

NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO MÀNG ĐÀN HỒI TỰ LỰA CHO HỆ THỐNG CÂN BẰNG TẢI THỦY TĨNH CỦA Ổ ĐỖ CHẶN MÁY PHÁT THỦY ĐIỆN CÔNG SUẤT LỚN

ThS. Phan Hữu Thắng¹, ThS. Đào Hữu Mạnh²

^{1*} Phó Viện trưởng Viện Nghiên cứu Cơ khí

^{2*} Phó Giám đốc Trung Tâm KKC Viện Nghiên cứu Cơ khí

Tóm tắt

Các tấm màng đàn hồi tự lựa là cấu phần cốt lõi trong hệ thống cân bằng tải thủy tĩnh của ổ đỡ chặn tại các nhà máy thủy điện công suất lớn. Trong quá trình vận hành, những chi tiết này phải chịu tải trọng dọc trục rất lớn và áp suất thủy lực cao, đòi hỏi vật liệu chế tạo phải có các tính chất cơ học vượt trội, độ bền mỏi cao cũng như khả năng chống ăn mòn trong môi trường dầu thủy lực. Nghiên cứu tập trung vào việc phân tích và lựa chọn vật liệu; tối ưu hóa công nghệ tạo hình kim loại tấm bằng phương pháp dập vuốt qua nhiều công đoạn cho thép không gỉ austenit SUS 304; đồng thời xây dựng quy trình thử tải tĩnh tại hiện trường với yêu cầu kỹ thuật nghiêm ngặt để xác nhận hiệu năng và độ tin cậy của sản phẩm. Kết quả nghiên cứu không chỉ giải quyết bài toán nội địa hóa một phụ tùng chiến lược, giảm thiểu sự phụ thuộc vào nhập khẩu thiết bị, mà còn mở ra triển vọng ứng dụng công nghệ này cho các nhà máy thủy điện khác, góp phần đảm bảo an ninh năng lượng và nâng cao năng lực công nghệ cơ khí chính xác trong nước.

1. Giới thiệu

1.1 Vai trò của ổ đỡ chặn trong tổ máy thủy điện

Trong các nhà máy thủy điện quy mô lớn, đặc biệt là những tổ máy sử dụng tuabin Francis trục đứng, ổ đỡ chặn (*thrust bearing*) là một trong những cụm chi tiết cơ khí quan trọng và phức tạp nhất. Chức năng chính của ổ đỡ chặn là tiếp nhận và đỡ toàn bộ tải trọng dọc trục của phần quay, bao gồm rôto máy phát và bánh xe công tác tuabin, với tổng trọng lượng có thể lên tới hàng nghìn tấn (rôto máy phát và bánh xe công tác tuabin của thủy điện Sơn La 1700 tấn). Sự vận hành ổn định và an toàn của toàn bộ tổ máy phụ thuộc trực tiếp vào hiệu năng của ổ đỡ chặn. Các ổ đỡ chặn hiện đại hoạt động dựa trên nguyên lý bôi trơn thủy động (*hydrodynamic lubrication*), trong đó một màng dầu bôi trơn mỏng được hình thành giữa bề mặt tĩnh (các guốc đỡ) và bề mặt quay (vành gương) nhằm triệt tiêu ma sát tiếp xúc kim loại-kim loại.

Tuy nhiên, việc duy trì một màng dầu có chiều dày đồng đều trên toàn bộ bề mặt làm việc là vấn đề lớn trong kỹ thuật do các yếu tố như biến dạng nhiệt, sai lệch lắp ráp và độ cong của trục. Nếu tải trọng phân bố không đều, một số guốc đỡ sẽ phải chịu tải quá mức, khiến màng dầu cục bộ bị mỏng đi, dẫn đến tăng nhiệt độ, mài mòn và tiềm ẩn nguy cơ sự cố nghiêm trọng cho ổ đỡ. Do đó, việc tích hợp một cơ cấu tự động cân bằng tải trọng giữa các guốc đỡ là yêu cầu thiết kế bắt buộc đối với các ổ đỡ chặn hiện đại.

1.2 Một số ứng dụng về thiết kế của các cơ cấu cân bằng tải

Lịch sử thiết kế ổ đỡ chặn đã chứng kiến sự phát triển của nhiều cơ cấu cân bằng tải khác nhau, các thiết kế ổ đỡ chặn trong hầu hết các trường hợp là tương tự nhau về chức năng đỡ tải của trục tua bin truyền qua guốc đỡ của gối ổ, tuy nhiên việc thiết kế hệ thống hỗ trợ cân bằng chịu tải trọng giữa các guốc đỡ trong gối ổ sẽ khác nhau và tùy thuộc vào từng thiết kế của các nhà sản xuất. Mỗi loại sẽ có ưu và nhược điểm riêng, trong đó có một số thiết kế chính bao gồm:

- **Hệ thống cứng (Rigid systems):** Các thiết kế sơ khai không có cơ cấu hỗ trợ, chỉ phù hợp với các trục nhỏ và tải trọng thấp, rất nhạy cảm với sai lệch lắp ráp.

- **Hệ thống cân bằng cơ học:** Sử dụng các đòn bẩy và khớp nối cơ khí để phân phối lại tải trọng. Hệ thống này tồn tại ma sát bên trong giữa các phần tử và có độ trễ nhất định, dẫn đến cân bằng không hoàn toàn chính xác, đặc biệt dưới tải trọng lớn.

- **Hệ thống cân bằng đàn hồi:** Sử dụng các phần tử đàn hồi (lò xo, đệm cao su) để bù trừ sai lệch. Giải pháp này hiệu quả cho các ổ đỡ quy mô vừa và nhỏ nhưng bị giới hạn về khả năng chịu tải cũng như dải đáp ứng động.

- **Hệ thống cân bằng thủy tĩnh (Hydrostatic balancing systems):** Giải pháp công nghệ tiên tiến nhất, được áp dụng rộng rãi trong các tổ máy công suất lớn. Thiết kế của hãng Alstom (nay thuộc GE) là ví dụ điển hình về sự tinh giản và hiệu quả của nguyên lý này, trong đó các tấm màng kim loại đàn hồi (*membranes*) được sử dụng để tạo ra một hệ thống tự cân bằng thủy tĩnh.

