

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA NHIỆT ĐỘ GIẶT CÔNG NGHIỆP ĐẾN TRẠNG THÁI ỨNG SUẤT VÀ BIẾN DẠNG CỦA CÚC ÁO POLYESTER BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN

STUDY OF THE EFFECT OF INDUSTRIAL WASHING TEMPERATURE ON THE STRESS AND DEFORMATION STATE OF POLYESTER BUTTONS USING THE FINITE ELEMENT METHOD

Lê Huỳnh Đức, Đào Thị Tinh

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

Đến Tòa soạn ngày 01/7/2026, chấp nhận đăng ngày 26/7/2026

Tóm tắt: Bài báo nghiên cứu ảnh hưởng của tải trọng nhiệt đến trạng thái ứng suất và biến dạng của cúc áo polyester trong điều kiện giặt công nghiệp ở nhiệt độ 90°C. Mô hình hình học được xây dựng trên phần mềm Siemens NX và phân tích bằng phương pháp phần tử hữu hạn trong môi trường Abaqus/Standard. Bài toán nhiệt - cơ kết hợp sử dụng phần tử C3D10T với lưới đồng nhất kích thước 0,5 mm gồm 36.085 phần tử. Kết quả mô phỏng cho thấy khi hệ đạt trạng thái cân bằng nhiệt, sự giãn nở nhiệt của cúc bị hạn chế tại bốn lỗ khâu bởi điều kiện biên cố định, tạo ra ứng suất Von Mises cực đại 69,57 MPa tại mép lỗ. Giá trị này tiệm cận giới hạn bền kéo của vật liệu, cho thấy nguy cơ nứt gãy trong quá trình sử dụng. Đồng thời, dòng nhiệt HFL xấp xỉ bằng không xác nhận trạng thái ổn định nhiệt của mô hình. Kết quả nghiên cứu là cơ sở cho việc tối ưu hóa thiết kế và lựa chọn vật liệu nhằm nâng cao độ bền của cúc áo.

Từ khóa: Cúc áo polyester, tải trọng nhiệt, phương pháp phần tử hữu hạn, ứng suất Von Mises, giặt công nghiệp.

Abstract: This paper investigates the effect of thermal loading on the stress and strain state of polyester buttons under industrial washing conditions at 90°C. The geometric model was constructed using Siemens NX software and analyzed using the finite element method in the Abaqus/Standard environment. The combined thermomechanical analysis used C3D10T elements with a 0.5 mm uniform mesh of 36,085 elements. Simulation results show that when the system reaches thermal equilibrium, the thermal expansion of the button is limited at the four stitch holes by fixed boundary conditions, creating a maximum Von Mises stress of 69.57 MPa at the hole edge. This value approaches the tensile strength limit of the material, indicating a risk of fracture during use. Simultaneously, the HFL heat flux is approximately zero, confirming the thermal stability of the model. The research results provide a basis for optimizing the design and material selection to improve the durability of buttons.

Keywords: Oil film pressure, hydrodynamic bearing, lubrication.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ngành công nghiệp dệt may đóng vai trò quan trọng trong sản xuất và xuất khẩu, trong đó các phụ liệu như cúc áo góp phần quyết định độ bền và tính thẩm mỹ của sản phẩm. Cúc áo

polyester được sử dụng phổ biến nhờ khối lượng nhỏ, khả năng gia công tốt và độ bền tương đối cao. Tuy nhiên, đặc tính và tuổi thọ của vật liệu polymer có thể chịu ảnh hưởng đáng kể bởi nhiệt độ và điều kiện môi trường

trong quá trình sử dụng [1].

Để đánh giá ứng xử của vật liệu dưới tác động nhiệt, phương pháp phần tử hữu hạn được sử dụng rộng rãi trong các bài toán truyền nhiệt và ứng suất nhiệt. Phần mềm Abaqus cho phép thực hiện các bài toán nhiệt, cơ học và nhiệt - cơ kết hợp với nhiều dạng điều kiện biên khác nhau [2]. Wang và cộng sự [3] đã sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn trong Abaqus để phân tích ứng suất và biến dạng do nhiệt của vật liệu composite polymer, cho thấy sự giãn nở nhiệt và điều kiện ràng buộc có ảnh hưởng đáng kể đến trạng thái ứng suất.

