

NGHIÊN CỨU CÔNG NGHỆ ÉP ĐÁY CHO ĐỘNG CƠ CHỊU NHIỆT ĐƯỢC LÀM TỪ VẬT LIỆU COMPOSITE CỐT VẢI CACBON/NỀN PHENOLIC

RESEARCH ON PRESSING TECHNOLOGY FOR THE THERMAL INSULATOR BASE OF HEAT-RESISTANT ENGINES MADE FROM CARBON FABRIC-REINFORCED PHENOLIC COMPOSITE MATERIAL

TRẦN THỊ THANH VÂN

Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

Email liên hệ: vanttt.vck@vimaru.edu.vn

Tóm tắt

Động cơ chịu nhiệt độ cao thường là các loại động cơ đẩy như động cơ tên lửa nhiên liệu rắn. Bài báo tiến hành nghiên cứu chế tạo đáy bảo vệ nhiệt cho động cơ với điều kiện làm việc ở nhiệt độ và áp suất cao của khí thuốc cháy và thời gian làm việc rất ngắn chỉ tính bằng giây. Đáy động cơ (nơi lắp với loa phụt) làm việc khắc nghiệt nhất, cần được bảo vệ nhiệt. Vật liệu composite cốt vải cacbon, nền nhựa phenolic là vật liệu bảo vệ nhiệt đã khẳng định ưu thế nhờ có tính chịu nhiệt và xói mòn vì có hàm lượng cốc hóa và giữ được cấu hình lớp bảo vệ nhiệt. Từ yêu cầu cần thiết kế và chế tạo đáy bảo vệ nhiệt, tác giả xác định mục tiêu là giải quyết bài toán về công nghệ chế tạo đáy động cơ chịu nhiệt bằng vật liệu composite trên cơ sở nhựa nền phenolic/cốt vải cacbon, sử dụng công nghệ ép nóng. Trên cơ sở đó, tiến hành thực nghiệm để xác định chế độ công nghệ phân tích các khuyết tật và đưa ra các khuyến cáo trong quá trình thực hiện tạo ra chế độ công nghệ hợp lý nhằm chế tạo và nâng cao chất lượng sản phẩm.

Kết quả nghiên cứu đưa ra các thông số công nghệ cho quá trình ép đáy động cơ chịu nhiệt như sau: Nhiệt độ ép dao động trên dưới 160°C, áp lực ép là 25Mpa, thời gian ép phụ thuộc vào quá trình tạo gel nên lấy 30 phút sẽ cho cơ tính tốt và đảm bảo chất lượng sản phẩm.

Từ khóa: Bảo vệ nhiệt, composite vải cacbon-phenolic, ép nóng composite.

Abstract

High-temperature-resistant engines are typically propulsion engines, such as solid-fuel rocket engines. This study focuses on the fabrication of a thermal protection base for engines operating under high-temperature and high-pressure conditions of combustible gases, with an

extremely short working duration measured in seconds. The engine base, particularly at the connection point with the nozzle, endures the harshest conditions and requires robust thermal protection. Carbon fabric - reinforced composite with a phenolic resin matrix has been established as an advantageous thermal protection material due to its superior heat resistance and erosion resistance, attributed to its high coke content and the stability of the protective layer configuration. To address the requirements for designing and manufacturing the thermal protection base, the authors aim to resolve the technological challenges of fabricating a heat-resistant engine base using composite materials based on phenolic resin matrix reinforced with carbon fabric. The hot-pressing method is employed, and experiments are conducted to determine technological parameters, analyze defects, and provide recommendations for achieving optimal processing conditions to enhance product quality. The research results propose the following technological parameters for hot-pressing the thermal protection base: Pressing temperature: approximately 160°C, Pressing pressure: 25 Mpa, Pressing duration: 30 minutes will give good mechanical properties and ensure product quality.