1.3 Các dạng hỏng hóc của tấm màng và tác động ảnh hưởng đến vận hành tổ máy

Tấm màng đàn hồi hoạt động trong môi trường vô cùng khắc nghiệt: chịu áp suất thủy lực cao biến thiên, ngâm trong dầu bôi trơn với nhiệt độ thay đổi, và phải duy trì tính toàn vẹn cơ học qua hàng triệu chu kỳ làm việc. Các dạng hỏng hóc tiềm tàng bao gồm:

- **Hỏng do mỏi (*fatigue failure*):** Do ứng suất chu kỳ lặp đi lặp lại trong quá trình vận hành, các vết nứt vi mô có thể hình thành và phát triển, dẫn đến phá hủy kết cấu.

- **Ăn mòn và mỏi-ăn mòn (*corrosion and corrosion fatigue*):** Sự hiện diện của hơi ẩm hoặc tạp chất hóa học trong dầu thủy lực có thể gây ăn mòn bề mặt, tạo điểm tập trung ứng suất và đẩy nhanh quá trình hỏng do mỏi.

- **Nứt vỡ cơ học (*mechanical rupture*):** Các sự cố vận hành như quá tải đột ngột hoặc sự cố mặt của đĩa vật có thể gây nứt vỡ tấm màng, như đã được ghi nhận trong báo cáo sự cố tại hiện trường.

Một phân tích chi tiết về báo cáo sự cố cho thấy một chuỗi hỏng hóc mang tính hệ thống. Báo cáo ghi nhận đồng thời “một vết nứt trên tấm màng” và “đĩa cao su bên dưới tấm màng bị vỡ”. Đây không phải là hai sự cố độc lập. Tấm màng đàn hồi có chức năng chứa dầu thủy lực áp suất cao để tạo lực nâng cho guốc đỡ. Khi màng bị nứt, khoang dầu tương ứng mất áp suất đột ngột. Toàn bộ tải trọng dọc trục vốn được cân bằng bằng thủy tĩnh lập tức dồn xuống cấu kiện bên dưới. Theo tài liệu thiết kế của **Alstom**, cấu kiện này chính là “đĩa cao su an toàn” (*safety rubber disk*), được thiết kế để gánh tải trọng thông qua biến dạng đàn hồi trong trường hợp màng hỏng. Vì vậy, việc đĩa cao su bị vỡ là hệ quả trực tiếp khi màng bị nứt - nó đã phải chịu một tải trọng va đập vượt quá giới hạn thiết kế. Điều này cho thấy vai trò của tấm màng không chỉ là một chi tiết vận hành thông thường mà còn là tuyến phòng thủ đầu tiên trong hệ thống an toàn nhiều lớp.

Sự hỏng hóc của tấm màng dẫn đến hậu quả nghiêm trọng về mặt kinh tế cho nhà máy vì đây là chi tiết độc quyền của hãng **Alstom**, không có sẵn trên thị trường, việc đặt hàng thay thế đòi hỏi thời gian cấp phụ tùng thay mới phải chờ đợi kéo dài và chi phí rất cao gây thiệt hại lớn cho sản lượng điện quốc gia.

1.4 Mục tiêu nghiên cứu

Trước những vấn đề nêu trên, nghiên cứu này được thực hiện nhằm xây dựng và làm chủ một quy trình công nghệ hoàn chỉnh trong nước để thiết kế, chế tạo và kiểm định các tấm màng đàn hồi tự lựa cho hệ thống ổ đỡ chặn của tổ máy Alstom. Các mục tiêu cụ thể bao gồm:

- Phân tích và lựa chọn vật liệu có các đặc tính cơ lý hóa phù hợp với điều kiện vận hành khắc nghiệt.

- Thiết kế và tối ưu hóa quy trình công nghệ chế tạo dựa trên phương pháp dập vuốt tạo hình nhằm đạt được biên dạng hình học chính xác và các tính chất cơ học mong muốn.

- Xây dựng và triển khai quy trình kiểm tra, thử nghiệm toàn diện để xác nhận hiệu năng, độ tin cậy và sự tương đương của sản phẩm nội địa hóa so với tiêu chuẩn của OEM.

2. Cơ sở lý thuyết và nguyên lý cấu tạo hệ thống ổ đỡ chặn

2.1 Cấu tạo hệ thống ổ đỡ chặn và thuật ngữ kỹ thuật

Để đảm bảo tính chính xác và thống nhất thuật ngữ, bài báo sử dụng hệ thống thuật ngữ kỹ thuật chuẩn hóa dựa trên tài liệu của OEM. Cụm ổ đỡ chặn tự cân bằng bao gồm các thành phần chính sau:

- **Ổ đỡ chặn (*thrust bearing / thrust block*):** Toàn bộ cụm chi tiết chịu tải trọng dọc trục.

- **Guốc đỡ chặn (*thrust pad segment*):** Việt Nam thường được gọi là “xéc măng”, là các tấm hình quạt tạo nên bề mặt đỡ tĩnh. Bề mặt làm việc của guốc đỡ chặn thường được phủ một lớp vật liệu có hệ số ma sát thấp (ví dụ: Teflon).

- **Màng đàn hồi (*membrane*):** Tấm kim loại mỏng, dẻo, có chức năng như một piston thủy lực biên dạng được.

- **Tấm đế (*base plate*):** Tấm nền cứng vững với hệ thống rãnh và lỗ khoan phức tạp để kết nối các khoang dầu của các màng đàn hồi.

- **Vòng đệm làm kín (*seal ring*):** Chi tiết làm kín, giữ vai trò thiết yếu trong việc duy trì áp suất thủy lực trong mỗi khoang màng.

- **Vành gương (*thrust collar / runner*):** Đĩa phẳng được gia công tinh bóng và lắp chặt trên trục chính; vành gương quay cùng rôto và trượt trên bề mặt các guốc đỡ.

