

ỨNG DỤNG CƠ KHÍ TRONG THIẾT KẾ VÀ PHÁT TRIỂN VẬT LIỆU DỆT MAY THEO HƯỚNG MÔ PHÒNG SINH HỌC

MECHANICAL ENGINEERING APPLICATIONS IN THE DESIGN AND DEVELOPMENT OF BIOMIMETIC TEXTILE MATERIALS

ThS. Nguyễn Thu Thủy

Khoa Dệt may và Thời trang, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

TÓM TẮT

Mô phỏng sinh học đang trở thành một hướng tiếp cận quan trọng trong kỹ thuật cơ khí ứng dụng cho ngành dệt may, đặc biệt trong thiết kế cấu trúc sợi, vải và bề mặt vật liệu có tính năng vượt trội. Thông qua việc nghiên cứu các cấu trúc và cơ chế hoạt động tối ưu trong tự nhiên, kỹ thuật cơ khí cho phép chuyển hóa các nguyên lý sinh học thành giải pháp thiết kế, mô phỏng, chế tạo và kiểm soát quy trình sản xuất vật liệu dệt. Bài báo tập trung phân tích vai trò của cơ học vật liệu, cơ học kết cấu, công nghệ chế tạo và mô phỏng số trong việc phát triển sợi và vải dệt mô phỏng sinh học, đồng thời làm rõ tiềm năng ứng dụng trong dệt may kỹ thuật và định hướng phát triển bền vững của ngành.

Từ khóa: *Mô phỏng sinh học; Kỹ thuật cơ khí; Vật liệu dệt may; Sợi; Cơ học vật liệu.*

ABSTRACT

Biomimicry has emerged as an important approach in mechanical engineering applications for the textile industry, particularly in the design of fiber structures, fabrics, and material surfaces with enhanced functional performance. By investigating optimized structures and mechanisms found in nature, mechanical engineering principles enable the transformation of biological concepts into engineering solutions through structural design, numerical modeling, manufacturing technologies, and process control. This paper analyzes the role of mechanics of materials, structural mechanics, manufacturing engineering, and numerical simulation in the development of biomimetic fibers and textile structures. Furthermore, the potential applications in technical textiles and the contribution of this approach to the sustainable development of the textile industry are discussed.

Keywords: *Biomimicry; Mechanical engineering; Textile materials; Fibers; Mechanics of materials.*

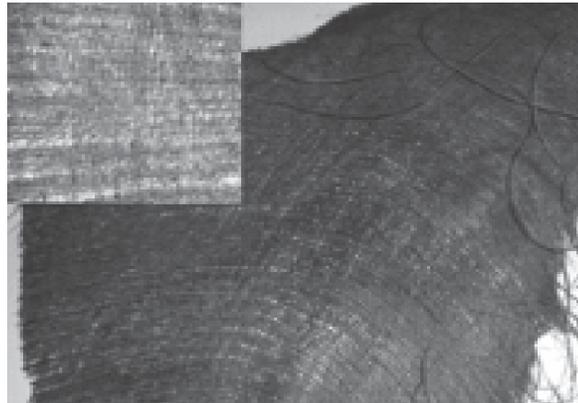
1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong nhiều hệ sinh học, các cấu trúc dạng sợi và bề mặt phân cấp đã được tự nhiên tối ưu hóa nhằm đạt hiệu suất cơ học và chức năng cao với mức tiêu hao vật liệu và năng lượng tối thiểu. Những đặc điểm như độ bền riêng lớn, khả năng biến dạng thích ứng, chống thấm, tự làm sạch hay bám dính hiệu quả đều có thể được lý giải trên cơ sở cơ học kết cấu và cơ học vật liệu [1-3].