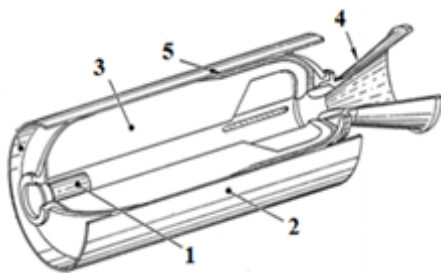
Keywords: Insulator, carbon fabric reinforced composite, hot composite compression, rocket motor of weapon.

1. Mở đầu

Động cơ tên lửa nhiên liệu rắn là một máy nhiệt biến đổi hóa năng của thuốc phóng sang nhiệt năng của sản phẩm cháy và sau đó biến đổi thành động năng của dòng môi chất phụt ra ngoài để tạo thành lực đẩy cho tên lửa chuyển động.

Động cơ tên lửa nhiên liệu rắn bao gồm các bộ phận chủ yếu sau: Buồng đốt, thuốc phóng, cụm loa

phụt, để chắn thuốc và cụm mồi (Hình 1). Trong đó, chi tiết tiếp xúc trực tiếp với sản phẩm cháy là cụm loa phụt và buồng đốt động cơ. Đối với các loại động cơ tên lửa nhiên liệu rắn, khí thuốc phóng cháy tạo ra sản phẩm khí có nhiệt độ cao (2000-2500°K), áp suất lớn (80.105Pa-300.105Pa), vận tốc khoảng 200m/s-250m/s khiến nhiệt độ buồng đốt động cơ có thể lên tới hàng nghìn độ, gây ảnh hưởng rất lớn đến độ bền kết cấu và hiệu suất của động cơ. Trong khi đó đối với một số loại thép bền nhiệt, nhiệt độ làm việc cho phép của chúng chỉ dao động trong khoảng 600°C-700°C không đáp ứng được điều kiện này [2], [5].



Hình 1. Kết cấu đặc trưng của động cơ tên lửa nhiên liệu rắn (NLR)[1]

1-Cụm mồi, 2-Buồng đốt, 3-Thuốc phóng, 4-Cụm loa phụt, 5- Lớp bảo vệ nhiệt.

Sự nung nóng thành buồng đốt và loa phụt có thể gây nên sự thay đổi các tính chất vật lý, nhất là đặc tính nhiệt và đặc tính bền của vật liệu kết cấu. Khi thành buồng đốt và loa phụt bị nung nóng vượt quá giá trị nhiệt độ làm việc cho phép của vật liệu thì độ bền cơ học của nó giảm xuống. Từ nguyên lý làm việc của động cơ, có thể thấy phần thành và phần đáy động cơ tiếp giáp với loa phụt là những vùng phải chịu các điều kiện tải nhiệt và cơ phức tạp. Sự quá nhiệt dù chỉ trong thời gian ngắn nhưng cũng làm độ bền cơ học giảm và đặc biệt đối với các vật liệu chế tạo thành buồng đốt, loa phụt khi bị quá nhiệt còn tạo ra sự biến đổi trạng thái vật lý. Do đó, để đảm bảo bền cho buồng đốt và loa phụt của động cơ, cần thiết phải sử dụng các phương pháp bảo vệ hiệu quả trước tác động nhiệt của sản phẩm cháy [3].

Trong các vật liệu bảo vệ nhiệt, nhận thấy để chế tạo đáy bảo vệ nhiệt cho động cơ phương pháp hiệu quả nhất là sử dụng vật liệu composite nền nhựa phenolic (nhựa phenol-formaldehyde)/ cốt chịu nhiệt như sợi/ vải cacbon hoặc thủy tinh. Phân tích các loại nhựa phenolic thì nhựa Novolac là loại nhựa có nhiều ưu điểm và sử dụng rộng rãi nhất vì không

những có khả năng chịu nhiệt độ cao, chịu sốc nhiệt và cách nhiệt tốt mà còn nhẹ và có bền cơ học (độ bền riêng cao), nhựa này có đặc tính là phản ứng với khí khi đóng rắn nên khi được thực hiện công nghệ ép nóng ở nhiệt độ cao sẽ khắc phục được các hiện tượng rỗ xốp [2].