Koyanagi và cộng sự [4] nghiên cứu hư hỏng của polymer dưới tải nhiệt chu kỳ và cho thấy tác động nhiệt lặp lại có thể dẫn đến quá trình tích lũy hư hỏng. Yang và cộng sự [5] tiếp tục phân tích ứng suất nhiệt ở trạng thái ổn định và quá độ bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Các kết quả này cho thấy FEM có khả năng mô tả sự phân bố nhiệt độ và ứng suất trong vật liệu chịu tác động nhiệt. Tuy nhiên, nghiên cứu hiện tại chỉ xét trạng thái nhiệt xác lập, không đánh giá mỗi nhiệt hoặc hư hỏng do tải nhiệt chu kỳ.

Bên cạnh các nghiên cứu về mô phỏng nhiệt-cơ, ảnh hưởng của quá trình sử dụng và giặt đến vật liệu polyester cũng được quan tâm. Woo và Oh [6] nghiên cứu đặc tính của vải polyester dưới các điều kiện xử lý nhiệt và giặt. Pušić và cộng sự [7] đánh giá sự thay đổi đặc tính của vải polyester sau các quy trình giặt khác nhau. Faiz Aizamddin và Mahat [8] nghiên cứu độ bền của polyester dưới tác động của quá trình giặt, trong khi Yang và cộng sự [9] khảo sát sự hình thành vi sợi trong quá trình mài mòn vật liệu polyester. Gần đây, nghiên cứu của Pušić và cộng sự [10] cho thấy quá trình lão hóa kết hợp với giặt có thể làm thay đổi đặc tính cơ học và cấu trúc của vải polyester.



Hình 1. Hình ảnh cúc áo được sử dụng trong may mặc

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về suy giảm polymer, mô phỏng ứng suất nhiệt và ảnh hưởng của giặt đến polyester [1] - [10], các nghiên cứu trực tiếp về ứng suất nhiệt trong cúc áo polyester dưới điều kiện nhiệt độ cao của quá trình giặt công nghiệp vẫn còn hạn chế. Đặc biệt, ảnh hưởng của hình học và điều kiện ràng buộc tại các lỗ khâu đến sự tập trung ứng suất chưa được làm rõ bằng mô hình phần tử hữu hạn.

Xuất phát từ vấn đề trên, nghiên cứu này tập trung phân tích đáp ứng nhiệt - cơ của cúc áo polyester ở nhiệt độ 90°C bằng phương pháp phần tử hữu hạn trong Abaqus/Standard. Mô hình được xây dựng trên Siemens NX và sử dụng để đánh giá phân bố nhiệt độ, chuyển vị và ứng suất Von Mises khi đạt trạng thái nhiệt xác lập, đặc biệt tại khu vực mép các lỗ khâu. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở tham khảo cho việc đánh giá và tối ưu hóa thiết kế cúc áo polyester trong điều kiện sử dụng có tác động nhiệt.

2. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Xây dựng mô hình hình học

Đối tượng nghiên cứu trong bài báo là cúc áo bằng nhựa polyester, loại phụ liệu được sử dụng phổ biến trong ngành công nghiệp may mặc nhờ có độ bền cơ học tương đối cao, khả năng chịu mài mòn tốt và chi phí sản xuất thấp. Cúc áo được lựa chọn có kích thước tiêu chuẩn, thường được sử dụng trên các loại áo

sơ mi, đồng phục và trang phục công sở. Trong quá trình giặt công nghiệp, cốc chịu tác động đồng thời của nhiệt độ, lực căng từ chỉ khâu và các va đập cơ học. Trong phạm vi nghiên cứu này, bài báo tập trung đánh giá ảnh hưởng của tải trọng nhiệt đến trạng thái ứng suất và biến dạng của cốc, do đó các tác động cơ học khác không được xét đến.

Để đảm bảo mô hình phản ánh đúng đặc điểm hình học của sản phẩm thực tế, mô hình 3D được xây dựng bằng phần mềm Siemens NX. Phần mềm cho phép thiết kế chính xác các chi tiết hình học và xuất mô hình sang phần mềm Abaqus thông qua các định dạng tiêu chuẩn mà vẫn bảo đảm tính toàn vẹn của dữ liệu. Các bề mặt cong, mép bo và lỗ khâu được mô hình hóa đầy đủ nhằm hạn chế sai số trong quá trình chia lưới và phân tích số.

Hình học của cốc được xây dựng dựa trên kích thước của sản phẩm thực tế với các thông số chính như sau:

- Đường kính ngoài của cốc (D) là 19,0 mm.
- Chiều dày trung bình (t) là 3,0 mm. Phần mép ngoài và hai bề mặt được bo tròn nhằm mô phỏng đúng hình dạng của cốc thương mại, đồng thời giảm hiện tượng tập trung ứng suất do các góc sắc trong mô hình số.
- Cốc gồm 04 lỗ khâu bố trí đối xứng qua tâm, mỗi lỗ có đường kính 1,6 mm.
- Tâm của bốn lỗ được bố trí trên bốn đỉnh của một hình vuông tưởng tượng có cạnh 6,0 mm, tạo nên sự đối xứng hình học và giúp đánh giá chính xác sự phân bố ứng suất dưới tác động của tải trọng nhiệt.

