

NGHIÊN CỨU, CHẾ TẠO CẢM BIẾN MÀNG KIM LOẠI ĐO ÁP SUẤT GIÁN TIẾP Ở NHIỆT ĐỘ CAO SỬ DỤNG CƠ CẤU CÂN BẰNG LỰC KHÍ NÉN

RESEARCH AND MANUFACTURE OF INDIRECT METAL DIAPHRAGM PRESSURE SENSORS AT HIGH TEMPERATURES USING A PNEUMATIC FORCE-BALANCE MECHANISM

TS. **Đồng Phạm Khôi**^{1,*}, ThS. **Lê Thanh Bình**², ThS. **Lê Xuân Hùng**²,
TS. **Vương Hùng Dũng**¹, ThS. **Tăng Hải Nam**¹

¹Trung tâm Nhiệt đới Việt - Nga

²Học viện Kỹ thuật quân sự

*Email tác giả liên hệ: khoihvktqs@gmail.com

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu, thiết kế và chế tạo cảm biến áp suất màng kim loại gián tiếp sử dụng cơ cấu cân bằng lực khí nén (đa tric) hoạt động ở nhiệt độ cao sử dụng trong tổ hợp LAVA. Màng đa tric được chế tạo từ hợp kim đàn hồi đặc biệt Ni36CrTiAl (36HXTiO) có đặc tính Elinvar, đảm bảo độ ổn định mô đun đàn hồi trong dải nhiệt độ rộng. Thân đa tric được chế tạo từ thép không gỉ 08Cr18Ni10 và được hàn kín với màng bằng công nghệ hàn laser vòng kín nhằm bảo đảm độ kín khí và độ bền nhiệt. Các thử nghiệm đánh giá được thực hiện trên 70 mẫu đa tric bao gồm: kiểm tra độ suy giảm áp suất sau 24 giờ, đánh giá sai lệch áp suất so với giá trị lý thuyết ở 125 °C và thử nghiệm áp suất hơi bão hòa của nước trong hệ kín. Kết quả cho thấy độ suy giảm áp suất nằm trong giới hạn ± 7 mmHg. Sai lệch giữa áp suất đo được và giá trị tính toán lý thuyết dao động từ -7,0 đến +6,8 mmHg, tương đương độ chính xác khoảng 0,35 %FS trong dải đo 0 - 2000 mmHg. Thử nghiệm áp suất hơi bão hòa trong khoảng 60 - 90 °C cho thấy sai số của đa tric luôn nhỏ hơn ± 7 mmHg so với giá trị lý thuyết. Thử nghiệm đối chứng trên 320 mẫu thuốc phóng cho thấy tỷ lệ trùng khớp về phân cấp chất lượng đạt 96,9% so với đa tric Liên bang Nga. Các kết quả nghiên cứu khẳng định khả năng làm chủ công nghệ thiết kế và chế đa tric đáp ứng yêu cầu kiểm định đạn dược bằng phương pháp áp kế trên tổ hợp LAVA.

Từ khóa: Cảm biến áp suất; Ni36CrTiAl; Cân bằng lực khí nén; Tổ hợp LAVA; Đa tric; Thuốc phóng; Hàn Laser.

ABSTRACT

This paper presents the research, design, and manufacturing results of indirect metal diaphragm pressure sensors (da-tric) utilizing a pneumatic force-balance mechanism for high-temperature operations within the LAVA system. The da-tric was developed using reverse engineering techniques based on an original model, combining material composition analysis, mechanical design, and the establishment of a manufacturing process suitable for domestic technological

conditions. The sensor diaphragm is fabricated from a specialized Ni36CrTiAl (36HXTiO) elastic alloy with Elinvar characteristics, ensuring elastic modulus stability across a wide temperature range. The sensor body is constructed from 08Cr18Ni10 stainless steel and is hermetically sealed to the diaphragm using closed-loop laser welding technology to ensure air-tightness and thermal durability. Evaluation tests were conducted on 70 sensor samples, including a 24-hour pressure drop test, an assessment of pressure deviation from theoretical values at 125 °C, and saturated vapor pressure testing of water in a closed system. The results indicated that the pressure drop remained within ± 7 mmHg, proving that the air-tightness of the sensor structure met the required standards. The deviation between measured pressure and theoretical calculations ranged from -7.0 to +6.8 mmHg, corresponding to an accuracy of approximately 0.35% FS within the 2000 mmHg measuring range. Saturated vapor pressure tests in the 60 - 90 °C range showed that device error was consistently less than ± 7 mmHg compared to theoretical values. Comparative testing on 320 propellant samples demonstrated a quality classification match rate of 96.9% compared to the reference sensors from the Russian Federation. These research results confirm the capability to master the design and manufacturing technology of high-temperature resistant metal diaphragm pressure sensors, meeting the precise measurement requirements of the LAVA system.

Keywords: Pressure sensor; Ni36CrTiAl alloy; Pneumatic force balance; LAVA system; Propellant; Laser welding.

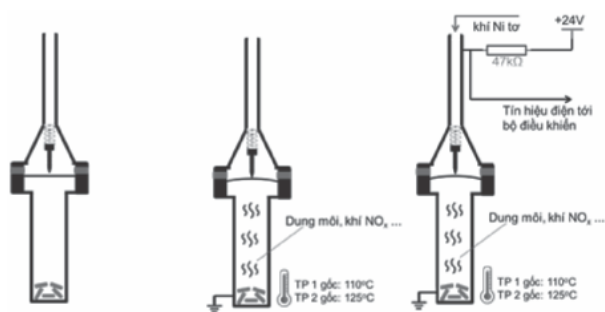
1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong lĩnh vực đo lường và điều khiển tự động, việc chế tạo ra các cảm biến áp suất có độ chính xác cao chịu được các tác nhân ăn mòn hóa học ở nhiệt độ cao luôn đặt ra những thách thức vô cùng phức tạp đối với công nghệ chế tạo và vật liệu. Các cảm biến áp suất thế hệ mới dựa trên nguyên lý điện trở áp điện (piezoresistive) sử dụng màng tinh thể silicon hoặc nguyên lý điện dung (capacitive) mặc dù sở hữu độ nhạy cực cao và khả năng tích hợp vi cơ điện tử (MEMS) vượt trội, nhưng lại bộc lộ những hạn chế khi phải tiếp xúc trực tiếp với các chất phân tích có tính ăn mòn mạnh hoặc hoạt động trong dải nhiệt độ vượt quá ngưỡng giới hạn của vật liệu bán dẫn [1]. Khi nhiệt độ môi trường vượt qua 125 °C, các linh kiện bán dẫn bắt đầu xuất hiện dòng rò nhiệt cường độ lớn, cấu trúc tinh thể silicon bị biến dạng nhiệt phi tuyến, dẫn đến hiện tượng trôi điểm không (zero drift) không thể bù trừ hoàn toàn bằng thuật toán [1]. Hơn nữa, sự hiện diện của các

khí sinh ra từ quá trình phân hủy chất phân tích có thể ăn mòn lớp màng bảo vệ vi mô, làm suy giảm tuổi thọ và độ tin cậy của cảm biến điện tử thông thường [2].