Kế thừa các kết quả nghiên cứu, các nhà khoa học đưa ra khuyến cáo trong công nghệ ép hình nóng cho vật liệu này cần chọn áp lực ép trong khoảng 14Mpa -35Mpa [4].

Từ việc phân tích trên, bài báo này sẽ giải quyết mối quan hệ giữa vật liệu - kết cấu - công nghệ, trọng tâm đi vào công nghệ gia công vật liệu Composite sử dụng công nghệ ép nóng để chế tạo đáy động cơ chịu nhiệt.

2. Thực nghiệm

2.1. Chuẩn bị bán thành phẩm với vải cacbon nhựa nền phenolic tạo các tấm prepreg

Nhựa nền được tổng hợp tại viện hóa học, sau đó thực hiện các công đoạn sấy ở 115°C với thời gian 3,5 giờ để làm khô loại bỏ sạch nước và phenol dư (phenol cần nhỏ hơn 2%), tiếp theo hòa tan nhựa trong dung môi ethanol tuyệt đối (tỷ lệ 1:1) cùng với chất đóng rắn (15% khối lượng nhựa) tạo dung dịch lỏng để tẩm nhựa lên vải cacbon. [4].

Dưới tác động của nhiệt độ nhựa nền thường kém bền, dễ bị phá hủy bởi dòng nhiệt nên cần được tăng cường tính năng bằng lớp vải, sợi gia cường làm cho nhựa bền chắc hơn và giữ được đặc tính bảo vệ trong môi trường có nhiệt độ và áp suất cao. Tiến hành cắt vải cacbon theo kích thước yêu cầu, sau khi làm khô vải sẽ tiến hành tẩm nhựa lên vải, quá trình tẩm nhựa phải đảm bảo nhựa được thấm đều và mật độ bề nhựa vải đảm bảo yêu cầu với tỷ lệ quy định nhựa/vải khoảng 1,5:1 (Hình 2).

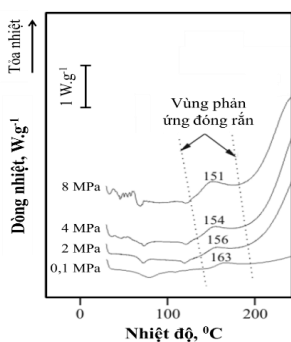


Hình 2. Prepreg nhựa nền phenolic/ cốt vải cacbon

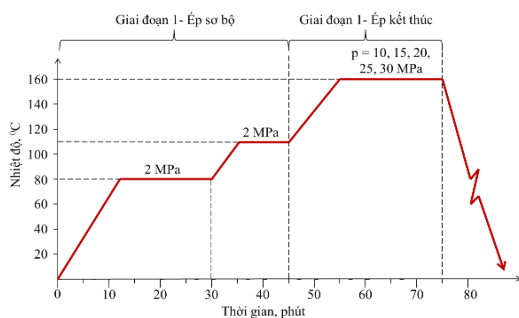
2.2. Phân tích xác định chế độ nhiệt khi ép

Hình 3 trình bày biểu đồ phân tích nhiệt quét vi sai của hệ nhựa Novolac. Nhận thấy, nhiệt độ thủy

ting hóa của hệ nhựa xuất hiện ở khoảng nhiệt độ từ 70°C-80°C và ~110°C, đỉnh nhiệt của phản ứng đóng rắn khoảng 150°C-160°C. Từ sơ đồ này ứng dụng vào công nghệ ép đáy. Thời điểm tạo gel với kết cấu đáy chịu nhiệt là 90°C và nhiệt độ đóng rắn phù hợp là 160°C để đảm bảo thời gian chảy loãng và điền đầy khuôn cho chi tiết bảo vệ nhiệt đáy động cơ có hình dạng khá phức tạp.