Việc lựa chọn mô hình đối xứng giúp giảm ảnh hưởng của sai số hình học và cho phép đánh giá rõ hơn cơ chế hình thành ứng suất nhiệt tại các vị trí có sự thay đổi tiết diện. Trong quá trình gia nhiệt, phần vật liệu xung quanh các lỗ khâu bị hạn chế giãn nở bởi điều

kiện biên cố định, làm xuất hiện sự tập trung ứng suất tại mép lỗ. Do đó, việc mô hình hóa chính xác hình dạng của các lỗ khâu đóng vai trò quan trọng đối với độ tin cậy của kết quả mô phỏng.

Sau khi hoàn thành thiết kế, mô hình được kiểm tra về tính kín của bề mặt, loại bỏ các lỗi hình học và chuyển sang môi trường Abaqus/CAE để thực hiện chia lưới, gán đặc tính vật liệu và tiến hành phân tích nhiệt - cơ. Hình 2 trình bày mô hình hình học 3D của cốc áo được sử dụng trong nghiên cứu.



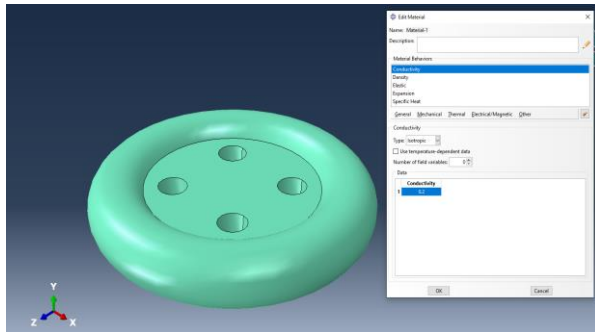
Hình 2. Mô hình hoá cốc áo bằng phần mềm NX và đưa vào phần mềm mô phỏng Abaqus

2.2. Tính chất vật liệu

Vật liệu sử dụng trong mô phỏng là nhựa polyester không no, một loại polymer nhiệt rắn được ứng dụng rộng rãi trong sản xuất phụ liệu may mặc nhờ độ bền cơ học và tính ổn định nhiệt. Trong nghiên cứu này, vật liệu được giả định là đồng nhất và đẳng hướng để đơn giản hóa quá trình tính toán mà vẫn đảm bảo độ tin cậy của kết quả ứng suất. Gán điều kiện vật liệu cho mô hình trong phần mềm Abaqus được thể hiện như trong Hình 3.

Các thông số nhiệt - cơ của nhựa polyester được thiết lập trong module Property của phần mềm Abaqus dựa trên hệ đơn vị nhất quán SI. Các giá trị đặc tính vật liệu được tham chiếu từ các kết quả thực nghiệm tiêu chuẩn và dữ

liệu kỹ thuật của nhà sản xuất, được tổng hợp chi tiết trong Bảng 1.



Hình 3. Gán điều kiện vật liệu cho mô hình

Bảng 1. Thông số đặc tính nhiệt - cơ của nhựa polyester

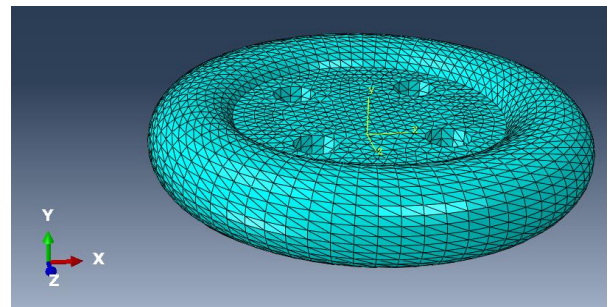
Thông số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Khối lượng riêng	ρ	$1,2 \times 10^{-9}$	tấn/mm ³
Modul đàn hồi	E	3000	MPa
Hệ số Poisson	ν	0,35	-
Hệ số giãn nở nhiệt	α	100×10^{-6}	1/°C
Hệ số dẫn nhiệt	k	0,2	W/(mm.°C)
Nhiệt dung riêng	c_p	$1,2 \times 10^9$	mJ/(tấn.°C)

2.3. Thiết lập mô hình phần tử hữu hạn

Để giải quyết bài toán tương tác đa vật lý giữa trường nhiệt độ và biến dạng cơ học, quy trình mô phỏng số được thiết lập một cách hệ thống trong môi trường Abaqus/Standard. Bước phân tích nghiên cứu sử dụng quy trình phân tích nhiệt - cơ kết hợp. Chế độ trạng thái xác lập được lựa chọn nhằm đánh giá trực tiếp trạng thái ứng suất và biến dạng của cốc áo tại thời điểm nhiệt độ đã phân bố đồng đều và đạt ngưỡng mục tiêu 90°C. Phương pháp này cho phép thu được kết quả hội tụ ổn định, phản

ánh chính xác trạng thái chịu tải nghiêm trọng nhất của chi tiết.

