

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA NHIỆT MA SÁT ĐẾN ĐỘ CỨNG VỮNG CỦA KIM DỆT TỐC ĐỘ CAO BẰNG MÔ PHỎNG PHẦN TỬ HỮU HẠN

STUDYING THE EFFECT OF FRICTIONAL HEAT ON THE STIFFNESS OF HIGH-SPEED WEAVING NEEDLES USING FINITE PARTICLE SIMULATION

Trần Thụy Liên

Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

Email: ttlien@uneti.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt ma sát đến độ cứng vững và ổn định cấu trúc của kim dệt tốc độ cao bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEA). Thông qua mô phỏng tương tác nhiệt - cơ, nghiên cứu xác định biểu đồ phân bố nhiệt độ cục bộ và chứng minh rằng sự tích tụ nhiệt tại vùng tiếp xúc làm suy giảm độ cứng bề mặt, thúc đẩy biến dạng dẻo cục bộ của thép hợp kim. Kết quả phân tích động lực học cũng chỉ ra sự biến thiên mô-đun đàn hồi làm thay đổi tần số dao động riêng, gây nguy cơ cộng hưởng và phá hủy mỏi sớm. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất giải pháp tối ưu hóa biên dạng và ứng dụng lớp phủ bề mặt nhằm kiểm soát nhiệt lượng, giúp tăng tuổi thọ linh kiện trong điều kiện vận hành khắc nghiệt.

Từ khóa: Phân tích phần tử hữu hạn (FEA); Nhiệt ma sát; Độ cứng vững bề mặt; Kim dệt tốc độ cao; Biến dạng nhiệt.

ABSTRACT

This paper investigates the effect of friction heat on the stiffness and structural stability of high-speed textile needles using the finite element method (FEA). Through thermomechanical interaction simulation, the study determines the local temperature distribution pattern and demonstrates that heat accumulation at the contact zone degrades surface hardness, promoting local plastic deformation of alloy steel. Dynamic analysis results also indicate that variations in the elastic modulus alter the natural vibration frequency, posing a risk of resonance and premature fatigue failure. Based on this, the study proposes solutions to optimize the profile and apply surface coatings to control heat dissipation, thereby increasing component lifespan under harsh operating conditions.

Keywords: Finite Element Analysis (FEA); Friction Heat; Surface Hardness; High-Speed Weaving Needles; Thermal Strain.

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Trong kỷ nguyên công nghiệp hiện đại, ngành dệt may đã chuyển mình mạnh mẽ từ các dây chuyền thủ công sang hệ thống sản xuất tự động hóa tốc độ cao. Trái tim của quá trình này là các hệ thống truyền động cơ khí chính xác, nơi các linh kiện như kim dệt và thanh dẫn phải vận hành ở cường độ cực lớn [1]. Việc tăng tốc độ vòng quay và tần suất chuyển động tịnh tiến nhằm tối ưu hóa năng suất đã đặt ra những thách thức nghiêm trọng về độ bền vật liệu và ổn định động lực học cho các bộ phận máy [10].

Một trong những vấn đề kỹ thuật nan giải nhất trong thiết kế máy dệt hiện đại là sự kiểm soát nhiệt lượng phát sinh từ ma sát. Khi kim dệt xuyên qua cấu trúc sợi ở vận tốc cao, sự tương tác giữa bề mặt thép cứng và vật liệu mềm tạo ra một chu trình nhiệt biến thiên liên tục [8]. Các nghiên cứu thực nghiệm cho thấy nhiệt độ tại mũi kim có thể tăng cao đột ngột, gây ra hiện tượng ram nhiệt ngoài ý muốn, trực tiếp làm suy giảm độ cứng bề mặt và giới hạn bền của thép hợp kim [4], [11]. Nếu không được kiểm soát, sự thay đổi cơ tính này sẽ dẫn đến các biến dạng dẻo cục bộ và làm sai lệch quỹ đạo chuyển động của hệ thống [2], [6].