Hình 3. Biểu đồ DSC mẫu nhựa Novolac [7]



Hình 4. Sơ đồ công nghệ ép đáy bảo vệ nhiệt từ composite cốt vải cacbon/ Novolac

Sơ đồ công nghệ ép bảo vệ nhiệt đáy động cơ được thiết kế như Hình 4. Ở đó, quá trình ép được phân làm 2 giai đoạn:

- Giai đoạn 1: Ép sơ bộ, có tác dụng chuyển nhựa từ trạng thái rắn sang lỏng để điền đầy khuôn và chuẩn bị cho giai đoạn ép kết thúc;

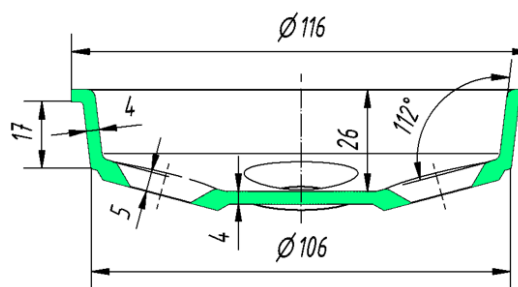
- Giai đoạn 2: Ép kết thúc ở 160°C với các áp lực ép khác nhau trong 30 phút nhằm đảm bảo cho nhựa đóng rắn hoàn toàn.

2.3. Thực nghiệm ép đáy bảo vệ nhiệt động cơ vũ khí

Từ kết quả về khả năng chịu nhiệt rất tốt của vật liệu composite đã nghiên cứu ở công trình [8], bài báo tiến hành lựa chọn các thông số công nghệ (Nhiệt độ - Áp lực - Thời gian ép) và xây dựng quy trình công nghệ để ứng dụng chế tạo đáy bảo vệ nhiệt của động cơ.

Vật liệu: Composite trên cơ sở nhựa Novolac/ vải sợi cacbon, hoặc Composite trên cơ sở nhựa Novolac/vải sợi cacbon.

Thiết kế kết cấu: Từ việc giải bài toán nhiệt có biên di động, tính toán thiết kế chiều dày lớp bảo vệ nhiệt, từ đó thiết kế mô hình 3D sản phẩm. Kích thước và bản vẽ 3D của đáy bảo vệ nhiệt động cơ thể hiện trên Hình 5.



Hình 5. Bản vẽ đáy động cơ

Công nghệ: Bài báo ứng dụng kết quả nghiên cứu từ công nghệ ép mẫu phẳng của tài liệu [8] để đưa ra các bước và các thông số công nghệ của quá trình chế tạo đáy động cơ chịu nhiệt bao gồm:

+ *Thiết kế khuôn ép.*

Đối với công nghệ ép trực tiếp trong khuôn trên máy ép có bàn gia nhiệt. Thực hiện công nghệ này cần có khuôn ép và thiết bị ép có bàn gia nhiệt trực tiếp. Hình dạng và kích thước lòng khuôn bảo đảm đúng theo hình dạng kích thước sản phẩm. Ngoài khuôn ép cần đảm bảo thêm các yêu cầu sau:

- Khuôn phải đảm bảo độ kín để tránh hiện tượng rò rỉ nhựa nền khi có áp suất tạo hình.

- Khuôn và thiết bị ép cần phải đảm bảo duy trì nhiệt độ chính xác theo yêu cầu của quy trình công nghệ.

- Kết cấu khuôn cần có các rãnh thoát khí đảm bảo trong quá trình đóng rắn nhựa các bọt khí trong nhựa nền được thoát ra ngoài nhằm tránh tạo rỗ khí trong sản phẩm. Để tạo điều kiện cho khuôn thoát khí tốt, khe hở giữa chày và cối lấy khoảng 0,2mm-0,3mm.