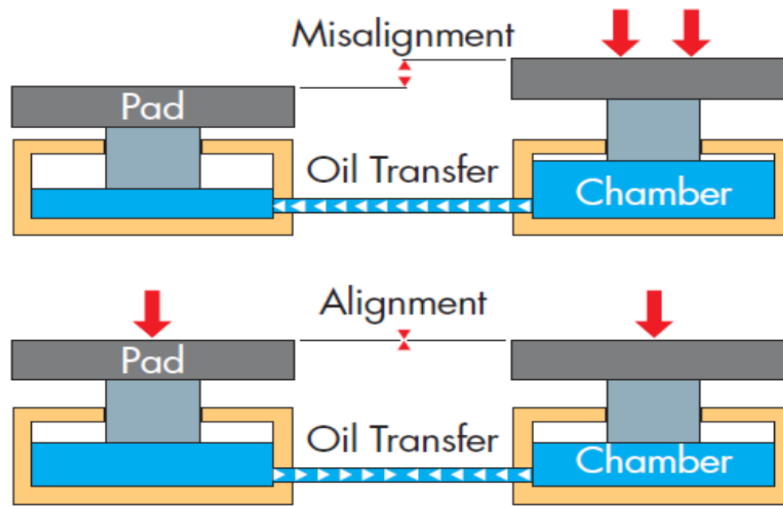
2.2 Cơ chế cân bằng thủy tĩnh

Khi hệ thống ổ đỡ chặn chịu tải, áp suất P trong toàn bộ mạch dầu kín sẽ tự động cân bằng theo định luật Pascal. Cụ thể, toàn bộ tải dọc trục F từ phần quay được phân bố lên 18 guốc đỡ chặn, mỗi guốc đỡ được đặt trên một màng đàn hồi để bịt kín một khoang dầu bên dưới. Tất cả 18 khoang dầu này được nối thông với nhau qua hệ thống kênh dẫn trong tấm đế, tạo thành một hệ thống thủy lực kín duy nhất.

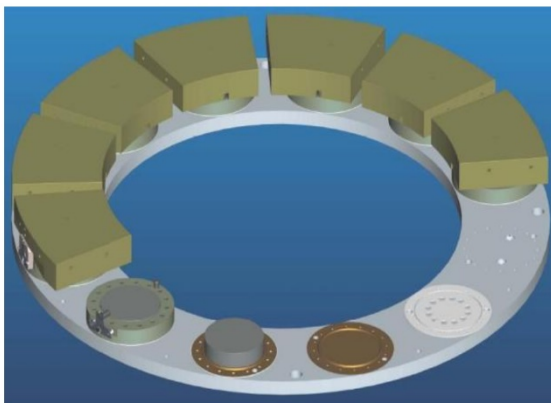
Vì các khoang dầu liên thông, nếu xảy ra phân bố tải trọng không đều (ví dụ do trục nghiêng), một hoặc vài guốc đỡ sẽ chịu tải lớn hơn các guốc khác, làm áp suất dầu trong khoang dưới chúng tăng lên. Sự gia tăng áp suất này lập tức được truyền tới tất cả các khoang còn lại. Áp suất tăng sẽ đẩy các màng đàn hồi cùng guốc đỡ tương ứng dịch chuyển lên trên một lượng rất nhỏ, phân bố lại tải trọng cho đến khi tất cả guốc đỡ chịu tải đều nhau và áp suất P trong hệ thống trở về trạng thái cân bằng.

Quá trình tự cân bằng động này diễn ra liên tục, đảm bảo tải trọng luôn được chia đều cho tất cả các guốc đỡ. Nhờ đó, chiều dày màng dầu bôi trơn (chiều dày màng dầu nhỏ nhất) giữa các guốc đỡ và vành gương được duy trì đồng nhất và ổn định - đây là yếu tố tiên quyết để đảm bảo bôi trơn thủy động hiệu quả, ngăn ngừa quá nhiệt và hư hỏng ổ đỡ.

Sơ đồ nguyên lý cân bằng được thể hiện trên hình 1, và hình 2, 3 là mô phỏng hệ thống các tấm màng tự lựa trong ổ đỡ chặn do hãng Alstom Hydro thiết kế.[5]



Hình 1: Sơ đồ nguyên lý cân bằng màng



Hình 2: Mô hình lắp hệ thống cân bằng hệ thống bằng tám màng



Hình 3: Màng đỡ - theo thiết kế của Alstom Hydro

2.3 Phân tích thiết kế an toàn với vai trò của đĩa cao su

Trong thiết kế hệ thống cân bằng tải thủy tĩnh của Alstom, một chi tiết quan trọng về an toàn là **đĩa cao su an toàn** (*safety rubber disk*), chức năng của chi tiết này là tạo ra một đường truyền tải trọng dự phòng thứ cấp. Nếu một tấm màng bị nứt vỡ gây mất hoàn toàn áp suất tại khoang dầu tương ứng, guốc đỡ chặn sẽ hạ xuống tiếp xúc với đĩa cao su. Khi đó, tải trọng được tạm thời cân bằng thông qua biến dạng đàn hồi của đĩa cao su. Cơ chế này ngăn chặn sự phá hủy tức thời toàn bộ ổ đỡ, cho phép tổ máy có đủ thời gian để dừng khẩn cấp an toàn. Tài liệu OEM cũng chỉ rõ yêu cầu phải có một khe hở giữa các chi tiết cố định và di động bằng “hành trình làm việc của màng + 2 mm”. Khe hở này đảm bảo màng đàn hồi hoạt động tự do trong điều kiện bình thường, đồng thời cơ cấu an toàn sẽ được kích hoạt kịp thời khi sự cố xảy ra.