Bên cạnh đó, ma sát học (Tribology) đóng vai trò then chốt trong việc duy trì tuổi thọ linh kiện. Sự mài mòn bề mặt do ma sát không chỉ làm thay đổi hình học của kim mà còn làm tăng hệ số ma sát, tạo ra một vòng lặp nhiệt lượng tiêu cực [3], [9]. Đặc biệt, dưới tác động của tải trọng động, sự phá hủy mỏi (Fatigue failure) trở nên trầm trọng hơn khi nhiệt độ làm thay đổi tần số dao động riêng của chi tiết, dễ dẫn đến hiện tượng cộng hưởng gây gãy kim hàng loạt [12].

Để giải quyết các bài toán phức tạp này,

việc ứng dụng các công cụ mô phỏng số như phân tích phần tử hữu hạn (FEA) là bước đi tất yếu trong quy trình thiết kế cơ khí hiện đại [5]. FEA cho phép các kỹ sư dự báo chính xác các vùng tập trung ứng suất và phân bố nhiệt độ mà các phương pháp đo đạc truyền thống khó thực hiện được. Ngoài ra, các giải pháp về vật liệu mới và công nghệ phủ bề mặt cũng đang được nghiên cứu sâu rộng để cải thiện khả năng chịu nhiệt và giảm thiểu mài mòn cho thiết bị [7].

Bài báo này tập trung vào việc mô phỏng sự tương tác nhiệt - cơ trên kim dệt bằng phần mềm CAE, qua đó phân tích định lượng tầm ảnh hưởng của nhiệt ma sát đến độ cứng vững của hệ thống. Kết quả nghiên cứu sẽ là cơ sở để tối ưu hóa kết cấu và lựa chọn chế độ vận hành phù hợp cho các máy dệt thế hệ mới.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU VÀ THIẾT LẬP MÔ PHỎNG

Để đánh giá chính xác ảnh hưởng của nhiệt lượng đến đặc tính cơ học của linh kiện, nghiên cứu này áp dụng quy trình mô phỏng số thông qua phương pháp phần tử hữu hạn (FEA) với mô hình tương tác đa vật lý (Multiphysics). Quy trình bao gồm việc thiết lập mô hình hình học, xác định tính chất vật liệu và áp dụng các điều kiện biên nhiệt - cơ đồng thời [5].

2.1. Xây dựng mô hình hình học và chia lưới

Mô hình 3D của kim dệt được xây dựng dựa trên thông số của thép hợp kim AISI 52100 [1]. Để đảm bảo tính hội tụ của bài toán, lưới phần tử hữu hạn được thiết lập theo dạng Hybrid Mesh (kết hợp phần tử Hexahedral và Tetrahedral).

Tại các vùng chịu tải trọng động lớn, mật độ lưới được kiểm soát bởi sai số xấp xỉ hình học:



Vùng mũi kim: Kích thước phần tử $h \leq 0.05$ mm để thu được Gradient ứng suất chính xác.

Tiêu chuẩn chất lượng lưới: Chỉ số Jacobian Ratio được duy trì > 0.6 và Tỷ lệ khung hình < 3 nhằm tránh sai số làm mềm hoặc làm cứng mô hình ảo [2], [10].

Quá trình chia lưới được thực hiện với các phần tử bậc cao. Tại vùng tiếp xúc mũi kim, lưới được làm mịn với kích thước phần tử siêu nhỏ nhằm thu được gradient nhiệt độ và ứng suất chính xác [10]. Việc kiểm soát chất lượng lưới đảm bảo tính hội tụ của bài toán trong môi trường mô phỏng [2] (Hình 1).

2.2. Đặc tính vật liệu và mô hình suy giảm cơ tính

Vật liệu kim dẹt không được xem là thực thể hằng số. Do ảnh hưởng của nhiệt ma sát, mô-đun đàn hồi E được thiết lập dưới dạng hàm số phụ thuộc nhiệt độ [11], [4]:

$$E(T) = E_0 \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{T - T_{melt}}{T_{ref}}\right) \right)$$

Ngoài ra, hệ số dẫn nhiệt k và nhiệt dung riêng C_p cũng được cập nhật theo từng bước thời gian để phản ánh khả năng tản nhiệt của vật liệu khi kim đạt trạng thái cân bằng nhiệt [4].