Trong nghiên cứu này, miền tính toán được rời rạc hóa bằng phương pháp phần tử hữu hạn nhằm thiết lập hệ phương trình đại số biểu diễn mối quan hệ giữa trường nhiệt độ và trường biến dạng. Thay vì sử dụng các phần tử lục diện truyền thống, mô hình được chia lưới bằng loại phần tử C3D10T. Đây là loại phần tử tứ diện bậc hai có tích hợp khả năng tính toán kết hợp nhiệt - cơ, được thiết kế đặc biệt để khắc phục hiện tượng cứng hóa lưới và đảm bảo độ chính xác cao khi mô phỏng các biên dạng cong phức tạp của cốc áo. Mô hình chia lưới cốc áo được thể hiện như trong Hình 4.



Hình 4. Chia lưới mô hình cốc áo

Mô hình được chia lưới đồng nhất trên toàn bộ thể tích thực thể với kích thước phần tử mục tiêu là 0,5 mm. Kích thước này được lựa chọn nhằm đảm bảo khả năng mô tả hình học tại các khu vực có tiết diện nhỏ, đặc biệt là vùng vách trong của 04 lỗ khoan, nơi có thể xuất hiện sự tập trung ứng suất và gradient nhiệt lớn. Với kích thước phần tử 0,5 mm, các vùng hình học hẹp vẫn được mô tả với số lượng phần tử đủ để phản ánh tương đối đầy đủ sự biến thiên của trường ứng suất và nhiệt độ.

Sau khi rời rạc hóa, mô hình thu được 36.085 phần tử tứ diện bậc hai. Việc sử dụng phần tử bậc hai giúp mô tả tốt hơn hình học cong và sự biến thiên của trường cơ - nhiệt trong mô

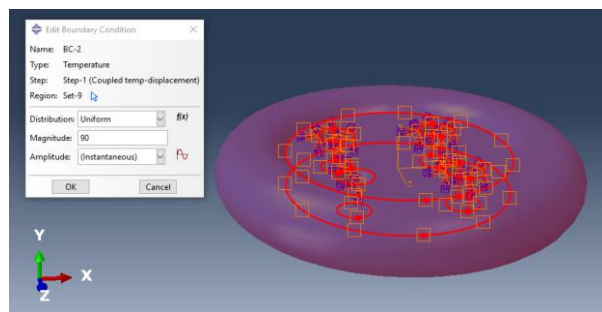
hình. Cấu hình lưới này được sử dụng để thực hiện phân tích bằng Abaqus/Standard, qua đó xác định sự phân bố ứng suất Von Mises và trường nhiệt độ ở trạng thái xác lập.

Do ứng suất cực đại có khả năng xuất hiện tại mép lỗ, là khu vực nhạy cảm với kích thước phần tử và điều kiện ràng buộc, kết quả ứng suất cực đại cần được xem xét thận trọng khi đánh giá độ tin cậy của mô hình. Trong nghiên cứu này, kích thước phần tử 0,5 mm được sử dụng làm cấu hình lưới tính toán chính; việc đánh giá hội tụ lưới có thể được thực hiện bổ sung thông qua so sánh các mức kích thước phần tử khác nhau nhằm xác định mức độ ảnh hưởng của mật độ lưới đến chuyển vị và ứng suất cực đại.

2.4. Điều kiện biên và tải trọng nhiệt

Mô phỏng tái hiện kịch bản giặt công nghiệp ở nhiệt độ cao (90°C), trong đó cốc áo bị kim hãm động học bởi các sợi chỉ khâu có độ bền kéo cao.

Điều kiện biên cố định hoàn toàn được áp đặt lên toàn bộ bề mặt bên trong của bốn lỗ cốc. Ràng buộc cứng này lý tưởng hóa hiệu ứng kim hãm của sợi chỉ, ngăn cản sự giãn nở nhiệt tự do tại các điểm kết nối với trang phục. Quá trình áp điều kiện biên cho mô hình được thể hiện như trong Hình 5.