Để giải quyết triệt để sự xung đột giữa môi trường đo lường khắc nghiệt và yêu cầu cao về độ chính xác, giải pháp thiết kế cảm biến áp suất màng kim loại gián tiếp ứng dụng cơ cấu cân bằng lực khí nén đã được nghiên cứu và ứng dụng để chế tạo đa tric dùng trong Tổ hợp LAVA để đánh giá độ an định hóa học của các loại thuốc phóng, thuốc nổ [3]. Đây là loại cảm biến áp suất được cách ly hoàn toàn, trong đó chất cần phân tích được đặt trong buồng phản ứng kín, độc lập, tách biệt với các thành phần điện tử và vi mạch xử lý tín hiệu thông qua một màng ngăn kim loại siêu mỏng có khả năng đàn hồi cơ học cao [2]. Cơ chế cốt lõi của hệ thống này vận hành dựa trên nguyên lý cân bằng áp suất, sử dụng khí trơ chuẩn (khí Nitơ – N₂) để tạo áp suất cân bằng [4].

Hình 1 thể hiện nguyên lý hoạt động của đa tric. Khi mẫu chất cần phân tích được đưa vào buồng phản ứng và được gia nhiệt cưỡng bức (ví dụ với thuốc phóng một góc là 125 °C, thuốc phóng hai góc là 110 °C). Tại vùng nhiệt độ này, các liên kết hóa học của chất phân tích bị bẻ gãy, xảy ra hiện tượng phân hủy nhiệt tạo ra hỗn hợp khí. Sự gia tăng số lượng mol khí trong một thể tích không đổi của buồng phản ứng tuân theo phương trình trạng thái khí lý tưởng, dẫn đến sự gia tăng áp suất (ký hiệu là P_{ph}). Sự chênh lệch áp suất giữa buồng phản ứng và buồng đo (lúc này đang ở áp suất khí quyển) tạo ra một gradient lực phân bố đều trên bề mặt của màng kim loại đàn hồi [5]. Dưới tác dụng của trường lực này, màng kim loại bị biến dạng uốn và dịch chuyển tịnh tiến về phía buồng đo. Trong buồng đo thiết kế một hệ thống tiếp điểm cơ điện có độ nhạy cao (kim đa tric), với một đầu kim được định vị chính xác cách màng một khoảng khe hở vi mô [6].



Hình 1. Nguyên lý hoạt động của đa tric

Ngay khi màng kim loại chạm vào đầu kim của cơ cấu đa tric do kết quả của biến dạng uốn, mạch điều khiển tín hiệu lập tức được đóng lại. Tín hiệu điện này được truyền về bộ vi điều khiển trung tâm với độ trễ tính bằng mili-giây (ms), khi cần đo áp suất trong buồng phản ứng, bộ điều khiển thực hiện các lệnh mở hệ thống van khí để dòng khí Ni tơ được bơm từ từ vào buồng đo, với áp suất khí Ni tơ tăng

theo hàm tuyến tính [5]. Quá trình bơm khí Ni tơ làm áp suất trong buồng đo (ký hiệu là P_d) gia tăng liên tục. Khi P_d tiến tới mức xấp xỉ bằng P_{ph} lực ép từ khí Nitơ tác dụng lên mặt trên của màng bắt đầu triệt tiêu gradient lực gây ra bởi áp suất buồng phản ứng. Ngay tại thời điểm động lực học khi $P_d = P_{ph}$ (trạng thái cân bằng), màng kim loại tách rời khỏi “kim” của đa tric [7]. Sự tách rời này làm hở mạch điện tiếp điểm, bộ điều khiển ngay lập tức ngắt van bơm khí Ni tơ và đồng thời ghi nhận dữ liệu áp suất [5].

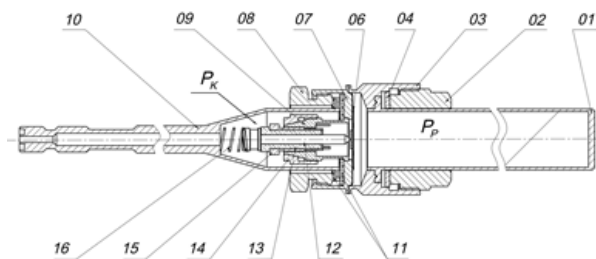
Giá trị áp suất của đường khí Nitơ được đo lường chính xác bằng một cảm biến áp suất phụ trợ có độ chính xác cao được lắp đặt trên đường ống cấp khí (bên trong khối điện - khí nén). Thông số thu nhận được tại thời điểm ngắt mạch chính là sự phản ánh gián tiếp nhưng hoàn toàn đồng nhất với áp suất thực tế bên trong buồng phản ứng. Phương thức đo lường cân bằng điểm không này mang lại một triết lý thiết kế cơ học sâu sắc: Màng kim loại đóng vai trò là một vách ngăn cách ly và là một bộ dò vị trí điểm không (null detector) thay vì phải hoạt động như một lò xo đo lực truyền tuyến tính [5]. Điều này đồng nghĩa với việc các sai số hệ thống sinh ra do sự suy giảm tuyến tính đàn hồi, hiện tượng từ trễ (hysteresis), biến dạng rão (creep) của màng hay sự trôi điểm không do nhiệt độ đều được triệt tiêu một cách tối đa, mở ra khả năng thiết kế một thiết bị đo áp suất có dải đo rộng, hoạt động ổn định ở nhiệt độ lên tới 150 °C với độ chính xác cao [8].

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Thiết kế bản vẽ cơ khí

Thiết kế cảm biến áp suất dựa trên mẫu có sẵn là một quá trình kỹ thuật phức tạp, yêu cầu sự kết hợp giữa việc trích xuất thông số hình học thực thể và tính toán khôi phục ý đồ

thiết kế gốc. Đối với dạng cảm biến đo gián tiếp sử dụng phương pháp cân bằng khí Nitơ và màng ngăn cách bằng hợp kim đàn hồi đặc biệt, quy trình thiết kế tập trung vào việc đảm bảo tính tuyến tính của màng gân và độ nhạy của tiếp điểm “màng – kim” [9].



Hình 2. Mặt cắt ngang của thân đa tric

Hình 2 thể hiện cấu tạo và các chi tiết cấu thành đa tric. Đa tric có hai buồng - buồng phản ứng P_P và buồng đo P_K , ngăn cách nhau bởi màng kim loại 06 được hàn chặt và kín khít với thân trên và thân dưới của đa tric. Màng là một tấm kim loại mỏng có dập các gân đồng tâm để tăng mức độ linh động. Kim 12 được cách điện khỏi thân vỏ bằng đệm 13. Vị trí của kim trên trục thẳng đứng được điều chỉnh bởi ống ren 15, ống ren này được khóa chặt bởi ốc 14. Kim 12 được ép chặt bởi lò xo 16 có khả năng tiếp xúc điện, nghĩa là khi làm việc kim chỉ có khả năng di chuyển lên phía trên. Lò xo 16 đồng thời thực hiện tiếp xúc điện với ống nổi dẫn khí 10. Qua ống nổi 10 khí nén được bơm vào buồng đo. Ống nổi dẫn khí 10 còn có

chức năng dẫn tín hiệu điện, nó được cách ly với thân dưới của đa tric bằng các lớp gioăng 11. Độ kín của buồng đo được đảm bảo bằng cách siết chặt ốc 08. Ống (cốc) phản ứng 01, cùng với nút màng, tạo nên buồng phản ứng. Nó được nén bởi đệm 04 bằng cách siết chặt ốc 02.