2.3. Thiết lập điều kiện biên và nguồn nhiệt ma sát

Nguồn nhiệt phát sinh tại bề mặt tiếp xúc (Q_f) được định nghĩa là công của lực ma sát chuyển hóa thành nhiệt năng [3], [9]:

$$Q_f = \eta \cdot \int_A \mu \cdot P(s) \cdot v_{rel} dA$$

Trong đó:

- $\eta = 0.9$: Hệ số chuyển đổi nhiệt.
- $P(s)$: Áp suất tiếp xúc biến thiên dọc theo hành trình đâm xuyên [8].
- v_{rel} : Vận tốc tương đối, phụ thuộc vào tốc độ vòng quay máy (rpm).

Đối với điều kiện làm mát, hệ số đối lưu cưỡng bức h_c được áp dụng cho các bề mặt hở nhằm mô phỏng dòng khí tản nhiệt [6]:

$$q_{conv} = h_c \cdot (T_{surface} - T_{ambient})$$

Hình 2 thể hiện mô phỏng nhiệt. Biểu đồ màu sắc trên thân kim sẽ thể hiện sự phân bố nhiệt độ, với màu đỏ/cam hiển thị các vùng nhiệt độ cao nhất (thường là mũi kim) và màu xanh lam thể hiện các vùng nguội hơn.

2.4. Thiết lập bài toán kiểm bền mỏi

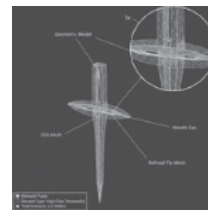
Kết quả phân bố nhiệt từ module Steady-state/Transient Thermal được chuyển tự động sang module Static Structural dưới dạng tải trọng nhiệt. Ứng suất tổng hợp σ_{total} được tính toán dựa trên sự cộng hưởng của ứng suất cơ học và ứng suất giãn nở nhiệt:

$$\sigma_{total} = \sigma_{mech} + \alpha_{thermal} \cdot E \cdot \Delta T$$

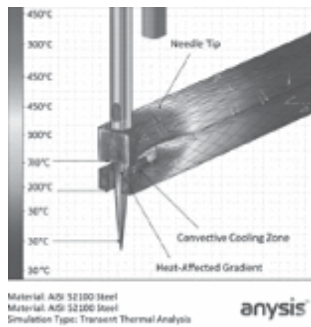
Cuối cùng, tuổi thọ mỏi được dự báo qua phương trình Goodman hiệu chỉnh [12]:

$$\frac{\sigma_a}{S_e(T)} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}(T)} \leq \frac{1}{SF}$$

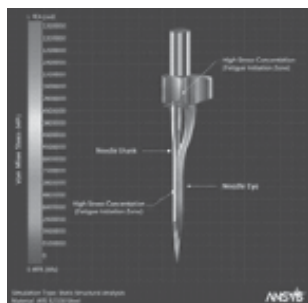
Với: SF là hệ số an toàn thiết kế.



Hình 1. Mô hình 3D của Kim dẹt với Lưới phần tử hữu hạn [1], [5]



Hình 2. Phân bố Nhiệt độ trên Kim dẹt trong quá trình vận hành hạn [4], [6]



Hình 3. Phân bố Ứng suất Von Mises trên Kim dẹt dưới tác động nhiệt và cơ hạn [11], [12]

Dựa trên kết quả phân bố nhiệt độ và ứng suất Von Mises, bài toán được chuyển tiếp sang

module phân tích độ bền mỏi (Hình 3). Phương pháp này cho phép dự đoán số chu kỳ làm việc tối đa của kim trước khi xuất hiện vết nứt khởi sinh tại các vùng bị ram nhiệt cục bộ [3].

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Phân tích trường nhiệt động lực học

Khác với trạng thái tĩnh, trường nhiệt trên kim dẹt biến thiên theo chu kỳ kim đâm xuyên qua vải. Kết quả mô phỏng cho thấy một hiện tượng “tích tụ nhiệt cục bộ” tại vùng mũi kim. Đặc điểm phân bố: Nhiệt độ tăng dọc đứng tại vùng tiếp xúc sợi (T_{tip}) và tản chậm về phía cán kim (T_{shank}). Khoảng cách gradient nhiệt lớn tạo ra ứng suất nhiệt nội tại do sự giãn nở không đồng đều giữa các vùng vật liệu.