Hình 5. Áp điều kiện biên cho mô hình

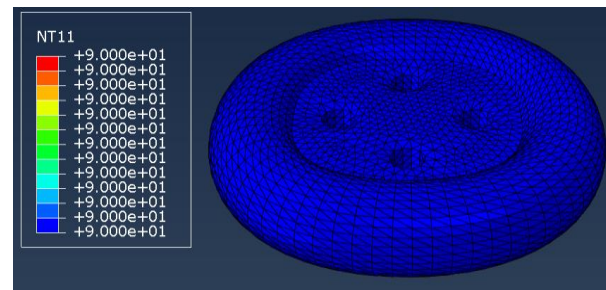
Trường nhiệt độ ban đầu được thiết lập đồng nhất tại mức 25°C. Tiếp theo, một tải trọng nhiệt trạng thái xác lập ở mức 90°C được chỉ

định cho toàn bộ các bề mặt bên ngoài, tạo ra một gradient nhiệt cường bức $\Delta T = 65^\circ\text{C}$ trong toàn bộ mô hình. Trường ứng suất nội sinh phát sinh từ sự không tương thích giữa biến dạng nhiệt tự do và các ràng buộc vật lý tại nút lưới đã được thiết lập.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Phân tích sự phân bố trường nhiệt độ xác lập

Quá trình đánh giá tương tác nhiệt - cơ bắt đầu bằng việc xác lập sự phân bố nhiệt độ trên toàn bộ cấu trúc cốc áo polyester. Kết quả mô phỏng được thể hiện như Hình 6. Tại bậc tự do nhiệt độ cho thấy mô hình đã đạt trạng thái cân bằng nhiệt hoàn toàn tại mức 90°C. Việc sử dụng bước phân tích trạng thái xác lập cho phép các thành phần cấu trúc hấp thụ nhiệt năng đồng đều, từ đó loại bỏ các gradient nhiệt cục bộ có thể gây nhiễu cho kết quả ứng suất cơ học.

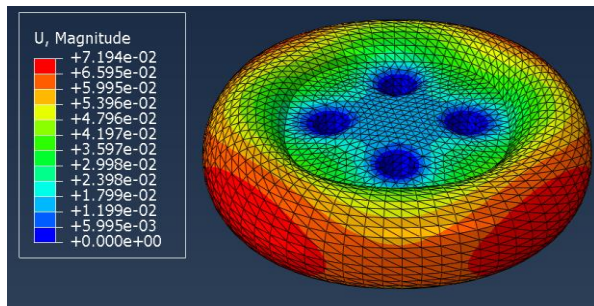


Hình 6. Phân bố trường nhiệt độ xác lập trong mô phỏng

Sự phân bố nhiệt độ đồng nhất này đóng vai trò là tác nhân kích thích chính cho quá trình giãn nở nhiệt. Với mức nhiệt độ ban đầu được xác định tại 25°C, toàn bộ khối vật liệu đã trải qua một sự thay đổi nhiệt độ cường bức là $\Delta T = 65^\circ\text{C}$. Dựa trên hệ số giãn nở nhiệt cao đặc trưng của nhựa polyester, sự gia tăng nhiệt độ này tạo ra một trường biến dạng nhiệt tiềm tàng rất lớn, trực tiếp dẫn đến sự thay đổi hình học và tích lũy nội lực tại các khu vực bị kim hãm cơ học.

3.2. Đặc tính biến dạng và chuyển vị hình học

Sự thay đổi về kích thước và hình dạng của cốc áo dưới tác động nhiệt được thể hiện rõ nét qua kết quả chuyển vị tổng thể U như trong Hình 7. Phân tích các dải màu trên biểu đồ cho thấy một xu hướng giãn nở hướng tâm rõ rệt từ tâm cốc ra phía biên ngoài. Chuyển vị lớn nhất đạt giá trị cực đại là $7,194 \times 10^{-2}$ mm, tập trung tại các khu vực rìa ngoài của cốc áo – nơi vật liệu có bậc tự do lớn nhất để thực hiện quá trình giãn nở tự do.