Từ góc nhìn kỹ thuật cơ khí, mô phỏng sinh học không chỉ dừng lại ở việc sao chép hình thái mà còn là quá trình phân tích cơ chế chịu lực, truyền tải ứng suất, biến dạng và tương tác bề mặt trong các hệ sinh học, từ đó chuyển hóa thành các mô hình thiết kế và giải pháp công nghệ phù hợp với sản xuất công nghiệp. Đối với ngành dệt may hiện đại, sự kết hợp giữa cơ khí và mô phỏng sinh học mở ra khả năng phát triển các vật liệu dệt kỹ thuật, đa chức năng và có tính bền vững cao [4, 5].

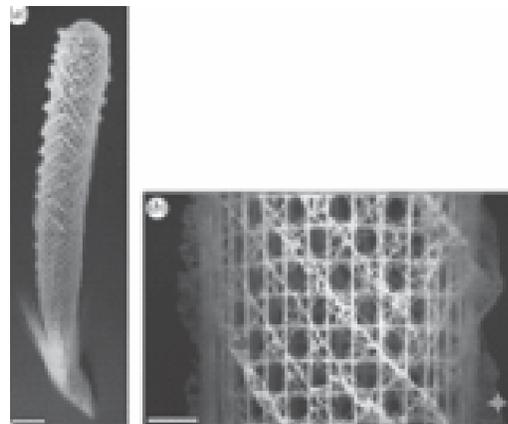
2. CẤU TRÚC SỢI SINH HỌC DƯỚI GÓC NHÌN CƠ HỌC

Thiên nhiên cung cấp nhiều ví dụ điển hình về các cấu trúc sợi có tổ chức tối ưu. Mạng nhện, gỗ, tre hay bộ xương của bọt biển đều có thể được xem là các hệ kết cấu sợi – thanh – lưới, trong đó hình thái và sự định hướng của sợi quyết định trực tiếp đến khả năng chịu tải và độ ổn định cơ học [6].



Hình 1. Mạng sợi dệt và sự phân bố sợi trong vật liệu dệt

Dưới góc độ cơ khí, các vật liệu này là những composite sợi phân cấp, với sự phối hợp giữa pha gia cường và pha nền nhằm đạt được tỷ số bền/trọng lượng cao. Việc phân tích ứng suất – biến dạng, mô đun đàn hồi hiệu dụng và cơ chế phá hủy của các hệ sinh học này đã trở thành cơ sở quan trọng cho thiết kế sợi và vải dệt kỹ thuật trong ngành dệt may [7, 8].



Hình 2. Ảnh hiển vi điện tử quét (SEM) thể hiện cấu trúc vi mô dạng xoắn và mạng lưới 3D của vật liệu

Đặc biệt, tơ nhện là một ví dụ tiêu biểu cho vật liệu sợi có hiệu suất cơ học vượt trội. Sự kết hợp giữa độ bền kéo cao và độ dai lớn của tơ nhện có thể được lý giải thông qua cấu trúc polyme bán tinh thể và mức độ định hướng cao của chuỗi phân tử. Từ quan điểm cơ khí, đây là mô hình lý tưởng để nghiên cứu tối ưu hóa cấu trúc sợi nhân tạo thông qua điều khiển quá trình kéo sợi và xử lý sau kéo [8-10].

Bảng 1. Phạm vi các đặc tính của các loại tơ nhện và các loại sợi khác nhau.

Vật liệu	Cường độ (GPa)	Độ giãn dài (%)	Mô đun (GPa)	Năng lượng cần thiết để phá vỡ (kJ kg ⁻¹)
Tơ kén tằm	0,6	14	6	–
Tơ kéo (tuyến lớn)	0,7-2,3	22-39	9,5-30	130-195
Tơ hình roi	0,1-0,5	≤ 300	≤ 1	100
Hình dạng nang	360	46	0,6	–
Tổng hợp	–	517	–	–
Kevlar	2,9-3,0	2,5-4,0	70-115	33
Nylon	0,3-0,7	15-40	7-34	60

Tơ nhện là một trong những vật liệu sợi sinh học có tính năng vượt trội nhất được biết đến. Mặc dù sợi Kevlar (para-aramid) có độ bền kéo cao hơn tơ kéo, tơ nhện lại thể hiện khả năng kéo giãn lớn hơn đáng kể, độ dai cao và mô đun đàn hồi vượt trội, đồng thời ổn định nhiệt đến khoảng 230°C. Những đặc tính cơ học ưu việt này bắt nguồn từ cấu trúc polyme bán tinh thể và mức độ định hướng cao của các chuỗi protein trong sợi tơ [11, 12].