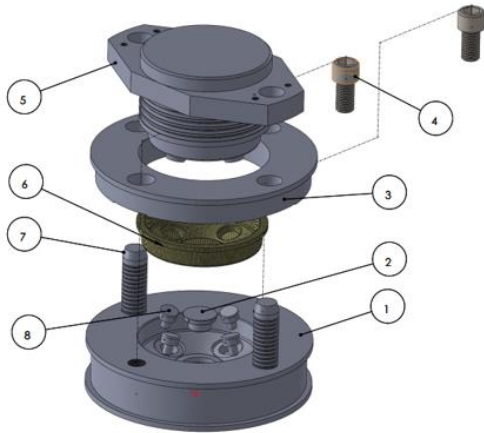
Từ đặc điểm của sản phẩm, công nghệ chế tạo, yêu cầu kỹ thuật, xây dựng kết cấu khuôn ép như Hình 6.

Bước 1: Chuẩn bị

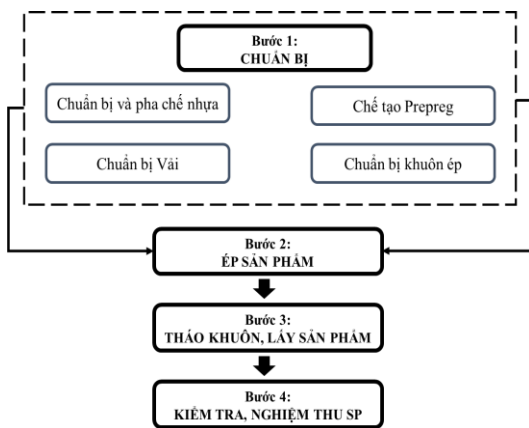
- Chuẩn bị và pha chế nhựa;
- Chuẩn bị vải, Chế tạo prepreg;
- Chuẩn bị khuôn ép.

Bước 2: Ép sản phẩm

Sau khi sấy đủ thời gian, lấy các tấm prepreg



Hình 6. Kết cấu khuôn ép đáy bảo vệ nhiệt động cơ
 1 - Cối; 2 - Ty dây; 3 - Vành định vị; 4 - Bulong dầu chìm; 5 - Chày; 6 - Sản phẩm; 7 - Trụ dẫn hướng; 8 - Ty chặn nhựa.



Hình 7. Thứ tự các bước chế tạo đáy bảo vệ nhiệt



Hình 8. Cách xếp vải vào trong khuôn

trong tủ sấy ra. Xếp các prepreg đã chuẩn bị sẵn vào trong cối, lấp chày đóng kín khuôn (Hình 8), cho khuôn vào vùng làm việc của máy ép, và tiến hành ép.

Từ bản vẽ đáy bảo vệ nhiệt động cơ Hình 5, diện tích hình chiếu sản phẩm trên mặt phẳng vuông góc

với trục tâm, chi tiết ép ra phải có cơ tính đảm bảo, toàn bộ chi tiết phải được điền đầy, bề mặt phải không bị phồng rộp, tách lớp. Căn cứ vào lực của thiết bị ép và kết quả nghiên cứu ép mẫu phẳng đã nghiên cứu trong tài liệu [8] chọn áp lực ép ở giai đoạn tạo hình cuối cùng trên sản phẩm đạt trung bình khoảng 25Mpa, nhiệt độ ép là: 80°C. Prepreg dùng ép các đáy bảo vệ nhiệt có mật độ khối lượng bề mặt khoảng 5,5g/dm²-6,0g/dm². Từ chiều dày sản phẩm, chọn số lớp prepreg cho ép đáy bảo vệ nhiệt là 12.

Bước 3: Tháo khuôn, lấy sản phẩm.



Hình 9. Sản phẩm đáy bảo vệ nhiệt đạt yêu cầu

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Một số khuyết tật khi ép chi tiết từ vật liệu composite

a. Hiện tượng tách lớp:

Mẫu được ép ở áp lực 5MPa tương ứng mẫu S1, khi áp lực ép đạt đến 10MPa mẫu ép có hiện tượng phồng rộp nhất định, chứng tỏ có hiện tượng xốp bên trong, nên việc ép mẫu S1 không tiến hành. Bên cạnh đó, khi cắt mẫu có áp lực ép cuối cùng là 10MPa, bên trong mẫu còn có hiện tượng tách lớp ở một số vị trí (Hình 10).