2.2. Xác định thành phần và lựa chọn vật liệu

Việc nghiên cứu, đo đạc kích thước và xây dựng bản vẽ đa tric chỉ giải quyết được vấn đề hình dạng, kích thước của các chi tiết. Để chế tạo cảm biến áp suất (đa tric) theo mẫu, việc xác định chính xác mác vật liệu của các chi tiết là bước then chốt để đảm bảo sản phẩm có đặc tính cơ lý và độ bền tương đương mẫu gốc.

Bằng phương pháp phân tích phổ, nhóm nghiên cứu đã xác định được mác vật liệu của các chi tiết cấu thành đa tric (Bảng 1). Quá trình xác định vật liệu bằng phương pháp phân tích phổ đã khẳng định vật liệu chế tạo màng đa tric là siêu hợp kim đàn hồi Ni36CrTiAl (mã định danh của LB Nga là 36HXTIO) [10]. Xét về mặt luyện kim học, Ni36CrTiAl là một đại diện ưu tú của họ hợp kim Fe-Ni-Cr kết tủa hóa bền, với thành phần hóa học chủ đạo bao gồm Niken (dao động từ 34,5% đến 36,5%), Crom (11,5% đến 13,0%), kết hợp cùng hàm lượng vi lượng của Titan (2,7% - 3,2%) và Nhôm (1,0% - 1,8%), phần còn lại là sắt [10].

Bảng 1. Mács vật liệu của các chi tiết trong đa tric

TT	Tên mẫu	Mác vật liệu	Tiêu chuẩn
1	Cốc đựng mẫu, Buồng đo, Buồng phản ứng, Thân Đa tric, Đệm kim loại	08X18H10 (08Cr18Ni10)	ГОСТ 5632-72
2	Kim thăm dò	12X18H9 (12Cr18Ni9)	ГОСТ 5632-72
3	Lò xo thăm dò	60C2 (60Si2)	ГОСТ 14959-79
4	Màng Đa tric	36HXTIO (36NiCrTiAl)	ГОСТ 10994-74
5	Ống lót đồng có ren, Đai ốc hãm buồng đo, Đai ốc hãm buồng phản ứng, Đai ốc cố định kim	БрАЖ 9-4 (CuAl9Fe3)	ГОСТ 18175-72

Thành phần giữ vai trò hạt nhân công nghệ chế tạo đa tric chính là màng kim loại ngăn cách giữa buồng phản ứng và buồng đo. Màng này không chỉ phải chịu được áp suất mà còn phải duy trì tính đàn hồi và toàn vẹn cấu trúc trong môi trường ăn mòn ở 150 °C, đồng thời phải sở hữu đặc tính độ nhạy cao với những biến thiên áp suất nhỏ nhất [6].

Cấu trúc vi mô của Ni36CrTiAl sau khi trải qua chu trình xử lý nhiệt cơ học phức tạp - kết hợp giữa cán dẹt biến dạng nguội (cold strain) và ủ hóa già (aging treatment) cho phép hợp kim này đạt được các thuộc tính cơ học quý giá [10]. Độ bền kéo giới hạn (R_m) của vật liệu có thể vượt qua mốc 1200 N/mm² (MPa), đi kèm với độ cứng bề mặt định lượng theo thang Vickers đạt 400-480 HV [11]. Tuy nhiên, lý do tiên quyết khiến Ni36CrTiAl được ứng dụng trong cảm biến đo áp suất nhiệt độ cao nằm ở đặc tính đàn hồi và tính ổn định nhiệt. Mô đun Young của Ni36CrTiAl dao động ổn định trong khoảng 186.500 đến 206.000 N/mm² (tương đương xấp xỉ 186 - 206 GPa) ở nhiệt độ phòng [11]. Một đặc tính quý giá của hợp kim này là hiệu ứng Elinvar (độ đàn hồi không đổi), cho phép hệ số nhiệt của nó được khống chế ở mức rất thấp, đảm bảo độ cứng của màng suy giảm không đáng kể khi nhiệt độ buồng phản ứng tăng lên tới 150 °C.

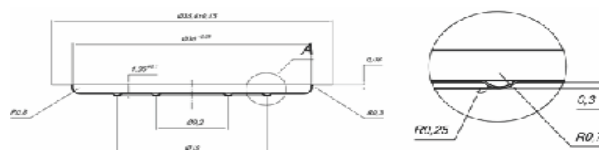
Thêm vào đó, hệ số giãn nở nhiệt tuyến tính của vật liệu trong dải nhiệt độ từ 25 °C đến 150 °C chỉ ở mức rất nhỏ (khoảng 0,8 - 1,4 $\mu\text{m/m}^\circ\text{C}$). Thuộc tính này cực kỳ quan trọng đối với cảm biến màng gián tiếp; nếu màng giãn nở quá mức khi bị nung nóng, nó có thể tự tạo ra độ võng phòng rộp, vô tình chạm vào kim đa tric ngay cả khi không có sự chênh lệch áp suất, gây ra sai số báo tín hiệu giả [12]. Khả năng chống oxy hóa bề mặt và chống ăn mòn hóa học của hợp kim cũng được tối ưu hóa nhờ lớp màng thụ động Crom oxit hình thành

tự nhiên, ngăn chặn sự tác động của hơi nước nóng và các khí phân hủy [10].

2.3. Công nghệ chế tạo đa tric

2.3.1. Gia công chế tạo màng đa tric

Quy trình gia công màng từ tấm hợp kim Ni36CrTiAl (mác 36HXTIO theo tiêu chuẩn GOST 10994-74) với độ dày siêu mỏng 0,08 mm đòi hỏi sự kiểm soát khắt khe về biến dạng cơ học và chế độ nhiệt. Bên cạnh đó, chức năng quang trọng nhất của 2 gân gợn sóng chính là cơ chế bù trừ ứng suất nhiệt [12]. Khối thân đa tric bao ngoài được chế tạo từ thép không gỉ SUS304, một vật liệu có hệ số giãn nở nhiệt cao hơn so với Ni36CrTiAl. Khi hệ thống bị gia nhiệt lên 150 °C, sự không đồng nhất về độ giãn nở giữa vành kẹp của thân đa tric SUS304 và màng Ni36CrTiAl sẽ sinh ra ứng suất nén lên màng [12]. Ở màng phẳng, ứng suất này chắc chắn sẽ gây ra sự mất ổn định đàn hồi, làm màng bật cong đột ngột. Tuy nhiên, các biến dạng gân sóng lượn hoạt động như các khớp co giãn, hấp thụ toàn bộ sự biến dạng nén hướng kính bằng cách thay đổi độ uốn cong cục bộ tại đỉnh gân, giữ cho cao độ của tâm màng không bị trôi lệch, đảm bảo độ chính xác của cảm biến ở nhiệt độ cao [13]. Cấu trúc 2 gân sâu 0,3 mm biến màng thành một màng “mềm” hơn ở phạm vi biến dạng nhỏ, tối đa hóa độ nhạy đáp ứng để phát hiện những chênh lệch áp suất vi mô nhất trước khi tiếp xúc kim.