3. Vật liệu và phương pháp chế tạo

3.1 Lựa chọn và phân tích vật liệu: Thép không gỉ austenit SUS 304

Việc lựa chọn vật liệu để chế tạo tấm màng là một quyết định kỹ thuật rất quan trọng. Dựa trên các yêu cầu khắc nghiệt của điều kiện làm việc, thép không gỉ austenit mác SUS 304 (theo tiêu chuẩn JIS G4303) là một lựa chọn phù hợp bởi có các đặc tính của vật liệu như sau:

Bảng 1. Thành phần hóa học của thép SUS304 (JIS G4303)

Mác thép	Thành phần hóa học (%)						
	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P
SUS304	≤ 0,08	≤ 1,00	≤ 2,00	18,00, 20,00	8,00, 10,50	≤0,030	≤0,045

Bảng 2: Cơ tính của thép SUS304 theo tiêu chuẩn JIS của Nhật

Mác thép	Giới hạn bền σ_b (MPa)	Giới hạn chảy σ_c (MPa)	Độ dẫn dài tương đối δ (%)
SUS304	520	205	40

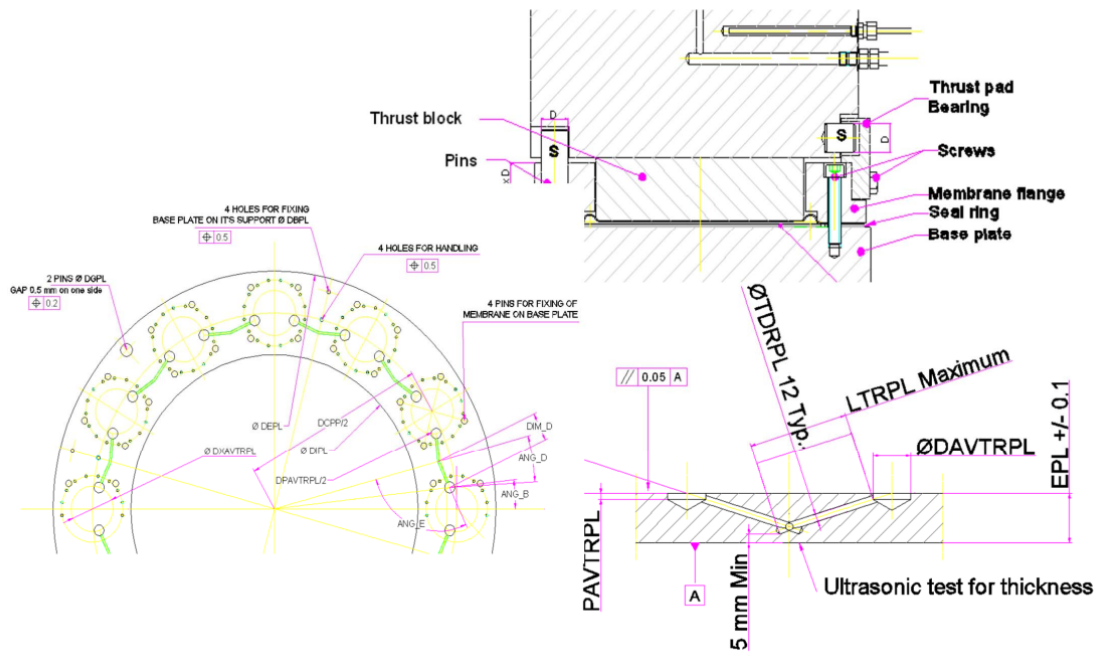
- **Tính chất cơ học và khả năng tạo hình:** Thép SUS 304 ở trạng thái ủ có độ dẻo dai rất cao (độ giãn dài tương đối $\delta \geq 40\%$) và giới hạn chảy tương đối thấp ($\sigma_c \approx 205$ MPa), vì vậy nó có tính công nghệ gia công biến dạng dẻo tốt, phù hợp dùng để chế tạo các chi tiết có hình dạng phức tạp bằng công nghệ dập vuốt.

- **Khả năng chống ăn mòn:** Với hàm lượng Cr (18 - 20%) và Ni (8 - 10,5%) cao, SUS 304 hình thành một lớp màng oxit crom (Cr_2O_3) thụ động bền vững trên bề mặt. Lớp màng này mang lại khả năng chống ăn mòn tốt trong môi trường dầu thủy lực, kể cả khi có sự xâm nhập của hơi ẩm.

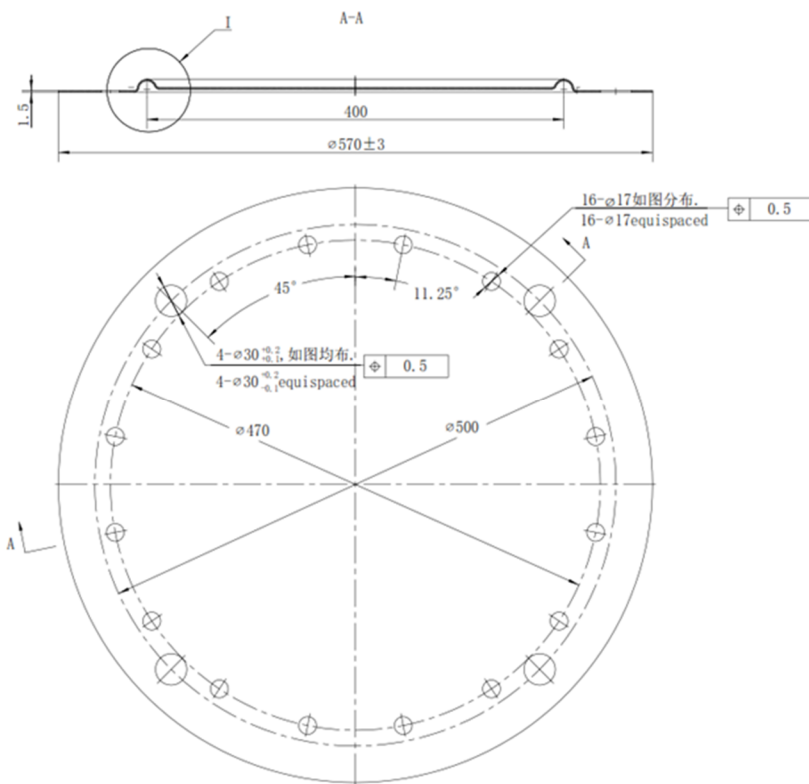
- **Độ bền mỏi:** Trong môi trường không khí, giới hạn bền mỏi (*endurance limit*) của SUS 304 ứng với 10^7 chu kỳ vào khoảng 240 MPa. Môi trường dầu bôi trơn thường có tác dụng bảo vệ, giúp nâng cao tuổi thọ mỏi so với không khí. Tuy nhiên, cần lưu ý nguy cơ mỏi - ăn mòn nếu dầu thủy lực bị nhiễm hơi ẩm.