Hình 10. Hiện tượng tách lớp ở các mẫu có áp lực ép cuối là 10MPa

b. Hiện tượng phồng rộp bề mặt (Hình 11):

Nguyên nhân: Do prepreg vẫn còn nhiều dung môi etanol chưa bay hết, khi nhựa đóng rắn, ngoài khí NH₃ sinh ra, etanol cũng sẽ bay hơi và sinh ra khí.

Cách khắc phục: Quá trình chuẩn bị prepreg có

ảnh hưởng quyết định đến chất lượng sản phẩm. Do đó, khi tẩm nhựa lên vải cần chia làm nhiều lần tẩm, mỗi lần tẩm cách nhau tối thiểu 6h-10h. Sau lần tẩm cuối cùng vải phải được để khô tự nhiên 48 tiếng cho đến khi xe lại. Sau đó mới cắt thành các tấm và sấy trong lò ở 65°C-70°C trong vòng 12h-15h.



Hình 11. Hiện tượng phồng rộp bề mặt

c. Hiện tượng dính khuôn, khó tháo khuôn:

Nguyên nhân: Có thể do hai nguyên nhân sau

Do dùng chất chống dính chưa đúng cách, hoặc không phủ chất chống dính khuôn. Thanh dẫn hướng không được bôi trơn.

Khắc phục: Sử dụng chất chống dính, vệ sinh khuôn sạch sẽ bằng giấy ráp mịn và cùn công nghiệp, sấy khô bằng máy sấy tóc rồi mới phun chống dính.

Trước khi lắp khuôn sử dụng mỡ bò bôi lên trên thanh dẫn hướng.

3.2. Kết quả

Căn cứ vào lực của thiết bị ép, chọn áp lực ép trên sản phẩm đạt trung bình khoảng 25MPa. Prepreg dùng ép các đáy bảo vệ nhiệt có mật độ khối lượng bề mặt khoảng 5,5g/dm²-6,0g/dm².

Từ chiều dày sản phẩm, chọn số lớp prepreg cho ép đáy bảo vệ nhiệt là 13. Hình 9 là ảnh sản phẩm đạt yêu cầu.

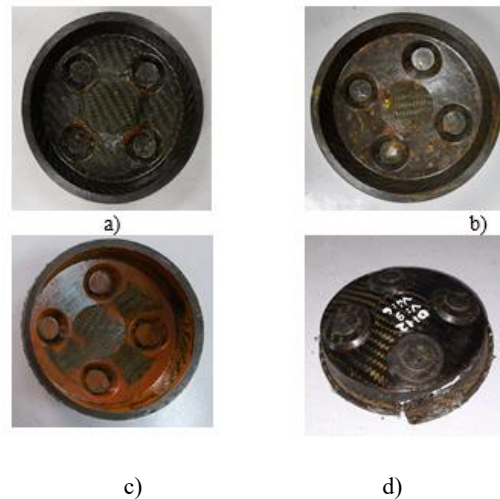
Qua việc ép sản phẩm (20 sản phẩm) đã gặp một số dạng và nguyên nhân gây ra phế phẩm Hình 12, đã từng bước khắc phục và ổn định công nghệ.

(1). Thời gian giữ nhiệt khi ép kết thúc thấp (≤ 15 phút): Trường hợp này, sản phẩm dễ bị móp méo khi tháo khuôn (Hình 12a). Thời gian hợp lý của giai đoạn này là trên 30 phút.

(2). Áp lực ép kết thúc thấp (≤ 10 MPa): Trường hợp này, sản phẩm sẽ đóng rắn không đều, có hiện tượng xốp bên trong, bề mặt có hiện tượng các cục nhựa đóng rắn cục bộ (Hình 12b). Áp lực ép tối thiểu ở giai đoạn này nên ≥ 15 MPa.

