đến đầu vết nứt

Phần mềm được sử dụng trong nghiên cứu này là phần mềm mã nguồn mở Ncorr. Trong phần mềm này hai tiêu chí tương quan được áp dụng liên tiếp. Tiêu chí ZNCC trước

tiên được sử dụng để tìm một giải pháp gần đúng (tương quan tốt theo tiêu chí này gần với 1), sau đó tiêu chí ZNSSD được sử dụng để tìm một giải pháp chính xác hơn (tương quan tốt theo tiêu chí này gần bằng 0). Đối với tập hợp con N chứa điểm, biểu thức của hai tiêu chí này được đưa ra bởi

$$\begin{aligned} C_{ZNCC} &= \frac{\sum_{i=1}^N (f_i - \bar{f})(g_i - \bar{g})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (f_i - \bar{f})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (g_i - \bar{g})^2}} \\ C_{ZNSSD} &= \sum_{i=1}^N \left(\frac{f_i - \bar{f}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (f_i - \bar{f})^2}} - \frac{g_i - \bar{g}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (g_i - \bar{g})^2}} \right)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

Trong đó:

$f_i = f(x_i, y_i)$ và $g_i = g(x'_i, y'_i)$: biểu diễn các mức tương phản của điểm i trong tập con tham chiếu và tập con bị biến dạng tương ứng.

$\bar{f} = \sum_{i=1}^N f_i / N$ và $\bar{g} = \sum_{i=1}^N g_i / N$: biểu thị các giá trị trung bình của các mức tương phản của hai tập con.

3. Vật liệu và quá trình thí nghiệm

3.1. Vật liệu và chi tiết thí nghiệm

Trong nghiên cứu này, vật liệu hàn không chì InnoLot được chọn để nghiên cứu. Thành phần hóa học của vật liệu này được thể hiện ở Bảng 1. Việc nghiên cứu thêm về vật liệu này nhằm làm sáng tỏ thêm về đặc tính của nó cũng như cải tiến bổ sung thêm để sử dụng tốt nhất dưới các điều kiện khắc nghiệt của ô tô.

Bảng 1. Thành phần hóa học của vật liệu hàn InnoLot

Sn	Ag	Cu	Sb	Bi	Fe	Al	As	Ni	T _{chảy}	T _{ngủi}
90,8	3,8	0,7	1,54	3,0	0,003	<0,001	0,005	0,15	218 ⁰ C	206 ⁰ C

Để dự đoán chính xác hướng phát triển của vết nứt thì yêu cầu chi tiết thí nghiệm phải có kích thước tương đương hoặc bằng với kích thước chi tiết sử dụng thực tế. Các chi tiết có mỗi hàn sử dụng trong ô tô đều có kích thước rất nhỏ từ vài trăm micromet tới milimet, vì thế tác giả đã lựa chọn chế tạo chi tiết thí nghiệm với kích thước tối đa tới mm. Quy trình chế tạo theo các bước như sau:

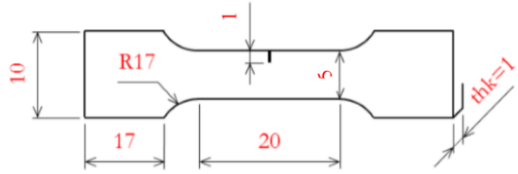
+ Vật liệu hàn InnoLot dạng cuộn được cắt bỏ vào cốc graphite và nấu chảy trong lò với nhiệt độ lớn hơn 100⁰C so với nhiệt độ nóng chảy;

+ Sau khi vật liệu đã chảy loãng sẽ được rót nhanh chóng vào khuôn Inox 304 với kích thước 80x18x16mm. Khuôn này được đặt trong nước với nhiệt độ luôn được giữ ở khoảng 25⁰C - 35⁰C để đảm bảo tốc độ nguội theo yêu cầu của nhà sản xuất;

+ Đợi vài phút sau khi rót, vật đúc nguội và được lấy ra dễ dàng từ khuôn;

+ Vật đúc được đem đi cắt thành nhiều chi tiết nhỏ, mỏng bằng phương pháp cắt dây (EDM). Chi tiết sau khi cắt có kích thước như trên Hình 2 và bán kính góc lượn 17 mm để giảm tập trung ứng suất. Chi tiết thí nghiệm được chế tạo theo tiêu chuẩn của thí nghiệm kéo ATSM.

+ Cuối cùng, do trong quá trình cắt dây, ứng suất dư tồn tại trong chi tiết là rất lớn. Vì vậy, trước khi thí nghiệm, chi tiết được Ram ở nhiệt độ 100⁰C trong 2h sau đó làm nguội trong môi trường không khí tĩnh để loại bỏ hoàn toàn ứng suất dư.