Hình 3. Cấu tạo màng đa tric

Dưới đây là quy trình công nghệ chi tiết để chế tạo màng với 2 gân sóng có kích thước theo bản vẽ cơ khí:



- Chuẩn bị phôi và cắt biên dạng: Do độ dày màng cực mỏng (0,08 mm), việc cắt phôi phải tránh gây ra hiện tượng lẹm mép hoặc ứng suất dư không đều tại viền màng. Sử dụng phương pháp cắt bằng máy Laser Fiber độ chính xác cao. Cắt phôi theo dạng tròn đường kính 37,5 mm.

- Tạo hình gân sóng: Đây là bước quan trọng nhất để tạo ra đặc tính tuyến tính cho cảm biến áp suất. Sử dụng công nghệ dập nguội với bộ khuôn dập gân sóng chuyên dụng.

- Thông số gân: Gân trong: 9,2 mm; Gân ngoài: 19,2 mm; Biên dạng gân: hình sin với chiều sâu 0,3 mm và bán kính gân 0,7 mm. Biên dạng này giúp giảm thiểu tập trung ứng suất và tăng hành trình cơ khí so với màng phẳng.

- Hàn tiếp điểm tròn: Hàn laser tiếp điểm tròn với đường kính 6 mm, dày 0,6 mm vào đúng tâm màng. Sử dụng phương pháp hàn laser xung để kiểm soát nhiệt lượng, tránh làm thủng màng 0,08 mm. Việc hàn này phải thực hiện trước khi hàn màng vào thân đa tric để đảm bảo độ phẳng của màng. Để tránh việc tia laser bắn thủng màng đàn hồi khi dính tiếp điểm, tia laser được định hướng góc nghiêng và làm nóng tiếp điểm dày trước, sau đó năng lượng truyền dẫn qua mặt tiếp xúc để nóng chảy một lớp giao diện siêu mỏng, kết dính vững chắc mà không phá hủy vật liệu màng nền.

2.3.2. Gia công chế tạo các chi tiết khác của đa tric

Trong quy trình chế tạo đa tric, ngoài bộ phận màng đàn hồi, các chi tiết cơ khí khác như thân đa tric, buồng đo, buồng phản ứng, kim thăm dò và các ống lót đồng đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo độ kín khít và tính chính xác của hệ thống. Công nghệ gia công

CNC (Tiện và Phay) được ưu tiên sử dụng để đạt được độ dung sai chặt chẽ (đến cấp chính xác IT6) và độ bóng bề mặt cao (Một số bề mặt cần đạt đến Ra0,63), đảm bảo khả năng làm việc ở nhiệt độ đến 150 °C.

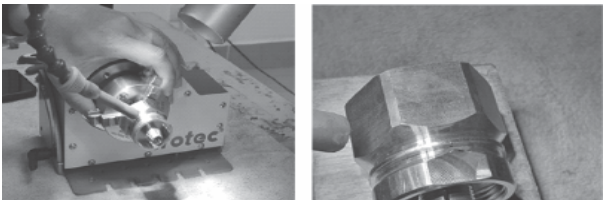
2.3.3. Công nghệ hàn

Quá trình chuyển hóa các bản vẽ thiết kế thành cảm biến vật lý hoạt động hoàn hảo đòi hỏi việc vượt qua một trong những thách thức lớn nhất trong kỹ thuật gia công kim loại: Kỹ thuật ghép nối màng siêu mỏng dị vật liệu [14]. Cảm biến yêu cầu buồng phản ứng và buồng đo phải được cách ly tuyệt đối về mặt khí động học, đồng nghĩa với việc màng Ni36CrTiAl dày 0,08 mm phải được hàn kín vòng viền vào thân của đa tric gia công từ thép không gỉ SUS304 [15]. Các phương pháp hàn hồ quang tay hay hàn bằng điện cực nóng chảy, điện cực trơ sẽ ngay lập tức làm cháy lớp màng 0,08 mm do sự tập trung nhiệt lượng khó kiểm soát, đồng thời gây ra biến dạng cong vênh lớn [15]. Do đó, nhóm nghiên cứu đã lựa chọn công nghệ hàn laser sợi quang (Fiber Laser Welding). Đây là công nghệ có khả năng phân tán năng lượng ở cấp độ vi mô.

Vấn đề cốt lõi của việc hàn màng Ni36CrTiAl lên thép SUS304 không chỉ nằm ở sự chênh lệch độ dày các chi tiết hàn, mà còn ở tính tương thích hóa lý của hai mạng tinh thể hợp kim [16]. SUS304 là thép không gỉ họ austenitic chứa khoảng 18% Cr và 8% Ni, trong khi hợp kim Ni36CrTiAl chứa lượng Ni cao hơn rất nhiều (36%) kèm theo Ti và Al [10]. Khi chùm tia laser nung chảy khu vực tiếp giáp, vùng hàn trở thành một hệ hỗn hợp đa nguyên tố. Titanium và Aluminum trong Ni36CrTiAl là các nguyên tố có lực ái lực với oxy cực kỳ mạnh mẽ [17]. Nếu quá trình hàn không được bảo vệ tối đa, sẽ hình thành các ôxit dạng xốp hoặc rỗ khí (porosity) xen lẫn vào cấu trúc liên

kết, tạo thành các vi kẽ nứt khi vũng hàn đông đặc, làm mất độ kín khít và gây rò rỉ khí [15].

Để giải quyết vấn đề này, sử dụng dòng khí bảo vệ là Argon, độ tinh khiết cao với lưu lượng được kiểm soát chuẩn xác ở mức 10 l/phút được phun trực tiếp vào vũng hàn trong suốt quá trình phát tia. Lớp khí chuyển động này đẩy lùi toàn bộ oxy trong khí quyển, đảm bảo vũng hàn hai loại vật liệu khác nhau kết tinh trong trạng thái sạch, hình thành một liên kết tin cậy và liên tục giữa các lớp vật liệu (Hình 4).



Hình 4. Phương pháp hàn laser vòng kín cho đa tric

Việc kiểm soát nhiệt lượng đưa vào bề mặt là yếu tố mang tính quyết định. Năng lượng phải đủ lớn để làm nóng chảy cả màng 0,08 mm và thâm nhập một phần vào thân đa tric để tạo liên kết ngẫu, nhưng cũng phải đủ nhỏ và ngắn để vùng ảnh hưởng nhiệt không lan rộng vào phần gân sóng của màng, làm thay đổi cấu trúc pha hóa già và giảm độ đàn hồi [15]. Dựa trên quá trình hàn và thử nghiệm lặp lại, nhóm nghiên cứu đã lựa chọn được chế độ hàn tối ưu như Bảng 2.