- **Hiện tượng chuyển biến martensite do biến dạng (*hiệu ứng TRIP*):** Thép SUS 304 có cấu trúc austenit siêu bền (*metastable*). Quá trình dập sâu gây biến dạng dẻo lớn ở nhiệt độ phòng có thể kích hoạt chuyển biến pha trong cấu trúc tinh thể: một phần cấu trúc austenit dẻo (pha γ , không từ tính) sẽ chuyển thành martensite (pha α' , cứng, bền, có từ tính nhẹ). Hiệu ứng này không phải khuyết tật mà là một cơ chế hóa bền quan trọng – sự hóa bền do biến dạng không chỉ đến từ trượt của các lệch mạng mà còn được tăng cường đáng kể bởi sự hình thành pha martensite mới cứng hơn. Do đó, sau khi chế tạo, tấm màng không còn là thép SUS 304 ở trạng thái ủ ban đầu mà trở thành một vật liệu “lai” với vi cấu trúc biến đổi theo mức độ biến dạng cục bộ, sở hữu độ bền và độ cứng cao hơn đáng kể. Cơ chế này lý giải vì sao một chi tiết có hình dạng tương đối đơn giản lại có thể chịu được điều kiện áp suất vận hành khắc nghiệt.

Qua khảo sát thực tế, kết cấu bộ cân bằng tải tự lựa bao gồm các tấm màng đàn hồi, vòng đệm làm kín, đệm lót, trụ đỡ như minh họa trong Hình 4. Các tấm màng có hình dạng và kích thước như bản vẽ thiết kế ở Hình 5.



Hình 4: Kết cấu bộ cân bằng màng tự lực trong ổ đỡ máy phát của NMTĐ



Hình 5: Bản vẽ thiết kế tấm màng tự lực NMTĐ Sơn La

3.2 Quy trình công nghệ

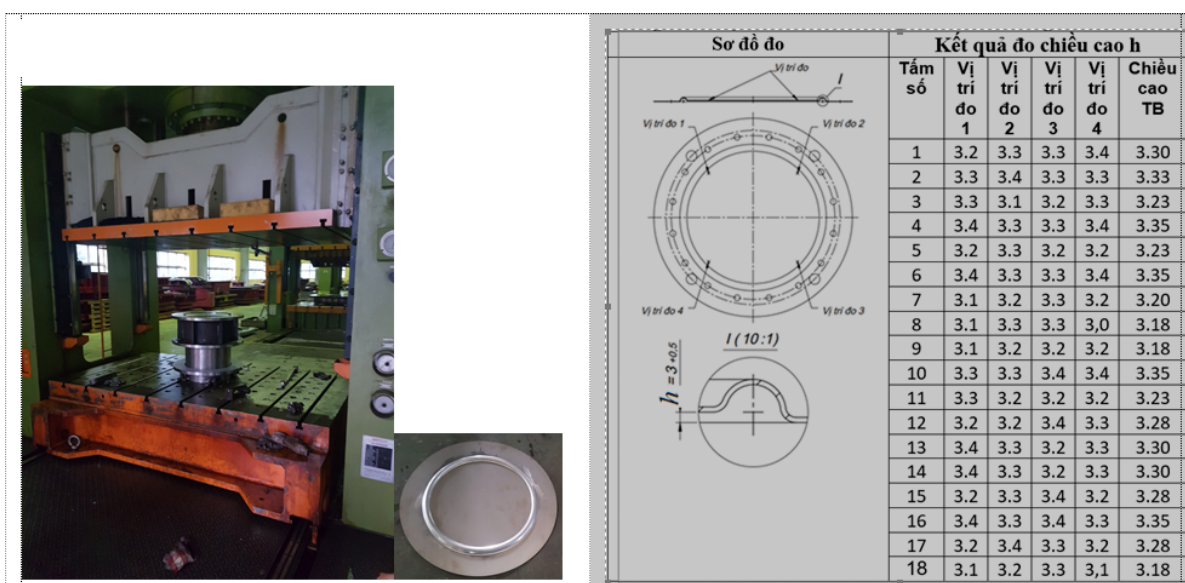
Quy trình chế tạo tấm màng được thực hiện dựa trên công nghệ dập vuốt kim loại dạng tâm mỏng tròn xoay có biên dạng phức tạp, sử dụng máy ép thủy lực song động. Quá trình tạo hình được chia thành hai giai đoạn chính để kiểm soát dòng chảy vật liệu và giảm thiểu nguy cơ khuyết tật:

- **Dập sơ bộ (Preliminary forming):** Tạo biên dạng trung gian, phân bố lại vật liệu và thực hiện phần lớn quá trình biến dạng.

- **Dập tinh (Final forming):** Hoàn thiện biên dạng cuối cùng, đảm bảo độ chính xác kích thước và chất lượng bề mặt.

Hình ảnh thiết bị dập ép tạo hình như mô tả trên hình 6, các bộ khuôn có cấu tạo chính bao gồm chày ép, cối ép, bộ chặn phôi,... Khi thiết kế bộ khuôn dập cần tính toán đến các thông số như lực chặn phôi, bán kính góc uốn và khe hở giữa chày và cối ép cần được lựa chọn hợp lý để đảm bảo khi dập không tạo ra biến mỏng chiều dày hay nứt rách chi tiết cũng như đảm bảo độ phẳng, kích thước chiều cao, bán kính uốn... của chi tiết sau khi dập. Trên hình 7 là kết quả đo kích thước chiều cao các chi tiết tấm màng sau khi dập tạo hình. [4]

- **Gia công tinh sau dập:** Sau khi dập tạo hình hoàn tất và chi tiết được kiểm tra đạt yêu cầu về biên dạng, độ phẳng và chiều dày, tiến hành các công đoạn gia công cơ khí chính xác (như khoan, phay) để tạo các lỗ theo đúng bản vẽ thiết kế.



Hình 6: Sơ đồ dập ép tạo hình biên dạng tấm màng và tấm màng

Hình 7: Kết quả đo kích thước chiều cao tám màng

4. Kiểm tra thử nghiệm sản phẩm

4.1 Thiết kế bộ gá thử nghiệm và thiết bị đo lường

Để xác nhận hiệu năng của các tấm màng chế tạo, một **bộ gá thử nghiệm** chuyên dụng đã được thiết kế và chế tạo, cho phép mô phỏng điều kiện tải trọng thực tế ngay tại hiện trường. Hệ thống thử nghiệm bao gồm:

- **Kết cấu chịu lực (gông thử tải):** Khung dầm thép cứng vững được thiết kế để chịu được phản lực từ 18 kích thủy lực khi thử tải tới 150% tải trọng định mức (tương đương ~125 tấn tại mỗi vị trí).