Một đặc tính đáng chú ý của tơ kéo là hiện tượng “siêu co” khi tiếp xúc với độ ẩm trong điều kiện không bị hạn chế, dẫn đến sự thay đổi hình học mạnh và sinh ra ứng suất lớn khi bị kìm giữ. Hiện tượng này vừa mở ra tiềm năng ứng dụng trong vật liệu phản ứng, vừa đặt ra thách thức đối với việc sử dụng tơ nhện trong môi trường ẩm. Các nghiên cứu gần đây đề xuất khắc phục bằng cách tích hợp sợi vào ma trận chống nước hoặc điều chỉnh cấu trúc phân tử protein để giảm độ nhạy với nước [12, 13].

Ngoài tơ kéo, các loại tơ khác như tơ hình roi (flagelliform) trong mạng nhện hình cầu cũng thu hút nhiều sự quan tâm nhờ khả năng kéo giãn và phục hồi đặc biệt, với độ dai và mô đun cao hơn nhiều vật liệu sinh học và kỹ thuật truyền thống. Những tính chất này

được cho là xuất phát từ trình tự axit amin đặc thù và cấu trúc dạng “lò xo” ở cấp độ phân tử, cho phép sợi vừa có độ bền đáng kể vừa thể hiện hành vi đàn hồi cao [14].

Sự kết hợp độc đáo giữa hiệu suất cơ học cao và quy trình kéo sợi “xanh” trong điều kiện gần môi trường xung quanh đã khiến tơ nhện trở thành nguồn cảm hứng mạnh mẽ cho việc phát triển các sợi protein nhân tạo. Những tiến bộ trong công nghệ sinh học và vật liệu đã cho phép tổng hợp protein tơ nhện tái tổ hợp và kéo sợi bằng nhiều phương pháp khác nhau, với mục tiêu tái tạo hoặc tiệm cận các tính chất của tơ tự nhiên thông qua tối ưu hóa quy trình kéo sợi hơn là chỉ dựa vào trình tự axit amin [15].

Song song với tơ nhện, cấu trúc sợi phân cấp trên bàn chân tắc kè cũng là một ví dụ tiêu biểu về chức năng sinh học dựa trên sợi. Hệ lông tơ – thìa nano với mật độ cao tạo ra khả năng bám dính khô nhờ lực van der Waals, cho phép tắc kè di chuyển linh hoạt trên các bề mặt nhẵn. Nguyên lý này đã thúc đẩy nhiều nghiên cứu phát triển vật liệu bám dính nhân tạo dựa trên cấu trúc sợi nano, đặc biệt cho các ứng dụng dệt kỹ thuật và vật liệu bề mặt thông minh [14, 15].

3. VAI TRÒ CỦA CÔNG NGHỆ CƠ KHÍ TRONG CHẾ TẠO VẬT LIỆU DỆT MÔ PHÒNG SINH HỌC

Kỹ thuật cơ khí đóng vai trò then chốt trong việc hiện thực hóa các ý tưởng mô phỏng sinh học vào sản xuất vật liệu dệt. Các công nghệ như kéo sợi chính xác, dệt 3D, dệt đa trục, tạo cấu trúc vi – nano bằng phương pháp cơ – nhiệt – hóa, cũng như mô phỏng số bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) cho phép kiểm soát chặt chẽ hình thái và tính chất cơ học của sợi và vải [16, 17].