Bảng 2. Chế độ hàn laser tối ưu trong quy trình chế tạo đa tric

Thông số Vi hàn Laser di vật liệu	Giá trị hiệu chỉnh thực nghiệm	Ý nghĩa động lực học và nhiệt luyện
Công suất tia Laser (Average Power)	15 W	Cung cấp mật độ dòng nhiệt tập trung, đủ để duy trì chế độ hàn dẫn nhiệt nhẹ, không làm cháy màng mỏng.
Chế độ phát tia (Laser Mode)	10 ns	Độ rộng xung ngắn (~10 ns) giúp giảm thiểu hiện tượng gia nhiệt dư thừa, tối đa hóa tốc độ nguội, giữ cấu trúc hạt mịn tại vùng biên.
Tần số xung (Pulse Frequency)	10 kHz	Đảm bảo tỷ lệ chồng lấp vệt hàn (spot overlap) cao, tạo ra đường hàn liên tục, hàn kín tuyệt đối (hermetic seal).
Tốc độ hàn (Travel Speed)	06 mm/s	Cân bằng giữa tốc độ sản xuất và thời gian ổn định vũng hàn, hạn chế hình thành vi nứt rách ở đuôi vũng hàn do ứng suất nhiệt.
Đường kính tiêu cự tia (Spot Size)	Khoảng 0,25	Khu trú vùng nóng chảy theo một đường biên vi mô sát mép ngoài, cách xa và không xâm phạm vào cấu trúc 2 gân sóng bên trong.

2.4. Thử nghiệm các chỉ tiêu

Các bộ đa tric sau khi chế tạo được kiểm tra và thử nghiệm các chỉ tiêu kỹ thuật tại Trung tâm Nhiệt đới Việt - Nga. 70 bộ đa tric đạt yêu cầu thử nghiệm tại Trung tâm Nhiệt đới Việt - Nga tiếp tục được thử nghiệm tại Trung tâm Thí nghiệm lưu mẫu, Cục Quân khí (Hình 5).



Hình 5. Thử nghiệm các tham số của đa tric tại Trung tâm Nhiệt đới Việt - Nga và Trung tâm Thí nghiệm lưu mẫu, Cục Quân khí

2.4.1. Thử nghiệm độ suy giảm áp suất đa tric (độ kín)

Quy trình thử nghiệm độ kín cho các đa tric theo tài liệu TY 6-90 (mục 4.12) [18] có thể được tóm tắt thành ba giai đoạn chính như sau:

Giai đoạn 1: Hút chân không buồng phản ứng đạt mức 100 - 120 mmHg, sau đó vận chặt buồng phản ứng. Đưa đa tric vào lò ổn nhiệt và kết nối với hệ thống. Đo áp suất theo chu kỳ 5 phút/lần trong khoảng 1 - 1,5 giờ.

Giai đoạn 2: Để hệ thống ổn định sau 24 giờ sau đó đo giá trị áp suất và so sánh với giá trị áp suất ở giai đoạn 1. Đa tric đảm bảo kín nếu sự chênh lệch áp suất không vượt quá 7 mmHg.

Giai đoạn 3: Nâng nhiệt độ lò ổn nhiệt lên 150 °C. Sau khi nhiệt độ và áp suất ổn định, ghi lại thời gian bắt đầu và các chỉ số áp suất/nhiệt độ. Tiếp tục để hệ thống ổn định sau 24 giờ sau đó đo giá trị áp suất và so sánh với lúc bắt đầu nung. Đa tric đảm bảo kín nếu sự chênh lệch áp suất không vượt quá 7 mmHg.

2.4.2. Thử nghiệm sự chênh lệch áp suất so với giá trị tính toán

Thử nghiệm theo mục 10.6 tài liệu Tổ hợp LAVA Hướng dẫn sử dụng [19].

- Bước 1: Tiến hành lắp đa tric không có gioăng cao su. Đặt đa tric vào trong lò ổn nhiệt ở nhiệt độ phòng T_p và tiến hành đo áp suất P_{bd} của đa tric khi buồng phản ứng được mở ra trực tiếp với khí quyển. Bước này đo ba giá trị: Nhiệt độ phòng T_p ; giá trị áp suất ban đầu P_{bd} ; giá trị áp suất khí quyển P_{kq} .

- Bước 2: Lấy các đa tric ra, vận kín lại (có gioăng cao su) và lại đặt vào trong lò ổn nhiệt. Tiến hành đo áp suất P_1 . Nâng nhiệt độ lò ổn nhiệt lên $T_{ncn} = 125$ °C và giữ đa tric ở nhiệt độ này hơn 2 giờ. Tiến hành đo áp suất P_2 của đa tric. Tính giá trị áp suất trong buồng phản ứng đã được làm kín theo công thức:

$$P_{tt} = (P_1 - P_0) * K + P_0$$

Ở đây:

$$P_0 = P_{bd} - P_{kq}, K = (273 + T_{ncn}) / (273 + T_p)$$

So sánh các giá trị P_2 và P_{tt} (P tính toán). Những đa tric có giá trị không vượt quá ± 7 mmHg là đạt yêu cầu.

2.4.3. Thử nghiệm sự thay đổi áp suất hơi bão hòa

Kiểm tra với nước cất theo mục 10.7 tài liệu Tổ hợp LAVA Hướng dẫn sử dụng [19].

Phương pháp này dựa trên cơ sở là tính đàn hồi của hơi nước (áp suất cân bằng phía trên pha lỏng). Ở mỗi giá trị nhiệt độ, áp suất này có giá trị không đổi.

Bảng 3. Hiệu số áp suất hơi bão hòa phụ thuộc vào nhiệt độ

Khoảng thay đổi nhiệt độ, °C	Hiệu số áp suất hơi bão hòa trong đa tric, mmHg
$P_{70} - P_{60}$	110
$P_{80} - P_{70}$	147
$P_{90} - P_{80}$	196

Phương pháp: Cho vào trong cốc phản ứng của đa tric 3-5 ml nước cất. Bịt kín đa tric và đặt vào Lò ổn nhiệt. Nâng nhiệt độ tới 60 °C, chờ cho đến khi áp suất trong đa tric được ổn định (20 - 30 phút). Đo và ghi lại áp suất này (P_{60}). Thực hiện tương tự để được các giá trị áp suất P_{70} , P_{80} , P_{90} , rồi lặp lại thao tác đo và ghi. Hiệu số áp suất bên trong đa tric ở các điểm nhiệt gần với giá trị trong Bảng 3 (sai lệch không quá ± 7 mmHg là đạt yêu cầu).