- **Hệ thống gia tải:** Gồm 18 kích thủy lực nối song song và kết nối chung với cùng một bơm và một bộ chia dầu. Thiết kế này đảm bảo áp suất thủy lực truyền đến tất cả các kích là đồng đều và đồng thời, mô phỏng chính xác nguyên lý cân bằng áp suất của hệ thống thủy tĩnh trong ổ đỡ.

- **Hệ thống đo lường:** Gồm 18 đồng hồ so có độ chính xác cao (0,01 mm) được gá đặt cẩn thận, với đầu đo tiếp xúc đúng tâm mỗi tấm màng để đo chính xác độ lún (dịch chuyển thẳng đứng) của chúng.

4.2 Quy trình thử tải tĩnh tại hiện trường

Quy trình thử nghiệm được xây dựng một cách khoa học, tuân thủ các nguyên tắc kiểm định công nghiệp, gồm các bước chính:

- **Chuẩn bị:** Lắp đặt hoàn chỉnh 18 cụm màng đàn hồi vào tấm đế; lắp bộ công cụ thử tải và hệ thống kích; gá đặt và hiệu chỉnh 18 đồng hồ so về vị trí “0” làm mốc tham chiếu ban đầu.

- **Gia tải theo cấp:** Tăng dần tải trọng theo từng cấp, mỗi cấp tương ứng 10% tải trọng định mức của tổ máy.

- **Giữ tải:** Ở mỗi cấp tải, duy trì áp suất ổn định trong tối thiểu 15 phút. Trong thời gian này, kỹ thuật viên ghi lại số đo độ lún từ các đồng hồ so và kiểm tra trực quan toàn bộ hệ thống để phát hiện rò rỉ dầu (nếu có).

- **Thử nghiệm chịu tải kéo dài:** Tại các mốc tải trọng quan trọng 100% và 150% tải định mức, giữ áp suất liên tục trong 1 giờ. Giai đoạn này nhằm đánh giá các hiện tượng biến dạng từ biến, biến dạng dẻo cũng như kiểm tra độ kín của hệ thống dưới tác động của tải trọng kéo dài.

- **Ghi nhận dữ liệu:** Số liệu độ lún từ 18 đồng hồ so được ghi lại có hệ thống ở mỗi cấp tải và trong suốt quá trình giữ tải và được thể hiện như trong bảng 3.

4.3 Tiêu chí đánh giá chất lượng sản phẩm

Các tiêu chí đánh giá chất lượng sản phẩm được xác định rõ ràng và định lượng:

- **Tiêu chí kiểm tra độ cứng/dàn hồi:** Trong suốt quá trình thử tải, độ lún của mỗi tấm màng không được vượt quá $\pm 0,15$ mm so với vị trí cân bằng ban đầu. Tiêu chí nghiêm ngặt này đảm bảo tấm màng hoạt động hoàn toàn trong miền đàn hồi của vật liệu, không xảy ra biến dạng dẻo ngay cả khi chịu quá tải 150%.

- **Tiêu chí kiểm tra độ kín:** Không cho phép bất kỳ sự rò rỉ dầu nào tại các mối ghép hoặc trên bề mặt tấm màng.

Thử nghiệm chấp nhận tại nhà máy (Factory Acceptance Test - FAT): Quy trình thử tải ~230% của OEM là một thử nghiệm phá hủy (*destructive test*) hay thử tải tới hạn, được thực hiện trong điều kiện phòng thí nghiệm kiểm soát. Mục đích của thử nghiệm này là xác nhận chất lượng chế tạo và mức độ bền tới hạn của một tấm màng đơn lẻ.

Thử nghiệm vận hành tại hiện trường (On-site commissioning test): Quy trình thử tải 150% được thực hiện trong nghiên cứu này là một thử nghiệm tích hợp hệ thống. Mục đích của thử nghiệm không phải đưa một chi tiết đến giới hạn hỏng, mà để xác nhận lắp ráp chính xác, độ kín và hiệu năng hoạt động đồng bộ của toàn bộ 18 cụm màng trong điều kiện vận hành có quá tải. Do đó, thử nghiệm này có giá trị thực tiễn cao trong việc đánh giá mức độ sẵn sàng vận hành của cả hệ thống.

Bảng 3. Kết quả thử tải tĩnh tại hiện trường của 18 tấm màng chế tạo:

Số thứ tự Màng	Độ lún tại 50% Tải (mm)	Độ lún tại 100% Tải (mm)	Độ lún tại 150% Tải (mm)	Độ lún cuối (sau 1h tại 150% Tải) (mm)	Vị trí cuối (sau dỡ tải) (mm)	Kiểm tra Rò rỉ Dầu	Kết quả
1	+0.02	+0.04	+0.06	+0.06	0.00	Không rò rỉ	Đạt
2	+0.02	+0.03	+0.05	+0.05	0.00	Không rò rỉ	Đạt
3	+0.01	+0.04	+0.05	+0.05	0.00	Không rò rỉ	Đạt
4	+0.02	+0.05	+0.07	+0.07	0.00	Không rò rỉ	Đạt