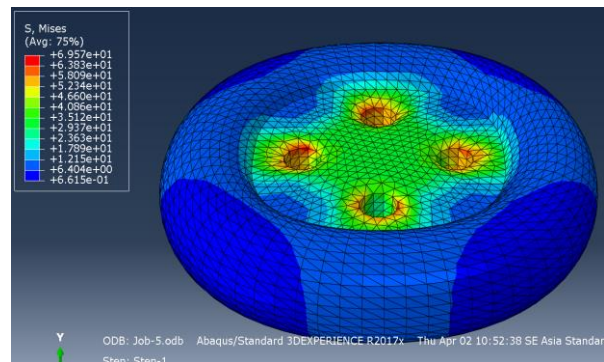
Hình 7. Chuyển vị hình học của mô hình cốc áo dưới tác động nhiệt

Đáng chú ý, tại khu vực vách trong của 04 lỗ cốc, giá trị chuyển vị ghi nhận được xấp xỉ bằng không. Kết quả này phản ánh chính xác sự kìm hãm khắt khe của điều kiện biên cố định, mô phỏng hiệu ứng của sợi chỉ khâu có độ bền cao. Sự đối nghịch giữa xu hướng giãn nở tự nhiên của khối nhựa và sự kìm hãm tại các điểm kết nối lỗ cốc chính là cơ chế gốc rễ tạo ra sự không tương thích về biến dạng. Hiện tượng này không chỉ gây ra sự biến dạng cục bộ tại các lỗ mà còn là tiền đề cho sự xuất hiện của các dải ứng suất tập trung nghiêm trọng quanh khu vực khâu nối.

3.3. Phân tích trường ứng suất Von Mises và cơ chế tập trung ứng suất

Trường ứng suất Von Mises được sử dụng để đánh giá mức độ chịu tải của vật liệu và xác định các vị trí có nguy cơ hư hỏng cao dưới tác động của tải trọng nhiệt. Kết quả mô

phỏng được trình bày trên Hình 8 cho thấy ứng suất phân bố không đồng đều trên toàn bộ cốc áo. Ứng suất lớn nhất đạt 69,57 MPa, trong khi phần lớn diện tích bề mặt cốc có giá trị ứng suất thấp hơn đáng kể. Các vùng ứng suất cực đại tập trung chủ yếu tại mép trong của bốn lỗ khâu, nơi tồn tại sự thay đổi đột ngột về hình học và đồng thời chịu ảnh hưởng trực tiếp của điều kiện biên cố định.



Hình 8. Ứng suất Von Mises của mô hình cốc áo dưới tác động nhiệt

Sự tập trung ứng suất tại các lỗ khâu chủ yếu xuất phát từ sự giãn nở nhiệt bị hạn chế trong quá trình gia nhiệt. Khi nhiệt độ tăng từ điều kiện ban đầu lên 90°C , vật liệu polyester có xu hướng giãn nở theo các phương. Tuy nhiên, tại bốn lỗ khâu, chuyển vị được hạn chế thông qua điều kiện liên kết giả thiết trong mô hình, làm phát sinh sự không đồng nhất về khả năng giãn nở giữa vùng lân cận lỗ và phần vật liệu còn lại. Sự chênh lệch biến dạng nhiệt này dẫn đến sự hình thành ứng suất nhiệt và làm cho ứng suất có xu hướng tập trung tại khu vực mép lỗ.

Bên cạnh ảnh hưởng của điều kiện ràng buộc, hình học tại mép lỗ với bán kính cong tương đối nhỏ cũng góp phần làm tăng mức độ tập trung ứng suất. Kết quả mô phỏng cho thấy các vị trí này là khu vực có ứng suất Von Mises lớn và cần được quan tâm khi đánh giá đáp ứng cơ - nhiệt của vật liệu.

Các nhận định trên được giới hạn trong phạm

vi điều kiện mô phỏng với tải nhiệt được xét đến 90°C và điều kiện ràng buộc đã thiết lập. Kết quả chưa đủ cơ sở để kết luận về sự hình thành vết nứt, phá hủy hoặc mỏi nhiệt của vật liệu, do nghiên cứu chưa xem xét tải nhiệt chu kỳ, tải trọng cơ học, tác động của môi trường giặt tẩy và sự thay đổi tính chất vật liệu theo thời gian.

Giá trị ứng suất Von Mises cực đại 69,57 MPa xấp xỉ giới hạn bền kéo của nhựa polyester không no (khoảng 40-70 MPa, tùy theo thành phần và điều kiện chế tạo). Điều này cho thấy dưới tác động của tải trọng nhiệt, vật liệu đã làm việc gần giới hạn chịu lực, làm tăng khả năng xuất hiện các vết nứt vi mô tại mép lỗ khâu. Sau nhiều chu kỳ gia nhiệt và làm nguội trong quá trình giặt công nghiệp, các vết nứt này có thể phát triển theo cơ chế mỏi nhiệt, dẫn đến nứt gãy hoặc phá hủy cục bộ của cúc áo.