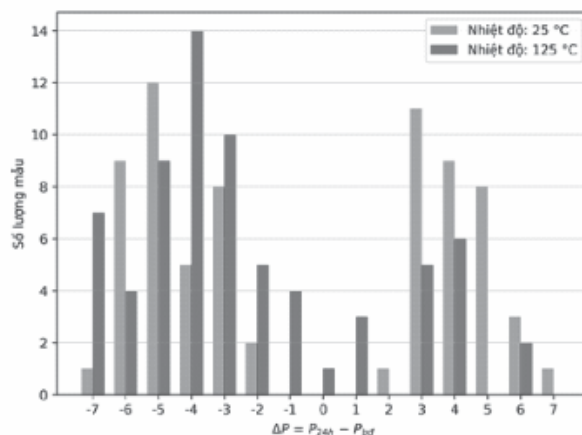
2.4.4. Thử nghiệm đối chứng thuốc phóng

Thử nghiệm 160 mẫu thuốc phóng 2 gốc và 160 mẫu thuốc phóng 1 gốc. Mỗi mẫu thuốc phóng được cân và cho vào 4 cốc thí nghiệm. 2 cốc thử nghiệm với đa tric do Trung tâm Nhiệt đới Việt - Nga chế tạo, 2 cốc thử nghiệm với đa tric của Trung tâm Thí nghiệm Lưu mẫu (đa tric do LB Nga chế tạo). Các mẫu thuốc phóng được thử nghiệm và đánh giá theo các Tiêu chuẩn Quốc gia trong lĩnh vực quân sự, quốc phòng: TCVN/QS 629:2016; TCVN/QS 630:2016 [20], [21].

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Độ suy giảm áp suất đa tric (độ kín)

Thử nghiệm độ kín (độ suy giảm áp suất) được tiến hành trên 70 mẫu cảm biến (VN 001 - VN 070) theo tiêu chuẩn TY 6-90 [18].



Hình 6. Biểu đồ độ suy giảm áp suất sau 24 giờ

Hình 6 là biểu đồ độ suy giảm áp suất sau 24 giờ. Một điểm đáng chú ý trong kết quả là khả năng duy trì độ kín ở điều kiện khắc nghiệt 150 °C. Tại nhiệt độ này, mặc dù áp suất ban đầu (P_{bd}) tăng lên so với điều kiện nhiệt độ 25 °C (do sự giãn nở nhiệt của lượng khí dư trong buồng phản ứng), độ sụt giảm áp suất sau 24 giờ vẫn nằm trong ngưỡng sai lệch cho phép (7 mmHg). Sự biến thiên áp suất ($P_{24h} - P_{bd}$) dao động trong khoảng từ -7 mmHg đến +6 mmHg, cho thấy khả năng hoạt động ổn định ở nhiệt độ cao của màng đa tric. Điều này có thể giải thích nhờ vào đặc tính của hợp kim Ni36CrTiAl (Elinvar). Đây là loại hợp kim có mô đun đàn hồi và hệ số giãn nở nhiệt rất ổn định trong dải nhiệt độ rộng. Việc sử dụng vật liệu này làm màng ngăn đa tric với cơ cấu 2 gân đã giảm thiểu sự tập trung ứng suất tại mỗi hàn khi nhiệt độ thay đổi từ 25 °C lên 150 °C. Kết quả này đặc biệt quan trọng vì cảm biến được thiết kế để làm việc ở nhiệt độ lên tới 150 °C, nơi sự rò rỉ khí nhỏ nhất cũng có thể làm sai lệch và dẫn đến sai số đo vượt mức yêu cầu.

Việc vượt qua thử nghiệm độ kín sau 24 giờ ở 150 °C cho thấy cảm biến có khả năng chịu đựng được nhiệt độ cao trong thời gian dài mà không làm suy giảm các đặc tính đàn

hồi của màng gân. Hệ thống màng và kim thăm dò hoạt động tốt, giúp bộ điều khiển ghi lại giá trị áp suất một cách trung thực nhất trong suốt thời gian thử nghiệm. Sự phối hợp chính xác giữa vật liệu hợp kim đặc biệt và công nghệ hàn tiên tiến đã tạo ra các đa tric đạt tiêu chuẩn chất lượng tương đương mẫu gốc, sẵn sàng cho các bước kiểm tra chức năng tiếp theo như thử nghiệm chênh lệch áp suất, thử nghiệm nước cất và thử nghiệm đối chứng thuốc phóng.

3.2. Sự chênh lệch áp suất so với giá trị tính toán

Thử nghiệm tập trung vào việc đánh giá độ chính xác của phép đo thông qua chênh lệch áp suất thực tế so với giá trị tính toán lý thuyết nhiệt động lực học tại 125 °C.

Bảng 4. Kết quả thử nghiệm sự chênh lệch áp suất so với giá trị tính toán

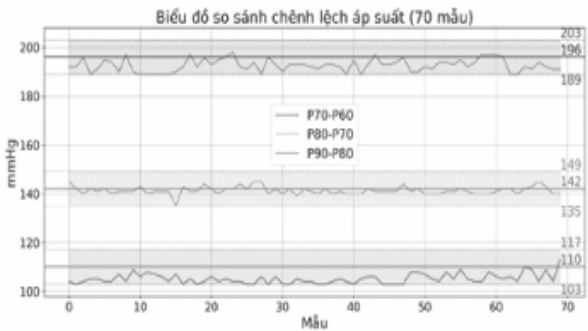
Thông số	Loạt 1 (n = 32)	Loạt 2 (n = 32)	Loạt 3 (n = 6)	Toàn bộ (n = 70)
Nhỏ nhất (mmHg)	-6,3	-7,0	-5,5	-7,0
Lớn nhất (mmHg)	+0,5	-0,1	+6,8	+6,8
Trung bình (mmHg)	-3,9	-4,3	-0,2	-3,7
Độ lệch chuẩn (mmHg)	2,0	2,1	4,0	2,4
Tỷ lệ đạt (%)	100	100	100	100

Kết quả thực nghiệm trên 70 mẫu cho thấy sai lệch tuyệt đối giữa áp suất thực tế (P_r) và áp suất lý thuyết (P_{ll}) dao động trong khoảng từ -7,0 đến +6,8 mmHg (Bảng 4). Với dải đo thiết kế là 0-2000 mmHg, sai lệch tối đa này tương đương với độ chính xác 0,35%FS. Kết quả này chứng minh đa tric có độ nhạy và độ chính xác cao. Việc áp suất thực tế bám sát mô hình toán học dựa trên định luật khí lý tưởng khẳng định rằng thể tích buồng phản ứng được duy trì ổn định, không bị biến dạng dưới tác động của nhiệt độ cao.

3.3. Sự thay đổi áp suất hơi bão hòa

Áp suất hơi bão hòa của nước trong hệ kín là đại lượng phụ thuộc duy nhất vào nhiệt độ và có giá trị xác định theo quy luật nhiệt động học. Trong dải 60 - 90 °C, quan hệ nhiệt độ - áp suất có độ dốc lớn, do đó đặc biệt nhạy đối với đánh giá độ kín hệ thống và độ chính xác của cảm biến áp suất.