Thông qua mô phỏng cơ học, các nhà nghiên cứu có thể dự đoán hành vi chịu lực, độ bền mỏi và khả năng biến dạng của vật liệu dệt trước khi chế tạo thực tế. Điều này giúp rút ngắn thời gian phát triển sản phẩm, giảm chi phí thử nghiệm và nâng cao độ tin cậy của vật liệu. Trong dệt may kỹ thuật, các cấu trúc vải mô phỏng sinh học được thiết kế như các kết cấu cơ khí mềm, có khả năng chịu tải, giảm chấn hoặc thích ứng với môi trường làm việc [18].

4. THIẾT KẾ BỀ MẶT VẬT LIỆU DỆT TỪ GÓC NHÌN CƠ KHÍ BỀ MẶT

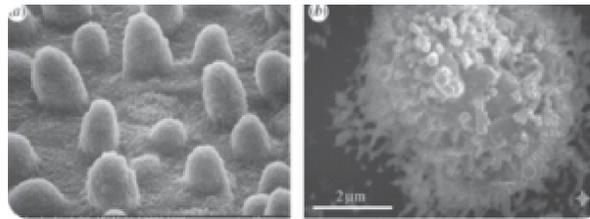
Các bề mặt sinh học như lá sen hay lông chim nước thể hiện rõ mối quan hệ giữa hình học bề mặt và chức năng sử dụng. Dưới góc độ cơ khí bề mặt, khả năng kỵ nước và tự làm sạch là kết quả của sự kết hợp giữa cấu trúc nhám đa thang và năng lượng bề mặt thấp.

Trong ngành dệt may, các nguyên lý này được chuyển hóa thành giải pháp tạo nhám vi – nano trên sợi và vải bằng các công nghệ cơ khí và vật lý, kết hợp với xử lý bề mặt phù hợp. Việc thiết kế bề mặt vải như một hệ tiếp xúc cơ học phức tạp cho phép điều chỉnh hiện tượng thấm ướt, ma sát và mài mòn, mở rộng

ứng dụng của vật liệu dệt trong môi trường khắc nghiệt.

5. MÔ PHỎNG SINH HỌC, CƠ KHÍ VÀ ĐỊNH HƯỚNG PHÁT TRIỂN BỀN VỮNG

Từ quan điểm kỹ thuật cơ khí, mô phỏng sinh học cung cấp một chiến lược thiết kế hướng tới tối ưu hóa kết cấu thay vì chỉ thay đổi thành phần vật liệu. Các hệ sinh học thường đạt hiệu suất cao nhờ cấu trúc hợp lý, sử dụng ít loại vật liệu nhưng được tổ chức phân cấp hiệu quả [18, 19].



Hình 3. Ảnh SEM thể hiện cấu trúc vi mô dạng nhú và dạng xóp của bề mặt vật liệu

Áp dụng tư duy này vào dệt may giúp giảm khối lượng vật liệu, tiết kiệm năng lượng trong sản xuất và nâng cao khả năng tái chế. Các vật liệu dệt mô phỏng sinh học, được thiết kế dựa trên phân tích cơ học và mô phỏng số, có tiềm năng lớn trong việc đáp ứng yêu cầu ngày càng cao về hiệu suất kỹ thuật và tính bền vững của ngành công nghiệp dệt may [20].

6. KẾT LUẬN

Bài báo đã làm rõ vai trò trung tâm của kỹ thuật cơ khí trong việc chuyển hóa các nguyên lý mô phỏng sinh học thành giải pháp thiết kế và chế tạo vật liệu dệt may hiện đại. Thông qua phân tích cơ học cấu trúc sợi, ứng dụng công nghệ chế tạo và mô phỏng số, các hệ sinh học trở thành nguồn cảm hứng quan trọng cho phát triển vật liệu dệt kỹ thuật, đa chức năng và bền vững.