Số thứ tự Màng	Độ lún tại 50% Tải (mm)	Độ lún tại 100% Tải (mm)	Độ lún tại 150% Tải (mm)	Độ lún cuối (sau 1h tại 150% Tải) (mm)	Vị trí cuối (sau dỡ tải) (mm)	Kiểm tra Rò rỉ Dầu	Kết quả
5	+0.03	+0.04	+0.06	+0.06	+0.01	Không rò rỉ	Đạt
6	+0.02	+0.03	+0.05	+0.05	0.00	Không rò rỉ	Đạt
7	+0.01	+0.04	+0.06	+0.06	0.00	Không rò rỉ	Đạt
8	+0.02	+0.05	+0.07	+0.07	0.00	Không rò rỉ	Đạt
9	+0.02	+0.04	+0.06	+0.06	0.00	Không rò rỉ	Đạt
10	+0.03	+0.05	+0.08	+0.08	+0.01	Không rò rỉ	Đạt
11	+0.02	+0.04	+0.05	+0.05	0.00	Không rò rỉ	Đạt
12	+0.01	+0.03	+0.05	+0.05	0.00	Không rò rỉ	Đạt
13	+0.02	+0.04	+0.06	+0.06	0.00	Không rò rỉ	Đạt
14	+0.03	+0.05	+0.07	+0.07	0.00	Không rò rỉ	Đạt
15	+0.02	+0.04	+0.06	+0.06	+0.01	Không rò rỉ	Đạt
16	+0.01	+0.03	+0.05	+0.05	0.00	Không rò rỉ	Đạt
17	+0.02	+0.05	+0.07	+0.07	0.00	Không rò rỉ	Đạt
18	+0.02	+0.04	+0.06	+0.06	0.00	Không rò rỉ	Đạt

5. Kết quả và thảo luận

5.1 Phân tích kết quả đo kiểm tra sau chế tạo

Công tác kiểm tra đo lường được thực hiện trên 100% sản phẩm sau khi hoàn thiện gia công cuối. Kết quả cho thấy các kích thước hình học quan trọng (đường kính ngoài, chiều cao tổng thể, biên dạng uốn cong, vị trí các lỗ) đều nằm trong giới hạn dung sai cho phép theo bản vẽ thiết kế. Đặc biệt, độ phẳng của các bề mặt làm kín đạt yêu cầu kỹ thuật, đảm bảo lắp ghép kín khít và không rò rỉ. So với dung sai gia công 0,3 mm được đề cập trong tài liệu của Alstom, các sản phẩm chế tạo trong nước đã đáp ứng tiêu chuẩn này, khẳng định năng lực công nghệ và độ chính xác thiết bị gia công.

5.2 Phân tích hiệu năng thử tải tĩnh

Dữ liệu từ Bảng 4 cung cấp bằng chứng định lượng thuyết phục về sự thành công của các tấm màng được chế tạo:

- **Độ cứng và tính đàn hồi:** Cả 18 tấm màng đều thể hiện độ lún rất nhỏ; giá trị lớn nhất chỉ +0,08 mm tại mức quá tải 150%, thấp hơn đáng kể so với giới hạn cho phép $\pm 0,15$ mm. Điều này chứng tỏ kết cấu có độ cứng vững rất cao.

- **Tính đồng nhất:** Sự chênh lệch về độ lún giữa các tấm màng tại cùng một cấp tải không đáng kể, cho thấy quy trình chế tạo có độ lặp lại và ổn định cao, tạo ra loạt sản phẩm đồng đều về chất lượng.

- **Khả năng phục hồi đàn hồi:** Sau khi dỡ tải hoàn toàn, hầu hết các tấm màng trở về vị trí ban đầu (0,00 mm); chỉ một số rất ít có độ lún dư không đáng kể (+0,01 mm). Điều này chứng tỏ vật liệu làm việc hoàn toàn trong miền đàn hồi.

- **Tính ổn định và độ kín:** Không phát hiện bất kỳ rò rỉ dầu nào trong suốt quá trình thử nghiệm, đặc biệt là trong giai đoạn giữ tải 1 giờ ở 150% tải định mức. Kết quả này

xác nhận chất lượng của bản thân tấm màng, chất lượng bề mặt gia công cũng như hiệu quả của các vòng đệm làm kín.

5.3 Tối ưu hóa quy trình chế tạo

Thách thức lớn nhất trong quá trình chế tạo là kiểm soát hiện tượng hóa bền do biến dạng lớn của thép SUS 304. Do hiện tượng biến đổi cấu trúc kim loại từ austenit sang martensite khi chịu ứng suất, làm tăng độ dẻo và độ bền của vật liệu (hiệu ứng TRIP), vật liệu trở nên cứng và bền hơn rất nhanh ngay sau những biến dạng dẻo đầu tiên. Điều này đòi hỏi lực dập cao hơn đáng kể so với thép cacbon thông thường và yêu cầu bộ khuôn phải có độ cứng vững cũng như độ bền mỏi vượt trội. Việc kiểm soát lực chặn phôi cũng cực kỳ quan trọng - chỉ một sai lệch nhỏ có thể dẫn đến nhăn phôi hoặc nứt vỡ chi tiết. Quy trình dập hai giai đoạn đã chứng tỏ hiệu quả cao: giai đoạn dập sơ bộ cho phép vật liệu biến dạng và hóa bền dần, trong khi giai đoạn dập tinh tập trung vào định hình chính xác biên dạng cuối. Kết hợp với lựa chọn chất bôi trơn EP phù hợp, quy trình này đã khắc phục thành công các thách thức công nghệ và tạo ra sản phẩm đạt yêu cầu.

5.4 Phân tích so sánh

Thành công của dự án có thể được đánh giá trên nhiều phương diện khi so sánh sản phẩm nội địa với giải pháp sử dụng sản phẩm OEM:

- **Hiệu năng kỹ thuật:** Dữ liệu thử tải thực nghiệm cho thấy các tấm màng chế tạo trong nước hoàn toàn đáp ứng, thậm chí vượt các chỉ tiêu về hiệu năng vận hành.

- **Hiệu quả về kinh tế:** Chi phí để nghiên cứu và sản xuất toàn bộ lô sản phẩm trong nước thấp hơn đáng kể so với chi phí nhập khẩu một bộ tương đương từ OEM. Điều này mang lại lợi ích kinh tế trực tiếp cho nhà máy và cho ngành điện.

- Việc làm chủ công nghệ chế tạo các tấm màng đã tạo điều kiện cho các nhà máy thủy điện trong nước có thể chủ động trong công tác bảo dưỡng, sửa chữa, rút ngắn đáng kể thời gian dừng máy để sửa chữa. Điều này không chỉ nâng cao hiệu quả sản xuất mà còn góp phần đảm bảo an ninh năng lượng quốc gia.