Phương pháp thử nghiệm dựa trên tính đàn hồi của hơi nước trong thể tích kín - một đại lượng vật lý không đổi tại nhiệt độ xác định - đã trở thành “thước đo” khách quan để đánh giá độ nhạy của màng đa tric. Việc tắt cả các mẫu (Bảng 5) đều ghi nhận mức tăng áp suất hơi bão hòa nằm trong ngưỡng sai lệch ± 7 mmHg so với Bảng 3 khẳng định rằng đa tric đã phản hồi chính xác với những thay đổi nhỏ về năng lượng của các phân tử nước khi chuyển pha từ lỏng sang hơi.



Hình 7. Biểu đồ thử nghiệm áp suất hơi bão hòa

Bảng 5. Kết quả thử nghiệm áp suất hơi bão hòa

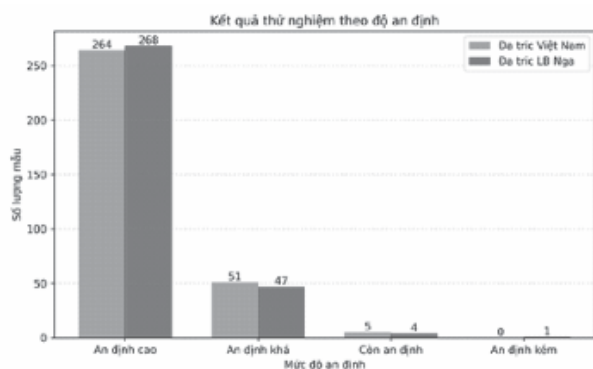
Khoảng nhiệt độ	Danh định (mmHg)	Trung bình thực nghiệm (mmHg)	Độ lệch chuẩn (mmHg)	Hệ số biến thiên (%)
60–70°C	110	105,16	2,09	1,99
70–80°C	147	141,31	1,60	1,13
80–90°C	196	192,60	2,65	1,37

Kết quả thử nghiệm áp suất hơi bão hòa tại Bảng 5 đã xác thực thành công chức năng đo lường của đa tric. Sự sai lệch nằm trong ngưỡng kiểm soát (< 7 mmHg) trên toàn bộ 70 mẫu thử nghiệm khẳng định năng lực làm chủ công nghệ chế tạo đa tric trong nước.

3.4. Thử nghiệm đối chứng thuốc phóng

3.4.1. Phân tích so sánh đánh giá độ an định thuốc phóng

Thử nghiệm đối chứng được thực hiện trên 320 mẫu thuốc phóng theo tiêu chuẩn TCVN/QS 629:2016 và TCVN/QS 630:2016 nhằm xác thực năng lực đo lường thực tế của cảm biến đa tric nội địa. Kết quả phân cấp 320 mẫu thuốc phóng theo độ an định giữa đa tric của Việt Nam và đa tric của LB Nga được thể hiện trong Hình 8.



Hình 8. Phân cấp thuốc phóng theo độ an định

Dữ liệu cho thấy sự tương đồng rất lớn trong biểu đồ phân bố chất lượng. Nhóm

“An định cao” chiếm tỷ trọng lớn nhất ở cả hai dòng đa tric (82,5% đối với mẫu Việt Nam và 83,75% đối với mẫu Nga). Sự lệch nhẹ trong các nhóm phân loại do các nguyên nhân như sai số của đa tric, sai số của thiết bị, sai số trong quá trình cân các mẫu thuốc phóng...

3.4.2. Đánh giá độ sai lệch thời gian dừng thí nghiệm (T_{st})

Độ sai lệch về thời gian ghi nhận thời điểm áp suất đạt ngưỡng dừng thí nghiệm giữa thiết bị Việt Nam và LB Nga $\Delta T_{st} = T_{st}(VN) - T_{st}(Nga)$ là một chỉ số quan trọng để đánh giá độ trễ và tính đồng nhất về thời gian thực của phép đo gián tiếp.

Bảng 6. Độ lệch thời gian dừng thí nghiệm giữa hai loại Đa tric

Khoảng sai lệch (ΔT_{st})	0 phút	10 phút	20 phút	30 phút
Số lượng mẫu ghi nhận	289	23	7	1

Bảng 6 thể hiện độ lệch thời gian dừng thí nghiệm giữa hai loại Đa tric. Phần lớn các mẫu (31/320 mẫu có sai lệch) tập trung ở ngưỡng 10 phút. Trong khi quy trình thử nghiệm độ an định thuốc phóng thường kéo dài 5 giờ với thuốc phóng 1 gốc và 11 giờ với thuốc phóng 2 gốc, mức sai lệch từ 10 đến 30 phút được đánh giá là nằm trong ngưỡng cho phép của sai số chấp nhận được hệ thống.

3.4.3. Độ tin cậy trong phân cấp chất lượng tổng thể

Để khẳng định khả năng thay thế thiết bị nhập khẩu, nghiên cứu tiến hành thống kê sự trùng khớp về phân cấp chất lượng cuối cùng sau thử nghiệm.

Bảng 7. So sánh đối chứng theo phân cấp chất lượng thuốc phóng

Chỉ số so sánh	Số lượng mẫu	Tỷ lệ (%)
Kết quả trùng khớp	310	96,9
Kết quả khác biệt	10	3,1

Bảng 7 thể hiện kết quả so sánh đối chứng theo phân cấp chất lượng thuốc phóng. Tỷ lệ trùng khớp đạt xấp xỉ 96,9% khẳng định độ tin cậy của Đa tric do Việt Nam chế tạo. Chỉ có 10 mẫu (3,1%) cho kết quả khác biệt nhẹ về phân cấp, điều này có thể xuất phát từ sự không đồng nhất cục bộ của mẫu thuốc phóng trong các cốc thí nghiệm khác nhau hoặc sai số ngẫu nhiên của hệ thống thiết bị LAVA.

Qua phân tích thống kê 320 mẫu, các đa tric do Việt Nam chế tạo đã chứng minh được tính ổn định, độ nhạy và độ chính xác phân cấp chất lượng đạt mức 96,9% so với mẫu đối chứng của LB Nga. Các sai lệch về thời gian dừng thí nghiệm ΔT_{st} là không đáng kể, khẳng định khả năng ứng dụng thực tiễn cao của các đa tric này. Việc duy trì được độ chính xác trong phân loại thuốc phóng - vốn đòi hỏi sự kiểm soát chính xác áp suất là bằng chứng thực nghiệm quan trọng nhất. Kết quả này cho phép kết luận Đa tric do Việt Nam chế tạo hoàn toàn đủ điều kiện để thay thế các thiết bị ngoại nhập trong công tác kiểm tra, đánh giá chất lượng thuốc phóng tại Việt Nam.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xây dựng thành công quy trình thiết kế và chế tạo cảm biến áp suất màng kim loại gián tiếp sử dụng cơ cấu cân bằng lực khí nén sử dụng trong tổ hợp LAVA. Trên cơ sở mẫu đa tric gốc của LB Nga, nhóm nghiên cứu đã xác định chính xác cấu trúc hình học, phân tích vật liệu và phát triển công nghệ chế tạo màng cảm biến từ hợp kim Ni36CrTiAl với chiều dày 0,08 mm. Việc kết hợp màng hợp kim Elinvar với vỏ thép không gỉ 08Cr18Ni10 và công nghệ hàn laser vòng kín đã tạo ra cấu trúc đa tric có độ kín khí và độ ổn định cao.