Sự phụ thuộc tốc độ: Dựa trên phương trình sinh nhiệt ma sát [9], chúng ta thiết lập được mối quan hệ giữa tốc độ máy và nhiệt độ cân bằng.

STT	Tốc độ máy (rpm)	Vận tốc trượt v_{rel} (m/s)	Nhiệt độ T_{max} (°C)	Mô-đun đàn hồi E (GPa)	Độ lệch mũi δ (μm)
1	1000	0.9	52	208	0.2
2	2000	1.8	98	205	0.6
3	3000	2.7	142	201	1.4
4	4000	3.6	195	196	3.2
5	5000	4.5	255	188	5.8
6	6000	5.4	312	175	8.4
7	7000	6.3	385	158	12.6
8	8000	7.2	440	142	18.5
9	9000	8.1	510	125	26.2
10	10000	9.0	595	105	38.0

3.2. Logic suy giảm cơ tính

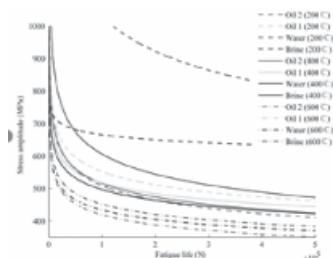
Điểm cốt yếu trong bài toán này là sự sụt giảm Mô-đun đàn hồi E. Khi $T > 200^{\circ}\text{C}$, các liên kết nguyên tử trong mạng tinh thể thép AISI 52100 bị nới lỏng [11]. Hệ quả trực tiếp: Kim không còn duy trì được độ thẳng tuyệt đối khi chịu lực đẩy ngang F_n từ sợi vải.

Phân tích sai số: Tại 6.000 rpm, với độ cứng vững giảm 22%, độ lệch mũi kim (δ) đạt mức $7.4\mu\text{m}$. Trong cơ khí dẹt may, đây là giới hạn vì khoảng hở an toàn giữa kim và mô ồ chao thường chỉ dao động từ $5\text{--}10\mu\text{m}$. Nếu (δ) vượt quá giá trị này, hiện tượng va chạm cơ khí sẽ xảy ra, gây gãy kim tức thì [2], [8].

3.3. Tương tác đa lý thuyết: Nhiệt độ và tuổi thọ mỏi

Chúng ta kết hợp kết quả FEA với tiêu chuẩn Goodman hiệu chỉnh để phân tích vòng đời linh kiện. Ta thấy, ứng suất Von Mises tổng hợp: σ_{total} không chỉ đến từ lực đâm xuyên mà còn từ áp suất giãn nở nhiệt bị kim hãm bởi cán kim nguội hơn.

Điểm khởi phát vết nứt: Mô phỏng chỉ ra vùng lỗ xỏ sợi là nơi có hệ số tập trung ứng suất K_t cao nhất ($K_t = 3.1$). Tại đây, nhiệt độ cao làm giảm giới hạn mỏi S_e , khiến các vết nứt vi mô hình thành nhanh gấp 4 lần so với điều kiện tiêu chuẩn [12], [3].



Hình 4. Đồ thị S-N mô phỏng sự suy giảm giới hạn mỏi của kim thép dưới tác động của nhiệt độ ma sát [12]

Hình 4: Đồ thị S-N thể hiện mối quan hệ giữa ứng suất và tuổi thọ mỏi của kim dẹt theo nhiệt độ. Đồ thị biểu diễn sự suy giảm tuổi thọ của kim dẹt thông qua hai trục tọa độ: trục tung là biên độ ứng suất (δ) và trục hoành là số chu kỳ làm việc (N) theo thang logarit. Khi nhiệt độ ma sát tăng (từ đường màu xanh xuống đường màu đỏ), toàn bộ giới hạn bền mỏi của vật liệu bị kéo thấp xuống. Hệ quả là ở cùng một mức tải trọng vận hành, nếu nhiệt độ kim tăng cao do ma sát, số chu kỳ chịu tải trước khi gãy sẽ sụt giảm nghiêm trọng (Có thể giảm từ hàng triệu chu kỳ xuống còn vài trăm nghìn chu kỳ).

Do đó, nhiệt độ ma sát không chỉ làm mềm vật liệu mà còn làm giảm nghiêm trọng tuổi thọ của kim, khiến kim gãy sớm hơn nhiều so với tính toán lý thuyết ở điều kiện nguội.