(3). Nhựa dư thừa phenol: Do điều kiện tổng hợp nhựa composite từ phenol và formaldehyde với tỷ lệ khoảng 1:0,8, nên sau tổng hợp, nếu việc loại bỏ phenol dư không đảm bảo, nhựa sẽ thừa phenol. Trường hợp này, bề mặt sản phẩm sẽ có lớp mỏng màu vàng bao bọc bên ngoài sản phẩm và sau khi tháo khuôn sẽ thấy các vết nứt ở lớp màng này. Để khắc phục, công đoạn sấy loại bỏ phenol cần thực hiện kỹ lưỡng, đảm bảo hàm lượng phenol dư $\leq 2\%$.

(4). Mật độ khối lượng bề mặt prepreg thấp (≤ 5 g/dm²): Trường hợp này, sản phẩm sẽ không đủ nhựa để điền đầy khuôn (Hình 12d). Để khắc phục cần đảm bảo đủ lượng nhựa khi làm prepreg, khoảng 5,5g/dm²-6,0g/dm².



Hình 12. Một số dạng phế phẩm điển hình

4. Kết luận

Bài báo đã nghiên cứu và xây dựng được quy trình công nghệ chế tạo sản phẩm đáy bảo vệ nhiệt cho động cơ nhiên liệu rắn từ vật liệu composite cốt vải cacbon/nền nhựa phenolic, phân tích các khuyết tật, đưa ra các khuyến cáo xảy ra trong quá trình thực hiện công nghệ để tránh tạo phế phẩm và từng bước hoàn chỉnh công nghệ đáp ứng tốt được chức năng làm việc của sản phẩm.

Sản phẩm ép đáy động cơ chịu nhiệt từ vật liệu composite không nên thực hiện ở thời gian giữ nhiệt (≤ 15 phút) và áp lực ép kết thúc thấp (≤ 10 MPa), trong quá trình ép cần đảm bảo loại bỏ phenol dư $\leq 2\%$. Chế độ công nghệ ép đáy đưa ra như sau: Đáy được ép trong phạm vi nhiệt độ từ 80°C -100°C và đóng rắn ở nhiệt độ 160°C với thời gian 30 phút dưới và áp lực 25MPa sẽ cho cơ tính tốt và tính chất nhiệt đảm bảo.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT24-25.37**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Agard Lecture Series No.150, *Design Methods in Solid Rocket Motors*, Revised Version 1988, ISBN: 92-835-0454-2.
- [2] TS. Lê Quang Tuấn, TS. Trần Ngọc Thanh, GS.TS. Nguyễn Việt Bắc (2014) - *Vật liệu kết cấu trong tên lửa* - NXB Quân đội Nhân dân, Hà Nội.
- [3] C. Louis (1979), *Chemical Specialities: Domestic and Industrial*, George Godwin, Vol.2.
- [4] B.M. Mandal (2012), *Fundamentals of Polymerization*, World Scientific Publishing Company.
- [5] PGS.TS. Phạm Thế Phiệt (chủ biên), PGS. TS Đặng Ngọc Thanh (2013), *Cơ sở tính toán thiết kế động cơ tên lửa nhiên liệu rắn*, Học viện Kỹ thuật Quân sự, Hà Nội.

- [6] A. Knop and et al. (1996), *Comprehensive polymer science and supplements- Vol 5: Step Polymerization*, Elsevier Ltd.
- [7] R.C. Korosec (2009), *High pressure DSC of phenolformaldehyde moulding Compounds*, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol.95, pp.235-240.
- [8] Trần Thị Thanh Vân (2024), *Nghiên cứu chế tạo tấm bảo vệ nhiệt dùng trong cơ khí Đóng tàu được làm từ vật liệu Composite cốt vải cacbon/nền phenolic*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số 78(4-2024).

Ngày nhận bài:	04/11/2024
Ngày nhận bản sửa lần 1:	21/12/2024
Ngày nhận bản sửa lần 2:	14/01/2025
Ngày duyệt đăng:	22/01/2025