Kết quả thử nghiệm trên 70 mẫu cảm biến cho thấy độ suy giảm áp suất sau 24 giờ luôn nằm trong giới hạn cho phép (± 7 mmHg), chứng tỏ tính toàn vẹn của hệ kín và chất lượng mỗi hàn. Sai lệch giữa áp suất đo được và giá trị tính toán lý thuyết tại 125 °C dao động từ -7,0 đến +6,8 mmHg, tương đương độ chính xác khoảng 0,35 %FS trong dải đo 0 - 2000 mmHg. Các thử nghiệm đo áp suất hơi bão hòa của nước cất trong khoảng 60 - 90 °C cũng cho kết quả phù hợp với giá trị nhiệt động học, với sai số nhỏ hơn ± 7 mmHg. Thử nghiệm đối chứng trên 320 mẫu thuốc phóng cho thấy kết quả phân cấp chất lượng của đa tric nội địa tương đương với sản phẩm của Liên bang Nga với tỷ lệ trùng khớp đạt 96,9%.

Những kết quả này chứng minh đa tric có khả năng làm việc ổn định trong môi trường nhiệt độ cao đến 150 °C, đồng thời khẳng định độ ổn định của công nghệ chế tạo màng gân hợp kim Ni36CrTiAl và công nghệ hàn kín. Nghiên cứu không chỉ góp phần làm chủ công nghệ chế tạo đa tric mà còn tạo cơ sở cho việc nội địa hóa Tổ hợp LAVA và các thiết bị đo áp suất chính xác trong các hệ thống phân tích hóa - nhiệt và thử nghiệm vật liệu nổ. ❖

Ngày nhận bài: 09/3/2026
Ngày phản biện: 23/3/2026

Tài liệu tham khảo:

- [1]. B. F. E. W.p, P. D.w, and S. J.h, “A New Analytical Solution for Diaphragm Deflection and its Application to a Surface-Micromachined Pressure Sensor”. TechConnect Briefs, no. 1999, pp. 640-643, Apr. 1999.
- [2]. “Overview of Metal Pressure Transducer Diaphragms - Hudson Technologies”. Accessed: Mar. 15, 2026. [Online]. Available: <https://info.hudson-technologies.com/blog/overview-of-metal-pressure-transducer-diaphragms>
- [3]. “Keeping Things Balanced: Diaphragm Sensor in Industrial Automation”. Dubai Sensor. Accessed: Mar. 15, 2026. [Online]. Available: <https://www.dubai-sensor.com/blog/keeping-things-balanced-diaphragm-sensor-in-industrial-automation/>
- [4]. “How does a pressure sensor work? Guide & examples | Pondus”. Accessed: Mar. 15, 2026. [Online]. Available: <https://pondus-instruments.com/knowledge/how-does-a-pressure-sensor-works/>
- [5]. “Force-balance Pressure Transmitters | Introduction to Continuous Pressure Measurement | Textbook”. Accessed: Mar. 15, 2026. [Online]. Available: <https://control.com/textbook/continuous-pressure-measurement/force-balance-pressure-transmitters/>
- [6]. “Pressure Sensing Elements | The Design Engineers’ Guide | Avnet Abacus”. Accessed: Mar. 15, 2026. [Online]. Available: <https://my.avnet.com/abacus/solutions/technologies/sensors/pressure-sensors/pressure-sensing-elements/>
- [7]. S. Havill, “Pressure Control Valve and How a Pressure Switch Works”. Accessed: Mar. 15, 2026. [Online]. Available: <https://mastermac2000.com.au/how-pneumatic-pressure-switch-works/>
- [8]. E. Staff, “Diaphragm Pressure Sensors”. Inst Tools. Accessed: Mar. 15, 2026. [Online]. Available: <https://instrumentationtools.com/diaphragm-pressure-sensors/>
- [9]. “Pressure Measurement – Visual Encyclopedia of Chemical Engineering Equipment”. Accessed: Mar. 15, 2026. [Online]. Available: <https://encyclopedia.che.engin.umich.edu/pressure-measurement/>
- [10]. “Ni36CrTiAl Elastic Alloy Weak Magnetism High Elasticity”. Danyang Kaixin Alloy Material Co., Ltd. Accessed: Mar. 15, 2026. [Online]. Available: <https://www.kaixin-alloy.com/sale-37560168-ni36crti-al-elastic-alloy-weak-magnetism-high-elasticity.html>
- [11]. “3J1/Ni36CrTiAl, elastic alloy, Fe-Ni-Cr alloy, 3J1, 3J1 wire, 3J1 bar, Ni36CrTiAl, 3J1 strip, E1bar, Gost standard Product details - Hite Special Alloy”. [Online]. Available: <https://www.hitealloy.com/product/3j1.html>
- [12]. M. D. Giovanni, “Flat and Corrugated Diaphragm Design Handbook”. New York: Routledge, 2017. doi: 10.1201/9780203755969.
- [13]. A. Cao and S. Sun, “Stress analysis under centrifugal load of the multiple corrugated diaphragm coupling based on rotating shell thin film model”. Sci. Rep., vol. 14, p. 10095, May 2024, doi: 10.1038/s41598-024-60933-7.
- [14]. “Laser welding of thin stainless steel sheets”. Narran. [Online]. Available: <https://narran.cz/en/case-study/laser-welding-of-thin-stainless-steel-sheets/>
- [15]. “Laser Welding Stainless Steel - Laser Welder”. Accessed: Mar. 06, 2026. [Online]. Available: <https://laser-welder.net/laser-welding/product/stainless-steel/>
- [16]. Z. Qiangyong, Z. Xianrui, L. I. U. Guixiang, C. Yong, Z. H. U. Zhengyu, and N. I. Zhanzhan, “Laser welding process and numerical simulation of 304 stainless steel”. zggx, vol. 51, no. 4, pp. 1-8, Mar. 2022, doi: 10.7512/j.issn.1001-2303.2021.04.01.
- [17]. K. Touileb et al., “Effect of Microchemistry Elements in Relation of Laser Welding Parameters on the Morphology 304 Stainless Steel Welds Using Response Surface Methodology”. Crystals, vol. 13, no. 7, p. 1138, Jul. 2023, doi: 10.3390/cryst13071138.
- [18]. Кандарацков В. Н., Стволов В. А., “ТВ 6-90 Измерительно-вычислительный комплекс ВУЛКАН – 2000”, 2000.
- [19]. Ветлугин А.А., “Измерительно-вычислительный комплекс ЛАВА Руководство по эксплуатации”. Москва, 2008.
- [20]. TCVN/QS 629:2016, “Thuốc phóng keo - Phương pháp áp kế”, 2016.
- [21]. TCVN/QS 630:2016, “Thuốc phóng keo - Phân cấp chất lượng theo độ an định hóa học bằng Phương pháp áp kế”, 2016.