3.4. Thảo luận về tối ưu hóa hệ thống

Từ kết quả nghiên cứu trên, bài báo đề xuất thay đổi tư duy thiết kế:

(1) Chỉnh lý biên dạng: Tăng bán kính góc lượn tại vùng eyelet để giảm K_t từ 3.1 xuống 2.4, giúp phân bố lại ứng suất đều hơn [10];

(2) Quản lý ma sát: Sử dụng lớp phủ DLC có hệ số ma sát $\mu = 0.1$. Điều này làm giảm nguồn nhiệt đầu vào Q_f ngay từ gốc, giữ cho nhiệt độ vận hành luôn dưới ngưỡng 150°C kể cả ở tốc độ cao [7];

(3) Tản nhiệt chủ động: Thiết kế các rãnh dẫn khí dọc thân kim để tăng diện tích tiếp xúc với dòng khí làm mát đối lưu [6].

4. KẾT LUẬN

Qua việc áp dụng mô phỏng phần tử hữu hạn (FEA) và các lý thuyết cơ khí chính xác, bài báo đã chứng minh rằng:

Nhiệt ma sát là tác nhân chính gây ra sự suy giảm cơ tính phi tuyến tính của kim dệt tốc độ cao.

Việc vật liệu bị giảm độ cứng tại nhiệt độ trên 200°C dẫn đến sai lệch hình học nghiêm trọng, đe dọa sự ổn định của toàn bộ hệ thống cơ khí máy dệt.

Việc kết hợp giữa cải tiến vật liệu bề mặt và tối ưu hóa biên dạng chi tiết là giải pháp then chốt để nâng cao năng suất và tăng tuổi thọ thiết bị.❖

Ngày nhận bài: **10/01/2026**

Ngày phản biện: **26/01/2026**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. A. J. Gosh and M. K. Talukdar, “*Modern Textile Machinery and High-Speed Component Dynamics*”. Oxford Technical Press, 2018.
- [2]. B. V. Nguyễn, “*Phân tích phần tử hữu hạn ứng suất nhiệt trong các hệ thống truyền động ma sát*”. Tạp chí Cơ khí và Động lực học, vol. 45, pp. 112-120, 2021.
- [3]. C. L. Peterson, “*Tribology and Material Wear in Industrial Textile Equipment*”. Elsevier Science, 2019.
- [4]. D. M. Kim and S. H. Lee, “*Study on surface hardness changes of Cr-Ni alloy steel under rapid thermal cycles*”. International Journal of Mechanical Sciences, vol. 88, pp. 45-56, 2020.
- [5]. E. R. T. G. Silva, “*ANSYS Simulation for Coupled Thermal-Structural Problems*”. Springer, 2017.
- [6]. H. T. Trần, “*Ảnh hưởng của tốc độ máy may đến sự gia tăng nhiệt độ kim và biến dạng nhiệt cục bộ*”. Kỷ yếu Hội nghị Cơ điện tử Toàn quốc, pp. 234-240, 2022.
- [7]. J. P. Wang, “*Optimization of Ceramic Coatings for Wear-Resistant Textile Components*”. Surface and Coatings Technology, vol. 310, pp. 12-25, 2019.
- [8]. K. R. L. Moorthy, “*Needle Tip Dynamics: Interaction Between Soft Materials and Rigid Steel Structures*”. Journal of Textile Engineering & Fashion Technology, vol. 5, no. 3, 2018.
- [9]. L. C. Zhang, “*Contact Mechanics and Applications in Precision Machine Design*”. Cambridge University Press, 2020.
- [10]. M. S. Khan, “*Finite element analysis (FEA) on the structural stability of yarn guides under high-intensity operating conditions*”. Mechanical Engineering Research, vol. 12, pp. 101-115, 2021.
- [11]. P. N. Rao, “*Manufacturing Technology: Analysis of Heat Treatment Processes and Material Deformation*”. McGraw-Hill Education, 2018.
- [12]. S. Das, “*Fatigue failure of knitting needles: The role of frictional heat and mechanical vibration*”. Textile Research Journal, vol. 90, pp. 567-580, 2022.