Việc tiếp cận mô phỏng sinh học dưới góc nhìn cơ khí không chỉ mở rộng phạm vi ứng dụng của dệt may mà còn góp phần khẳng định vai trò của ngành cơ khí trong chuỗi giá trị nghiên cứu, thiết kế và sản xuất vật liệu tiên tiến, phù hợp với định hướng của các tạp chí chuyên ngành cơ khí tại Việt Nam. ❖

Ngày nhận bài: **22/12/2025**

Ngày phản biện: **06/01/2026**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Li, W., Yang, L., Huang, J., Zheng, C., Chen, Y., Li, Y., Yang, D., Li, S., Chen, Z., Cai, W., & Lai, Y. (2024), “Progress on fiber engineering for fabric innovation in ecological hydrophobic design and multifunctional applications”. *Industrial Chemistry & Materials*, 2, 393-423.
- [2]. Ge, H., Liu, Y., & Liu, F. (2023), “Up to Date Review of Nature-Inspired Superhydrophobic Textiles: Fabrication and Applications”. *Materials*, 16(21), 7015.
- [3]. Liu, H., Zhang, Z., Wu, C., Su, K., & Kan, X. (2023), “Biomimetic Superhydrophobic Materials through 3D Printing: Progress and Challenges”. *Micromachines*, 14(6), 1216.
- [4]. Liu, Y., & Zhang, J. (2020), “Superhydrophobic textiles: fabrication, durability, and applications”. *Advanced Functional Materials*.
- [5]. Li, Z., Wang, X., Bai, H., & Cao, M. (2023), “Advances in Bioinspired Superhydrophobic Surfaces Made from Silicones: Fabrication and Application”. *Polymers*, 15(3), 543.
- [6]. Wegst, U.G.K., Bai, H., Saiz, E., Tomsia, A.P., Ritchie, R.O., “Bioinspired structural materials”. *Nature Materials*, 2015.
- [7]. Gibson, L.J., “The hierarchical structure and mechanics of plant materials”. *Journal of the Royal Society Interface*, 2012.
- [8]. Meyers, M.A., Chen, P.-Y., Lin, A.Y.-M., Seki, Y., “*Biological materials: Structure and mechanical properties*”. *Progress in Materials Science*, 2013.
- [9]. Erb, R.M., Sander, J.S., Grisch, R., Studart, A.R., “*Self-shaping composites with programmable bioinspired microstructures*”. *Nature Communications*, 2013.
- [10]. Li, S., McGhie, A.J., Tang, S., “*Spider silk-inspired fibers and textiles*”. *Advanced Fiber Materials*, 2022.
- [11]. Meyers, M.A., Chen, P.-Y., Lin, A.Y.-M., Seki, Y., “*Biological materials: Structure and mechanical properties*”. *Progress in Materials Science*, 2013.
- [12]. Vollrath, F., Porter, D., “*Spider silk as a model biomaterial*”. *Applied Physics A*, 2016.
- [13]. Rising, A., Johansson, J., “*Toward spinning artificial spider silk*”. *Nature Chemical Biology*, 2015.
- [14]. Wegst, U.G.K. et al., “*Bioinspired structural materials*”. *Nature Materials*, 2015.
- [15]. Li, S., Tang, S., McGhie, A.J., “*Spider silk-inspired fibers and functional textiles*”. *Advanced Fiber Materials*, 2022.
- [16]. Liu, K., Jiang, L., “*Bio-inspired design of multiscale structures for wetting control*”. *Nano Today*, 2016.
- [17]. Yong, J. et al., “*Bioinspired superhydrophobic surfaces: principles and applications*”. *Chemical Society Reviews*, 2017.
- [18]. Liu, Y., Zhang, J., “*Superhydrophobic textiles: fabrication, durability, and applications*”. *Advanced Functional Materials*, 2020.
- [19]. Darmanin, T., Guittard, F., “*Recent advances in the potential applications of bioinspired superhydrophobic materials*”. *Progress in Polymer Science*, 2019.
- [20]. Li, Y., Wang, X., “*Bioinspired water-repellent and self-cleaning textiles*”. *Advanced Fiber Materials*, 2024.