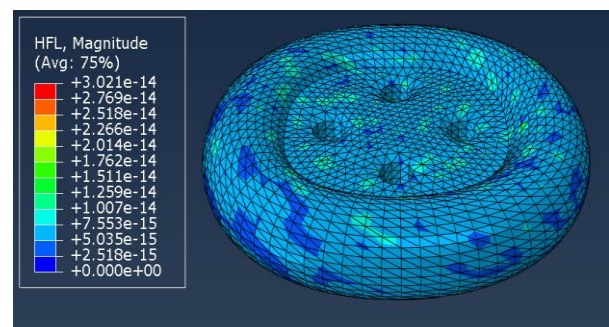
Kết quả mô phỏng cũng phù hợp với quan sát thực tế khi các hư hỏng của cúc áo thường xuất hiện đầu tiên tại vùng xung quanh lỗ khâu thay vì trên bề mặt ngoài. Điều này chứng tỏ hình học của lỗ khâu và điều kiện liên kết với sợi chỉ là hai yếu tố ảnh hưởng đáng kể đến trạng thái ứng suất của cúc trong môi trường nhiệt. Vì vậy, để nâng cao độ bền của sản phẩm, cần xem xét tối ưu hóa đường kính, khoảng cách giữa các lỗ, bán kính bo mép lỗ cũng như lựa chọn vật liệu có giới hạn bền và khả năng chịu nhiệt cao hơn nhằm giảm hiện tượng tập trung ứng suất và kéo dài tuổi thọ của cúc áo.

3.4. Phân tích dòng nhiệt năng và trạng thái cân bằng năng lượng

Kết quả phân bố dòng nhiệt được trình bày trên Hình 9 nhằm đánh giá trạng thái truyền nhiệt của mô hình sau khi đạt điều kiện ổn định. Giá trị dòng nhiệt trong toàn bộ cúc áo

đạt mức rất nhỏ, khoảng $3,02 \times 10^{-14}$ W/mm², có thể xem xấp xỉ bằng không. Điều này cho thấy quá trình truyền nhiệt bên trong vật liệu đã hoàn tất và cúc áo đạt trạng thái cân bằng nhiệt với môi trường giặt ở 90°C. Khi đó, nhiệt độ phân bố gần như đồng đều trên toàn bộ cấu trúc và không còn tồn tại dòng nhiệt đáng kể bên trong vật liệu.

Giá trị HFL rất nhỏ chứng tỏ gradient nhiệt độ trong mô hình hầu như không còn, phù hợp với giả thiết phân tích ở trạng thái xác lập. Do đó, trường ứng suất Von Mises thu được trong mục 3.3 không còn chịu ảnh hưởng của quá trình truyền nhiệt tức thời mà chủ yếu được hình thành do biến dạng nhiệt bị ràng buộc bởi điều kiện biên cố định tại bốn lỗ khâu. Nói cách khác, mặc dù toàn bộ cúc áo đã đạt cùng mức nhiệt độ, sự giãn nở nhiệt của vật liệu vẫn không thể diễn ra tự do do các vị trí liên kết với chỉ khâu bị hạn chế chuyển vị, từ đó làm phát sinh ứng suất nhiệt và tạo nên hiện tượng tập trung ứng suất tại mép lỗ.



Hình 9. Mô phỏng dòng nhiệt năng của mô hình cúc áo dưới tác động nhiệt

Kết quả này cho thấy cơ chế hư hỏng của cúc áo polyester trong điều kiện giặt công nghiệp chủ yếu liên quan đến sự không tương thích giữa biến dạng nhiệt tự do của vật liệu và các điều kiện ràng buộc cơ học, thay vì do sự tồn tại của gradient nhiệt độ trong vật liệu. Điều này cũng cho thấy việc tối ưu hóa hình học lỗ khâu, cải thiện phương pháp liên kết hoặc lựa chọn vật liệu có hệ số giãn nở nhiệt thấp hơn

là những giải pháp khả thi nhằm giảm ứng suất nhiệt và nâng cao tuổi thọ của cúc áo trong quá trình sử dụng.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã triển khai thành công mô hình mô phỏng nhiệt - cơ kết hợp để đánh giá hành vi của cúc áo polyester trong điều kiện giặt công nghiệp ở 90°C. Dựa trên các kết quả thu được, một số kết luận chính được rút ra như sau:

Thứ nhất, sự gia tăng nhiệt độ cưỡng bức từ 25°C lên 90°C tạo ra xu hướng giãn nở hướng tâm đáng kể với giá trị chuyển vị cực đại đạt 0,0719 mm tại các vùng biên tự do. Tuy nhiên, do sự kìm hãm động học tại vị trí 04 lỗ khâu, quá trình giãn nở nhiệt tự nhiên bị cản trở nghiêm trọng, dẫn đến sự tích lũy năng lượng nội lực cường độ cao.