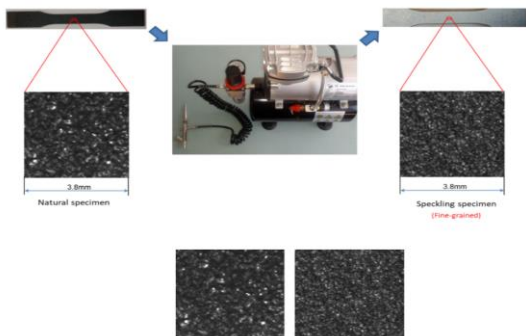
Hình 2. Chi tiết thí nghiệm

Để thực hiện được nghiên cứu xác định đường đi của vết nứt, tác giả đã chế tạo chi tiết theo tiêu chuẩn Single-Edge Notched Tension (SENT) từ vật liệu hàn Innolot (xem Hình 2). Chi tiết SENT là chi tiết được tiêu chuẩn để nghiên cứu sự phát triển của vết nứt vì vậy một vết nứt ban đầu đã được tạo sẵn có kích thước rất nhỏ 1 mm để chắc chắn rằng vết nứt sẽ xuất phát tại đó.

3.2. Quá trình thí nghiệm phương pháp DIC

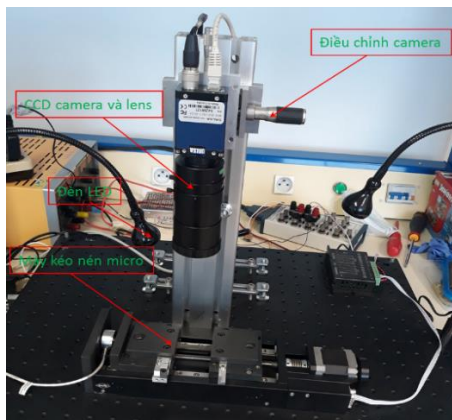
3.2.1. Xử lý bề mặt chi tiết

Đối với phương pháp tương quan ảnh số, độ chính xác của phép đo phụ thuộc vào rất nhiều yếu tố như độ phân giải của camera, nguồn sáng, lens, chất lượng bề mặt chi tiết, độ tương phản của bề mặt chi tiết... Tuy nhiên, độ tương phản của hình ảnh khi chụp bề mặt chi tiết là yếu tố quyết định nhất. Vì vậy, việc chuẩn bị bề mặt chi tiết sử dụng cho phương pháp tương quan ảnh số được chuẩn bị rất kỹ lưỡng. Phương pháp thường được sử dụng là phương pháp tạo vết đốm (speckling). Hình 3 thể hiện quy trình xử lý bề mặt bằng phương pháp tạo vết đốm và sự khác nhau giữa bề mặt chi tiết trước và sau khi xử lý bề mặt.



Hình 3. Xử lý hình ảnh cho phương pháp DIC

3.2.2. Các thiết bị sử dụng trong hệ thống DIC



Hình 4. Hệ thống thí nghiệm tương quan ảnh số DIC

Để hình ảnh thu được và sử dụng cho phương pháp tương quan ảnh số được tốt thì ánh sáng đảm bảo đủ và độ

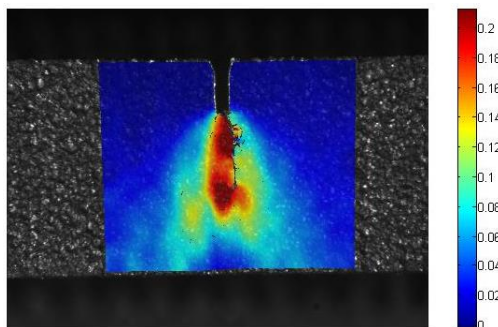
tương phản tốt. Vì vậy, một hệ thống đèn LED được sử dụng để tạo nguồn sáng và đảm bảo ánh sáng đủ và tốt nhất.

Để tiến hành thí nghiệm với hệ thống DIC, một máy thí nghiệm kéo nén cỡ nhỏ được thiết kế. Hệ thống này sau đó được tích hợp thêm với một CCD Camera và lens với độ phân giải lớn. Hệ thống thí nghiệm được thể hiện ở Hình 4.

4. Kết quả và thảo luận

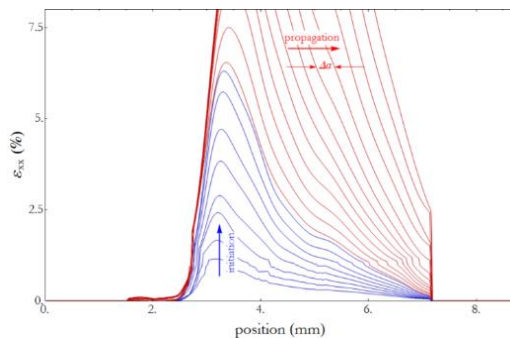
4.1. Xác định đường đi vết nứt bằng phương pháp DIC

Sau khi thiết lập thí nghiệm hoàn chỉnh, chi tiết được thí nghiệm với tốc độ kéo $2,0 \times 10^{-4}$ mm/s. CCD camera được điều chỉnh để có thể chụp 1 ảnh/1s và những ảnh được chụp được lưu lại trong máy tính. Sau đó, các ảnh này sẽ được trích xuất sử dụng cho chương trình tính toán. Chương trình tính toán ở đây có tên là Ncorr, được viết bằng Matlab và là nguồn mở. Kết quả sau khi chạy Ncorr thể hiện trường biến dạng trên toàn bộ chi tiết thí nghiệm từ đó có thể dự đoán được đường đi của vết nứt.

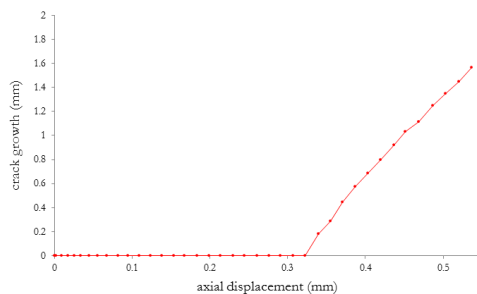


Hình 5. Đường đi của vết nứt

Kết quả cho thấy, Hình 5 thể hiện được đường đi của vết nứt trong chi tiết của vật liệu hàn. Kết quả này có thể dự đoán được vết nứt sẽ di chuyển theo hướng nào và vị trí nào là vị trí bị biến dạng lớn nhất. Ngoài ra, mối quan hệ giữa biến dạng và vị trí cũng như sự phát triển của vết nứt được thể hiện lần lượt trên Hình 6 và Hình 7.



Hình 6. Mối quan hệ giữa vị trí vết nứt và biến dạng



Hình 7. Sự phát triển của vết nứt

Do tác động của ứng suất tập trung, biến dạng dọc trục (theo hướng tác dụng của tải trọng) cao gần đầu của vết nứt và giảm xuống theo hàm của khoảng cách từ đầu vết nứt. Hình 6 cho thấy, biến dạng này được trích xuất theo các bước từ 4s cho tới 200s từ các hình ảnh thu được của quá trình xử lý dữ liệu DIC (50 hình tất cả). Theo thời gian tác dụng lực, khi giá trị biến dạng tăng lên thì vết nứt lan rộng ra từ vết nứt được tạo sẵn ban đầu hay nói cách khác, giá trị biến dạng và độ lan truyền tỉ lệ thuận với nhau.

Hình 7 cho thấy, mối quan giữa sự phát triển của vết nứt (trục tung) và giá trị biến dạng dọc trục (trục hoành) của chi tiết mẫu thử theo thời gian. Khi thực hiện kéo mẫu thử, giá trị biến dạng của mẫu thử tăng, thời điểm vết nứt bắt đầu xuất hiện ở đầu vết nứt (tạo sẵn), sau đó vết nứt phát triển mạnh khi quá trình kéo tiếp tục.

4.2. Sử dụng phương pháp phân tử hữu hạn mô phỏng đường đi của vết nứt

Trong bài báo này, việc mô phỏng được tác giả thực hiện trên phần mềm HYPERWORKS với bộ giải RADIOSS. Trong bài toán thử nghiệm kéo vật liệu (Tensile Test), cần mô phỏng được trạng thái chảy dẻo, đứt của vật liệu. Do đó, cần thiết một bộ giải cho bài toán phi tuyến. Các nguồn phi tuyến bao gồm:

- Hình học: khi vật liệu đến trạng thái chảy dẻo, tiết diện mặt cắt ngang mẫu thử thay đổi. Xuất hiện các điểm necking (thắt cổ chai).

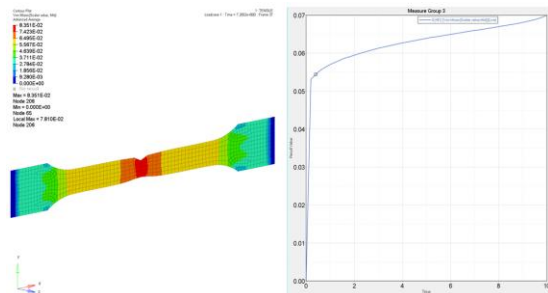
- Vật liệu: Khi qua giới hạn đàn hồi, ứng xử của vật liệu là dạng phi tuyến.

Cấu trúc cơ bản của bài toán bên trong phần mềm hyperworks gồm 4 phần:

- Phần import dữ liệu cad từ các phần mềm thiết kế.
- Phần xử lý mô hình phần tử hữu hạn: Xây dựng mô hình lưới từ mô hình cad, cài đặt thuộc tính vật liệu, khai báo contact, kiểu liên kết: bu lông, mối hàn... Cài đặt điều kiện biên cho bài toán.
- Giải bài toán: Bộ giải Radios sẽ giải phương trình toán học để xác định các nghiệm của bài toán: chuyển vị, ứng suất của vật liệu trên miền phi tuyến.

- Phần xem kết quả tính toán: giúp người dùng đọc các kết quả để phân tích kết quả bài toán biến dạng trên miền phi tuyến.

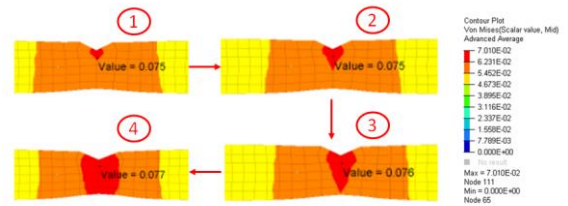
Kết quả tính toán mô phỏng được thể hiện như Hình 8.



Hình 8. Kết quả mô phỏng trên phần mềm HyperView

Theo kết quả mô phỏng từ phần mềm HyperWorks, ta có được các giá trị biến dạng tại các vị trí xung quanh vết nứt. Ngoài ra, ta cũng có thể nhận thấy được sự phát triển

của vết nứt thông qua trường biến dạng trên phần mềm HyperView như thể hiện trên Hình 9.



Hình 9. Sự phát triển của vết nứt thông qua trường biến dạng trên phần mềm HyperView

So sánh kết quả giữa Hình 5 và Hình 9 ta có thể thấy, điểm tương đồng giữa thực nghiệm và mô phỏng như sau:

- + Vết nứt sẽ bắt đầu phát triển từ đỉnh của rãnh cắt được tạo ra ban đầu, nơi có giá trị ứng suất tập trung cao ban đầu.
- + Khi tăng lực kéo tác dụng lên mẫu thử, vết nứt sẽ lan dần ra khu vực lân cận, giá trị ứng suất tại vị trí đỉnh sẽ tăng dần và phát triển ra vùng xung quanh đỉnh vết nứt.

5. Kết luận

Bằng sự kết hợp của 2 phương pháp: Tương quan ảnh số và phương pháp phân tử hữu hạn thông qua các kết quả thí nghiệm và mô phỏng, bài báo này đã làm rõ các vấn đề sau:

- Vật liệu Hàn mới được sử dụng: Innolot, vật liệu này ngày càng được sử dụng nhiều trong hàn các vi mạch của ngành công nghiệp ô tô.
- Quy trình chế tạo chi tiết thí nghiệm: Đúc, cắt dây và xử lý bề mặt được tiến hành cẩn thận và theo tiêu chuẩn quốc tế về tạo vết nứt có sẵn để sử dụng cho phương pháp tương quan ảnh số.
- Phương pháp này giúp nghiên cứu xác định được đường đi của vết nứt từ đó có thể dự đoán sự phá hủy cũng như tìm cách ngăn ngừa phá hủy xảy ra.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển Khoa học và Công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 107.01-2018.32.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Vogel D., Grosser V., Schubert A., Michel B., "MicroDAC strain measurement for electronics packaging structures", *Opt Laser Eng*, 36, 2001, 195–211.
- [2] Vogel D., Kuhnert R., Dost M., Michel B., "Determination of packaging material properties utilizing image correlation techniques", *J Electron Pack*, 124, 2002, 345–51.
- [3] Goh J.Y.L., Pitter M.C., See C.W., Somekh M.G., Vanderstraeten D., "Subpixel image correlation: an alternative to SAM and dye penetrant for crack detection and mechanical stress localisation in semiconductor packages", *Microelectron Reliab*, 44(2), 2004, 259–267.
- [4] Shi X.Q., Pang J.H.L., "In situ micro-digital image speckle correlation technique for characterization of materials' properties and verification of numerical models", *IEEE Trans Compon, Pack Technol*, 27(4), 2004, 659–666.
- [5] Tao Q.B., Benabou L., Le V.N., Hwang H., Luu D.B., "Viscoplastic characterization and post-rupture microanalysis of a novel lead-free solder with small additions of Bi, Sb and Ni", *J Alloys Compd*, 694, 2017, 892-904.
- [6] Tao Q.B., Benabou L., Vivet L., Le V.N., Ouezdou F.B., "Effect of Ni and Sb additions and testing conditions on the mechanical properties and microstructures of lead-free solder joints", *Mater. Sci Eng. A*, 669, 2016, 403-416.