6. Kết luận và định hướng

6.1 Tổng kết các kết quả đạt được

Nghiên cứu đã xây dựng thành công một quy trình công nghệ hoàn chỉnh và khép kín để nội địa hóa việc chế tạo các tấm màng đàn hồi tự lựa cho hệ thống ổ đỡ chặn máy phát thủy điện công suất lớn. Dự án bao quát từ khâu phân tích khoa học vật liệu, phát triển công nghệ tạo hình tiên tiến, đến xây dựng phương pháp kiểm định chất lượng nghiêm ngặt. Các sản phẩm cuối cùng đã được lắp đặt và vận hành ổn định tại Nhà máy Thủy điện Sơn La, khẳng định tính đúng đắn của các giải pháp kỹ thuật và tính khả thi của dự án.

6.2 Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

Công trình này là một minh chứng rõ nét cho năng lực nghiên cứu và phát triển của ngành cơ khí Việt Nam trong việc giải quyết các bài toán kỹ thuật phức tạp đòi hỏi độ chính xác và độ tin cậy cao. Thành công của dự án đã mang lại một giải pháp thay thế hiệu quả về chi phí và có ý nghĩa chiến lược cho các phụ tùng nhập khẩu, qua đó tăng cường tính tự chủ về công nghệ và hiệu quả kinh tế cho các nhà máy thủy điện. Hơn nữa, những kiến thức và kinh nghiệm thu được từ nghiên cứu sẽ là cơ sở để tiếp tục phát triển, chế tạo các sản phẩm cơ khí chính xác khác cho ngành năng lượng và các ngành công nghiệp trọng điểm trong nước.

6.3 Khuyến nghị cho các nghiên cứu tiếp theo

Để tiếp tục nâng cao chất lượng và hiệu quả của sản phẩm, các hướng nghiên cứu trong tương lai có thể tập trung vào:

- **Mô phỏng và tối ưu hóa quy trình:** Sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (*Finite Element Method - FEM*) để mô phỏng quá trình dập tạo hình. Mô phỏng cho phép tối ưu hóa các thông số như lực chặn phôi, hình dạng khuôn ... giúp giảm thiểu hiện tượng biến mỏng vật liệu, kiểm soát giảm ứng suất dư, và thậm chí có thể giảm số bước công nghệ nhằm nâng cao hiệu suất sản xuất sản phẩm tương tự.

- **Nghiên cứu vật liệu tiên tiến:** Thực hiện nghiên cứu so sánh về việc ứng dụng các vật liệu tiên tiến hơn cho chế tạo tấm màng với cấp độ bền cao và khả năng chống mài mòn cao hơn so với thép austenit 304, nâng cao được tuổi thọ của chi tiết trong các điều kiện vận hành khắc nghiệt nhất.

- **Tích hợp hệ thống giám sát tình trạng:** Phát triển ứng dụng hệ thống giám sát và chẩn đoán tuổi thọ (*condition monitoring*) cho cụm cân bằng thủy tĩnh. Hệ thống này có thể sử dụng các cảm biến áp suất thu nhỏ hoặc cảm biến phát xạ âm thanh (*acoustic emission*) để cung cấp dữ liệu về sức bền của các tấm màng, cho phép chuyển đổi từ phương thức bảo trì phản ứng (chỉ sửa chữa khi sự cố đã xảy ra) sang bảo trì dự báo (*predictive maintenance*), giúp nâng cao độ tin cậy và giảm thiểu thời gian dừng máy đột xuất.

Danh mục tài liệu tham khảo

1. P. Pajaczowski, "Simulation of transient states in large hydrodynamic thrust bearings," *Tribology International*, vol. 43, no. 8, pp. 1478–1485, 2010.
2. Ngô Trí Phúc và Trần Văn Địch, *Sổ tay sử dụng thép thế giới*. Hà Nội: NXB Khoa học và Kỹ thuật, 2003.
3. Hà Văn Vui và Nguyễn Chí Sáng, *Sổ tay thiết kế cơ khí*, tập 1–3. Hà Nội: NXB Khoa học và Kỹ thuật, 2004.
4. Nguyễn Mậu Đăng, *Công nghệ tạo hình kim loại tấm*. Hà Nội: NXB Khoa học và Kỹ thuật, 2006.
5. **Tài liệu khảo sát thiết bị**, Nhà máy Thủy điện Sơn La, 2018.
6. J. D. Donghao, "Son La Membrane issue site report," GE Power, 2018.
7. Austral Wright Metals, "Deep Drawing Stainless Steel," [Online]. Available: <https://www.australwright.com.au/technical-data/advice/stainless-steel/deep-drawing-stainless-steel/>.
8. M. H. Han, "Deep Drawing and Redrawing of 304 Stainless Steel Sheet," *Luận văn ThS*, ĐH McMaster, Hamilton, Canada, 2006.
9. BSSA, "Fatigue properties and endurance limits of stainless steels," British Stainless Steel Association, [Online]. Available: https://bssa.org.uk/bssa_articles/fatigue-properties-and-endurance-limits-of-stainless-steels/.
10. Waukesha Bearings, "Hydrodynamic Bearings," [Online]. Available: <https://www.waukbearing.com/en/resources/bearing-knowledge/hydrodynamic-bearings.html>.
11. M. Chernets, M. Yevtushenko, và H. Vovk, "Failure Analysis of the Thrust Bearing of a Hydrogenerator," *Machines*, vol. 11, no. 3, tr. 60, 2023.

12. H. Talja, T. Saukkonen, và H. Hänninen, “Delayed Cracking of Deep Drawn Metastable Austenitic Stainless Steels,” *ISIJ International*, vol. 55, no. 10, pp. 2213–2220, 2015.
13. M. Zehetbauer *et al.*, “Plastic Strain Induced Martensite in a Type 304 Austenitic Stainless Steel. Modelling and Numerical Simulation of Deep Drawing Processes,” *Steel Research International*, vol. 80, no. 5, pp. 381–387, 2009.
14. ISO 12130-1:2021, *Plain bearings — Hydrodynamic plain tilting pad thrust bearings under steady-state conditions — Part 1: Calculation of tilting pad thrust bearings*. Geneva: International Organization for Standardization (ISO), 2021.
15. ISO 6281:2020, *Plain bearings — Testing under conditions of hydrodynamic and mixed lubrication in test rigs*. Geneva: International Organization for Standardization (ISO), 2020.