Thứ hai, trường ứng suất Von Mises ghi nhận giá trị cực đại đạt mức 69,57 MPa, tập trung cục bộ tại vách trong của các lỗ khâu. Giá trị này đã tiệm cận giới hạn chảy cũng như độ bền kéo của nhựa polyester tiêu chuẩn. Điều này cho phép khẳng định rằng, cơ chế phá hủy của cúc áo không phải do tác động cơ học trực

tiếp mà do sự không tương thích về biến dạng nhiệt trong cấu trúc bị ràng buộc, dẫn đến nguy cơ khởi phát vết nứt mỏi tại mép lỗ.

Thứ ba, sự triệt tiêu của dòng nhiệt tại trạng thái xác lập chứng minh rằng sự hư hại này mang tính hệ thống và xảy ra ngay cả khi nhiệt độ đã phân bố đồng đều, chứ không chỉ xuất hiện do sốc nhiệt nhất thời.

Dựa trên các phát hiện khoa học nêu trên, nghiên cứu đề xuất một số hướng phát triển nhằm nâng cao độ bền của phụ liệu may mặc:

Cần xem xét việc gia tăng bán kính góc lượn tại mép lỗ hoặc điều chỉnh khoảng cách giữa các lỗ để phân tán nồng độ ứng suất nhiệt.

Khuyến nghị sử dụng các loại polymer biến tính hoặc nhựa kỹ thuật có hệ số giãn nở nhiệt thấp hơn và độ dẻo dai cao hơn để tăng khả năng hấp thụ biến dạng cưỡng bức.

Các nghiên cứu tiếp theo có thể xem xét đến tác động của tải trọng nhiệt chu kỳ và sự thay đổi đặc tính vật liệu trong môi trường hóa chất giặt tẩy để có cái nhìn toàn diện hơn về tuổi thọ sản phẩm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] N.T. Chinh and T. Hoang, "Life-time prediction for polymer materials," *Vietnam Journal of Science and Technology*, vol. 59, no. 5, pp. 527–551, 2021, doi: 10.15625/2525-2518/59/5/16057.
- [2] Dassault Systèmes Simulia Corp., *Abaqus Analysis User's Guide*. Providence, RI, USA: Dassault Systèmes, 2024.
- [3] J. Wang, D. Kelly, and W. Hillier, "Finite element analysis of temperature induced stresses and deformations of polymer composite components," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 19, no. 17, pp. 1377–1392, 2000.
- [4] J. Koyanagi, T. Sugiyama, M. J. M. Fikry, Y. Li, and T. Tsukada, "Numerical simulations for damage and failure of a polymer material subjected to thermal fatigue loading," *Polymers*, vol. 17, no. 9, Art. no. 1153, 2025, doi: 10.3390/polym17091153.
- [5] Y. Yang, M. Yan, Z. Zhang, D. Hao, X. Chen, and W. Chen, "Steady-state and transient thermal stress analysis using a polygonal finite element method," *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 251, Art. no. 104413, 2025, doi: 10.1016/j.finel.2025.104413.

- [6] Y.E. Woo and K.W. Oh, "Fabrication of polyester fabrics with tungsten bronze nanorods and a silane coupling agent for improved thermal storage and washing durability," *Fashion and Textiles*, vol. 10, Art. no. 1, 2023, doi: 10.1186/s40691-022-00310-y.
- [7] T. Pušić, B. Vojnović, M. Čurlin, I. Bekavac, T. Kaurin, K. Grgić, K. Šimić, and Z. Kovačević, "Assessment of polyester fabrics, effluents and filtrates after standard and innovative washing processes," *Microplastics*, vol. 1, no. 3, pp. 494–504, 2022, doi: 10.3390/microplastics1030035.
- [8] M. Faiz Aizamddin and M. M. Mahat, "Enhancing the washing durability and electrical longevity of conductive polyaniline-grafted polyester fabrics," *ACS Omega*, vol. 8, no. 41, pp. 37936–37947, 2023, doi: 10.1021/acsomega.3c03377.
- [9] T. Yang, M. Gao, and B. Nowack, "Formation of microplastic fibers and fibrils during abrasion of a representative set of 12 polyester textiles," *Science of the Total Environment*, vol. 860, Art. no. 160758, 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160758.
- [10] A. Šaravanja, T. Pušić, J. Volmajer Valh, and T. Dekanić, "Aging and modified washing process for polyester fabrics - Environmental impact," *Polymers*, vol. 16, no. 23, Art. no. 3238, 2024, doi: 10.3390/polym16233238.

Thông tin liên hệ:

Lê Huỳnh Đức

Điện thoại: 0393003915 - Email: lhduc@uneti.edu.vn

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp