

Một số tiến bộ trong chế tạo vật liệu đa lớp ngụy trang ảnh nhiệt

Nguyễn Ngọc Sơn¹, Nguyễn Mạnh Thắng¹, Vũ Đức Hiếu², Nguyễn Anh Tuấn^{1*}

¹Viện Khoa học và Công nghệ quân sự, 17 Hoàng Sâm, Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam;

²Học viện Kỹ thuật Quân sự, 236 Hoàng Quốc Việt, Bắc Từ Liêm, Hà Nội, Việt Nam.

*Email: tuanvn.vn@gmail.com

Nhận bài: 27/2/2024; Hoàn thiện: 11/4/2024; Chấp nhận đăng: 12/8/2024; Xuất bản: 25/8/2024.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.97.2024.3-15>

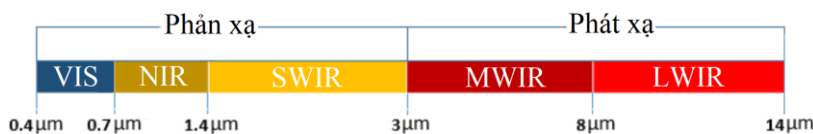
TÓM TẮT

Công nghệ trình sát ảnh nhiệt đã và đang được khai thác rộng rãi và hiệu quả trong lĩnh vực quân sự phục vụ trình sát, tìm kiếm và bắt bảm các đối tượng, ... Đây là vấn đề nghiên cứu thú vị nhưng phức tạp do dấu hiệu nhiệt của bất kỳ mục tiêu nào cũng rất khó để che giấu và rất dễ bị phát hiện bởi các thiết bị trình sát ảnh nhiệt. Các tấm phủ ngụy trang ảnh nhiệt được nghiên cứu phát triển nhằm mục đích hạn chế sự phát hiện của thiết bị ảnh nhiệt bằng cách hạn chế tối đa dấu hiệu nhiệt của mục tiêu. Tấm phủ đa lớp (MTS, Multi-layered Textile Structures) được đề xuất dựa trên việc chồng xếp các lớp vật liệu khác nhau, kết hợp và tối ưu các đặc tính của các vật liệu riêng lẻ nhằm tạo ra một tấm vật liệu đa lớp có hiệu quả ngụy trang ảnh nhiệt. Bài báo phân tích, tổng hợp các công trình nghiên cứu về những tiến bộ trong chế tạo vật liệu đa lớp ứng dụng trong ngụy trang ảnh nhiệt, làm cơ sở định hướng nghiên cứu, phương pháp thiết kế, tối ưu và chế tạo thử nghiệm tấm phủ ngụy trang ảnh nhiệt đa lớp tại Việt Nam.

Từ khoá: Ngụy trang ảnh nhiệt; Hệ vật liệu đa lớp; Hệ số phát xạ; Mục tiêu; Phòng nèn; Siêu vật liệu.

1. MỞ ĐẦU

Ngụy trang là một lĩnh vực xuất hiện từ cổ xưa, xuất phát từ đấu tranh sinh tồn giữa các loài trong tự nhiên trong đó có cả con người. Trong tự nhiên, mục đích chính của ngụy trang là nhằm hòa trộn mục tiêu với môi trường xung quanh để tránh sự phát hiện của đối phương, phục vụ các mục đích tấn công hay tự vệ. Trong sự phát triển của văn minh nhân loại, ngụy trang ngày càng trở thành một lĩnh vực quan trọng, đặc biệt, thường xuyên được sử dụng trong các cuộc chiến tranh, xung đột từ cổ đại đến ngày nay. Sự phát triển của khoa học công nghệ quân sự nói chung và lĩnh vực quang điện tử nói riêng kéo theo sự phát triển của lĩnh vực phòng chống quang học, quang điện tử mà trong đó có lĩnh vực ngụy trang quang học.



Hình 1. Những dải bức xạ điện từ chủ yếu liên quan đến ngụy trang.

Giai đoạn đầu tiên, khi các thông tin quang học được xử lý chỉ bằng mắt người trong vùng ánh sáng nhìn thấy (VIS), ngụy trang được thực hiện bằng các cách thức che phủ, tô vẽ phù hợp với môi trường xung quanh về màu sắc, độ bóng và kết cấu nhằm đánh lừa thị giác của đối phương. Với sự phát triển của công nghệ cảm biến, bên cạnh thông tin quang học vùng ánh sáng nhìn thấy, một loạt thông tin quang học các vùng ánh sáng khác được con người thu nhận để khai thác sử dụng như vùng hồng ngoại gần (NIR), hồng ngoại bước sóng ngắn (SWIR), bước sóng trung (MWIR), bước sóng dài (LWIR). Mỗi vùng bước sóng quang học đó đều có những đặc trưng công nghệ riêng đòi hỏi phương thức ngụy trang phù hợp, hình 1. Đối với vùng MWIR và LWIR, thông tin quang học thu được là bức xạ nhiệt từ đối tượng phát ra, do đó, các thiết bị thu hình ảnh hoạt động ở vùng bước sóng này được gọi là ảnh nhiệt và ngụy trang chống lại các thiết bị ảnh nhiệt gọi chung là ngụy trang ảnh nhiệt [1-3].

Một cách khái quát chung, thiết bị ảnh nhiệt hoạt động dựa trên nguyên lý thu về bức xạ nhiệt mục tiêu phát ra, biến đổi thành tín hiệu điện và hiển thị một trường nhiệt độ giả trên màn hình, cho phép chúng ta có thể quan sát hình ảnh nhiệt của đối tượng cả ngày lẫn đêm [3-5]. Như vậy, nguy trạng ảnh nhiệt là giải quyết bài toán triệt tiêu hoặc giảm thiểu dấu hiệu nhiệt của đối tượng, có nghĩa là làm giảm thiểu sự tương phản nhiệt (chênh lệch nhiệt độ) giữa mục tiêu và phông nền, hay nói cách khác là điều chỉnh bức xạ nhiệt của mục tiêu giống hoặc tương tự với phông nền. Trên cơ sở nguyên lý hoạt động của thiết bị ảnh nhiệt và định luật Stefan-Boltzmann, dấu hiệu nhiệt của đối tượng $Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$ là một hàm số của nhiệt độ bề mặt T và hệ số phát xạ ε của mục tiêu [7, 8]. Từ đó, có hai chiến lược cơ bản để có thể nguy trạng ảnh nhiệt là: thay đổi nhiệt độ cục bộ T của đối tượng hoặc thay đổi hệ số phát xạ cục bộ ε của mục tiêu [7-10]. Theo hai chiến lược này, nguyên lý nguy trạng ảnh nhiệt tương ứng lần lượt được gọi là kỹ thuật nguy trạng dẫn nhiệt và kỹ thuật nguy trạng phát xạ nhiệt [11-18]. Từ đó, các giải pháp nguy trạng ảnh nhiệt được xây dựng trên cơ sở xoay quanh các giải pháp công nghệ tạo ra vật liệu có hệ số phát xạ thấp và khả năng cách nhiệt, che chắn, hấp thụ bức xạ nhiệt (nhằm giảm cường độ bức xạ từ mục tiêu) để đạt được hiệu quả nguy trạng ảnh nhiệt, cụ thể là:

Giải pháp về công nghệ chế tạo vật liệu để tạo ra các vật liệu nguy trạng có hệ số phát xạ phù hợp với hệ số phát xạ của phông nền [10, 19]. Lớp phủ có độ phát xạ thấp toàn dải hồng ngoại (từ MWIR đến LWIR) đã được sử dụng phổ biến cho nguy trạng ảnh nhiệt trong nhiều năm [20]. Tuy nhiên, cách tiếp cận này lại gặp phải vấn đề là độ phát xạ thấp trong dải từ 5 μm đến 8 μm cản trở đáng kể hiệu quả làm mát bức xạ của đối tượng, điều này có thể làm tăng nhiệt độ và hạn chế lớn hiệu quả nguy trạng ảnh nhiệt. Do đó, lớp phủ nguy trạng ảnh nhiệt hiệu suất cao đòi hỏi độ chọn lọc quang phổ thuận lợi, tức là độ phát xạ cao trong các dải cửa sổ phi khí quyển để làm mát bằng bức xạ [21] và độ phát xạ thấp trong các dải cửa sổ khí quyển để nguy trạng ảnh nhiệt [22].

Giải pháp hệ vật liệu đa lớp sử dụng nhiều lớp vật liệu có đặc tính khác nhau, xếp chồng lên nhau nhằm kết hợp các đặc tính của các lớp vật liệu riêng lẻ tạo thành đặc tính của tấm vật liệu đa lớp [10]. Gần đây, màng mỏng nhiều lớp sử dụng các vật liệu tiên tiến, siêu vật liệu,... đã xuất hiện có khả năng điều chỉnh hiệu quả các đặc tính bức xạ của vật liệu [23-29]. Giải pháp này mang lại vật liệu nguy trạng vừa có hệ số phát xạ thấp, vừa có các cơ chế truyền dẫn nhiệt tạo hiệu quả ngăn chặn bức xạ nhiệt của mục tiêu, mang lại hiệu quả nguy trạng ảnh nhiệt [29-30].

Đối với giải pháp hệ vật liệu đa lớp, trên thế giới đã có khá nhiều nghiên cứu được công bố, tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu được xây dựng trên mô hình màng mỏng đa lớp với quy mô nhỏ, quy mô phòng thí nghiệm và được mô hình hóa dưới dạng các mô hình toán học cụ thể cho từng ứng dụng riêng biệt. Các nghiên cứu này hiện vẫn chưa thể áp dụng thực tế. Một số ít các nghiên cứu đã được xây dựng trên bài toán nguy trạng ảnh nhiệt cho một số đối tượng mặt đất, nhưng thiếu các khảo sát đánh giá về phân bố nhiệt trên bề mặt, khảo sát năng lượng phát xạ của bề mặt mà chỉ đánh giá hiệu quả che chắn nhiệt thông qua nhiệt độ bề mặt. Trong nước, bước đầu đã nghiên cứu cụ thể về tấm phủ nguy trạng đa lớp ở mức đơn giản là áp dụng mô hình cấu trúc đa lớp và các tấm vật liệu sẵn có [30]. Hơn nữa, việc lựa chọn phương án thiết kế tấm phủ đa lớp chỉ dựa trên kết quả thử nghiệm thực địa mà chưa được tính toán, tối ưu một cách khoa học, phương pháp đánh giá chưa đầy đủ [31]. Do đó, việc nghiên cứu có hệ thống về tấm phủ nguy trạng ảnh nhiệt đa lớp dựa trên luận chứng khoa học chặt chẽ kết hợp với thử nghiệm thực tế là cần thiết.

Bài báo nghiên cứu tổng quan các công trình nghiên cứu trong và ngoài nước về những tiến bộ trong chế tạo tấm phủ nguy trạng ảnh nhiệt đa lớp, phần 2 tập trung làm rõ các nguyên lý và giải pháp vật liệu nguy trạng ảnh nhiệt cơ bản. Nội dung phân tích, đánh giá về các nghiên cứu đã công bố tập trung vào vật liệu đa lớp sẽ được làm rõ trong phần 3, và phần 4 sẽ kết luận về các vấn đề còn tồn tại, cần nghiên cứu giải quyết để xây dựng cơ sở khoa học và làm chủ nghiên cứu tấm vật liệu nguy trạng ảnh nhiệt đa lớp ứng dụng trong nước.

2. NGUYÊN LÝ VÀ CÁC GIẢI PHÁP VẬT LIỆU NGUY TRẠNG ẢNH NHIỆT CƠ BẢN

Trong phần này, nhóm tác giả nghiên cứu, tổng hợp các nguyên lý và các giải pháp vật liệu nguy trạng ảnh nhiệt cơ bản đã được các học giả, các chuyên gia nghiên cứu, công bố và ứng dụng. Từ đó, tập trung nghiên cứu, phân tích hệ vật liệu đa lớp ứng dụng trong nguy trạng ảnh nhiệt, các khái niệm cơ bản trong cơ chế truyền nhiệt và xác định hiệu quả che chắn nhiệt của tấm vật liệu, làm cơ sở phân tích, thảo luận ở phần 3.

2.1. Các nguyên lý nguy trạng ảnh nhiệt

Nhìn chung, có thể tổng hợp một cách khái quát có ba nguyên lý nguy trạng ảnh nhiệt chính theo ba cách tiếp cận đó là thiết kế điều chỉnh nhiệt độ, lớp phủ ngoài có hệ số phát xạ thấp và chủ động thích nghi. Bên cạnh đó, một số phương pháp thiết kế cũng kết hợp các nguyên lý nêu trên để nâng cao hiệu quả nguy trạng ảnh nhiệt [32].

2.1.1. Điều chỉnh nhiệt độ

Nguyên lý nguy trạng này dựa trên phương pháp điều chỉnh nhiệt độ bằng cách giữ nhiệt độ của bề mặt ngoài ở mức tương tự với môi trường xung quanh, đồng thời có hệ số phát xạ bề mặt tương tự như hệ số phát xạ của môi trường xung quanh. Việc kiểm soát dòng nhiệt là vấn đề rất quan trọng trong các thiết kế theo nguyên lý này để ngăn chặn sự xuất hiện các điểm nóng hơn hoặc có nhiệt độ bất thường. Việc điều chỉnh nhiệt độ có khả năng đạt được thông qua cơ chế làm mát nhân tạo hoặc làm nóng nhân tạo cho lớp vật liệu ngoài cùng, tuy nhiên, điều này không thực sự hiệu quả và khả thi. Trên thực tế, các thiết kế nguy trạng theo nguyên lý này tập trung vào việc cải thiện khả năng cách nhiệt của vật liệu và tận dụng tối đa cơ chế làm mát tự nhiên, và hạn chế các phương thức truyền nhiệt điển hình. Quá trình truyền nhiệt qua tấm vật liệu nguy trạng thông qua ba hình thức là dẫn nhiệt, đối lưu nhiệt và phát xạ nhiệt [10, 32-34].

2.1.1.1. Dẫn nhiệt

Dẫn nhiệt là một cơ chế truyền nhiệt diễn ra trong một hệ nhiệt động hoặc giữa các hệ có tiếp xúc nhiệt. Đây là phương thức truyền nhiệt, trong đó, năng lượng được truyền từ phần (vị trí) có nhiệt độ cao hơn của đối tượng đến phần (vị trí) có nhiệt độ thấp hơn bằng chuyển động động học của các phân tử. Trong các tấm vật liệu nguy trạng, quá trình dẫn nhiệt diễn ra thông qua các lớp vật liệu có cấu trúc sợi với các sợi kim loại hay các sợi có không khí bên trong cụm sợi.

Phương trình truyền dẫn nhiệt được Fourier xây dựng dựa trên các kết quả thực nghiệm và kết quả đã chứng minh rằng, dòng nhiệt theo bất kỳ hướng nào đều tỷ lệ thuận với gradient nhiệt độ theo hướng đó. Hệ số tỉ lệ đó được gọi là độ dẫn nhiệt ký hiệu là k . Đối với các vật liệu đồng nhất và đẳng hướng, độ dẫn nhiệt trở thành một đại lượng vô hướng với giá trị không đổi và định luật Fourier xác định truyền dẫn nhiệt Q_{cond} có thể được viết là [33, 34]:

$$Q_{cond} = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} = k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{L} \quad (1)$$

Trong đó, $A, dT/dx, \Delta T, L$ lần lượt là diện tích bề mặt vật liệu vuông góc với hướng truyền nhiệt, gradient nhiệt độ, nhiệt độ chênh lệch khi truyền qua lớp vật liệu và chiều dày lớp vật liệu.

2.1.1.2. Đối lưu nhiệt

Đối lưu là cơ chế truyền nhiệt gắn liền với sự vận chuyển khối chất lưu (thường là chất khí, chất lỏng). Tùy thuộc vào yếu tố tạo ra chuyển động mà loại đối lưu có thể được chia thành: đối lưu tự do, hình thành khi dòng chảy là kết quả của gradient nhiệt độ và đối lưu cưỡng bức được tạo ra bởi chênh lệch áp suất. Khi các đường dòng chảy song song với nhau thì đó là dòng chảy tầng, nếu không thì đó là dòng chảy rối. Dòng truyền nhiệt đối lưu trong các lớp vải có thể không đáng kể ngay cả trường hợp vải có tỉ lệ thể tích sợi thấp [10]. Vì vậy, sự truyền nhiệt đối lưu Q_{conv} chủ yếu xảy ra ở bề mặt vải và nó có thể được biểu thị bằng định luật đối lưu nhiệt được Newton

công bố như phương trình sau [10, 33, 34]:

$$Q_{conv} = h_{conv} \cdot A \cdot (T_s - T_{\infty}) \quad (2)$$

Trong đó, h_{conv} , A , T_s và T_{∞} lần lượt là hệ số truyền nhiệt đối lưu, diện tích bề mặt của vật liệu mà quá trình truyền nhiệt đối lưu xảy ra, nhiệt độ bề mặt vật và nhiệt độ không khí xung quanh. Bên cạnh đó, hệ số truyền nhiệt đối lưu bao gồm tất cả các yếu tố mà sự truyền nhiệt phụ thuộc vào: tính chất của chất lưu, hình dạng bề mặt và loại dòng chảy.

2.1.1.3. Bức xạ nhiệt

Cơ chế truyền nhiệt bức xạ dựa trên sóng điện từ. Một hệ nhiệt động có nhiệt độ trên độ không tuyệt đối sẽ phát ra bức xạ nhiệt. Mỗi quan hệ giữa năng lượng bức xạ cực đại được phát xạ ra từ một bề mặt có diện tích A ở nhiệt độ T_s được thể hiện bằng định luật Stefan-Boltzmann, $Q_{emit,max} = \sigma \cdot A \cdot T_s^4$. Khi bề mặt đó có hệ số phát xạ là ε được bao bọc bởi một bề mặt đủ lớn có nhiệt độ T_{surr} , hai bề mặt được ngăn cách nhau bởi không khí thì bức xạ nhiệt được trao đổi giữa hai bề mặt được tính theo công thức [33, 34].

$$Q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_{surr}^4) \quad (3)$$

Trong đó, Q_{rad} , T , σ và ε lần lượt là năng lượng bức xạ trong một đơn vị thời gian trên một đơn vị diện tích, nhiệt độ, hằng số Stefan-Boltzmann và hệ số phát xạ của bề mặt vật liệu.

2.1.2. Lớp phủ có hệ số phát xạ thấp

Nguyên lý này tập trung giải quyết nguy trạng ảnh nhiệt với các nguồn nhiệt tỏa nhiệt lớn và có nhiệt độ cao bằng cách tạo ra lớp phủ ngoài cùng có hệ số phát xạ thấp [32]. Cách tiếp cận này khá đơn giản để có thể giải thích bất kỳ sự chênh lệch nhiệt độ nào giữa vật thể và môi trường bằng cách thay đổi hệ số phát xạ bề mặt đến mức có thể giải thích được sự khác biệt về năng lượng bức xạ. Tuy nhiên, cách tiếp cận này cũng chứa đựng một số vấn đề bất cập, đó là các bề mặt có độ phát xạ thấp thường phản xạ trong vùng nhìn thấy VIS và vùng hồng ngoại gần NIR, điều này ảnh hưởng đến khả năng nguy trạng ở các vùng phổ phi ảnh nhiệt, cũng như khả năng phản xạ các bức xạ mặt trời vào ban ngày và các bức xạ vũ trụ vào ban đêm.

2.1.3. Nguy trạng chủ động thích nghi

Các sản phẩm nguy trạng được ứng dụng hiện nay phần lớn là nguy trạng thụ động bởi chúng được nghiên cứu, thiết kế để nguy trạng cho một vài đối tượng trên một vài phong nền nhất định. Sự thay đổi của điều kiện không gian và thời gian làm giảm hoặc mất đi hiệu quả nguy trạng của các phương pháp nguy trạng thụ động. Do đó, ý tưởng về nguy trạng chủ động có khả năng thích nghi với các điều kiện không gian và thời gian cho phép duy trì hiệu quả nguy trạng một cách liên tục, toàn diện đã có từ rất sớm, bắt đầu từ những bộ phim viễn tưởng cho đến các công trình nghiên cứu được đầu tư một cách nghiêm túc và các sáng chế, sản phẩm mẫu được công bố [35, 36]. Nguy trạng chủ động thích nghi cho phép khả năng tàng hình bằng cách điều chỉnh chính xác độ phát xạ bề mặt phù hợp với môi trường hoặc bắt chước các thuộc tính của một đối tượng hoàn toàn khác theo thời gian thực. Trên thực tế, để thực hiện được khả năng chủ động thích nghi này là một bài toán rất khó khăn và phức tạp, đòi hỏi khả năng theo dõi và thu nhận chính xác các tham số của môi trường, khả năng điều khiển làm mát hoặc nóng, thay đổi hệ số phát xạ hoặc thay đổi màu sắc một cách đồng bộ và liên tục. Điều này đặt ra yêu cầu về chi phí lớn và hệ thống phần mềm, phần cứng, nguồn nuôi, ... phức tạp, khó triển khai ứng dụng trên thực tế ở giai đoạn hiện nay. Nguyên lý nguy trạng thích nghi vẫn đang là một hướng nghiên cứu phát triển với nhiều tiềm năng.

2.2. Các giải pháp vật liệu nguy trạng ảnh nhiệt

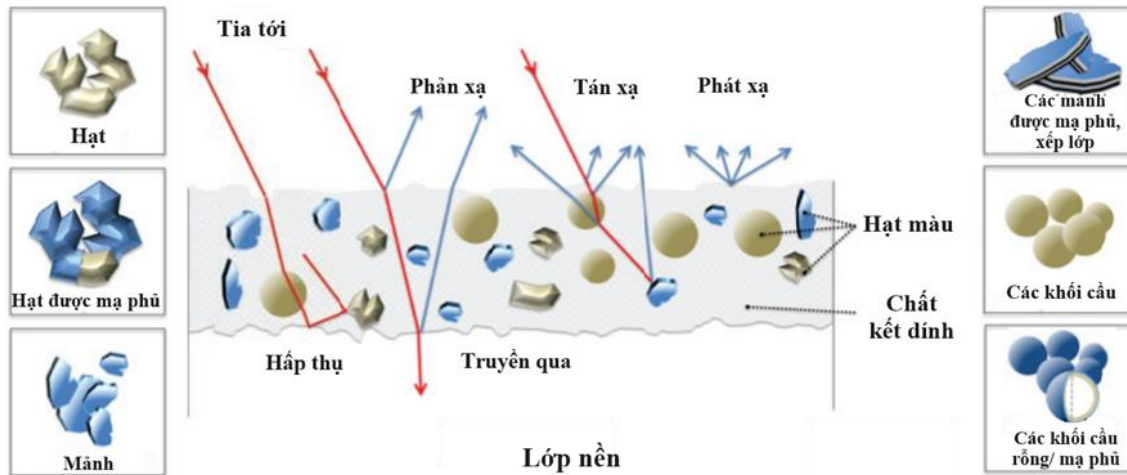
Vật liệu nguy trạng ảnh nhiệt không ngừng được nghiên cứu phát triển theo các nguyên lý nguy trạng ảnh nhiệt với sự đa dạng về chủng loại và được ứng dụng cho nhiều đối tượng. Có thể phân

Tổng quan

chia thành 3 nhóm giải pháp vật liệu ngụy trang ảnh nhiệt theo mức độ từ đơn giản đến phức tạp: sơn và các hạt màu; hệ vật liệu đa lớp và siêu vật liệu Meta (metamaterials) [37].

2.2.1. Sơn và các hạt màu

Sơn ngụy trang ảnh nhiệt thường bao gồm các hạt màu và chất kết dính trộn lẫn với nhau và sẽ được sơn phủ lên trên một bề mặt cần được ngụy trang. Các hạt màu có hình dáng và cấu tạo khác nhau, vật liệu làm nên hạt màu, kích thước hạt, hình dáng hạt và chất kết dính là các tham số rất quan trọng quyết định đến khả năng ngụy trang ảnh nhiệt của lớp sơn [37, 38], hình 2.



Hình 2. Thành phần cấu tạo của sơn ngụy trang ảnh nhiệt và các hiệu ứng quang học.

Ngoài sự hấp thụ bên trong lớp sơn và phản xạ ở các ranh giới bề mặt, kích thước và hình dạng của các hạt màu ảnh hưởng đến hiệu ứng quang học của vật liệu thông qua tán xạ ngược, một hiện tượng thường được sử dụng trong thiết kế quang phổ của lớp phủ chọn lọc quang phổ VIS-NIR. Sự phát xạ từ bề mặt do tán xạ ngược sẽ tăng lên nếu tỷ số giữa chiết suất của các hạt màu và của chất kết dính tăng lên. Do đó, để có thể điều chỉnh các đặc tính của sơn bằng hỗn hợp hạt màu phù hợp, chất kết dính cũng phải có độ hấp thụ thấp nhất có thể trên toàn bộ vùng phổ quan tâm. Bên cạnh đó, chất kết dính cũng phải cung cấp độ bám dính cho chất nền, bảo vệ các sắc tố và bảo toàn các đặc tính hồng ngoại của chúng [38]. Một số sơn ngụy trang ảnh nhiệt tiêu biểu như bảng 1.

Bảng 1. Một số sơn ngụy trang ảnh nhiệt tiêu biểu.

Sơn ngụy trang ảnh nhiệt/ năm công bố	Hệ số phản xạ	Độ bóng	Hệ số phát xạ
Hallberg et al [39] / 2005	Tương đương màu Green	-	0,4 (MWIR) 0,5 (LWIR)
Karlsson et al [40] / 2007	50-70% (NIR)	-	0,2 – 0,3
Shen et al [41] / 2012	≤ 15% (VIS)	-	0,51 – 0,55
Sơn Intermat anti-thermal cho bề mặt kim loại [42] / -	-	≤ 5	0,4 – 0,6
Sơn Intermat anti-thermal cho bề mặt phi kim [42] / -	-	≤ 5	0,45 – 0,65

2.2.2. Vật liệu đa lớp

Vật liệu được sử dụng trong tấm vật liệu MTS tương đối đa dạng, mỗi loại vật liệu sẽ đóng vai

trò cụ thể trong hệ vật liệu đa lớp để phát huy hiệu quả nguy trang ảnh nhiệt cho tấm phủ. Vật liệu cách nhiệt truyền thống dưới dạng vải sợi thủy tinh, vải sợi len, tấm xốp cách nhiệt EVA, vải lưới 3D,... được sử dụng như một thành phần không thể thiếu trong tấm phủ đa lớp MTS. Vải thủy tinh có tráng phủ nhôm trên một mặt hay cả hai mặt của vải được sử dụng để làm giảm hệ số phát xạ, ngăn chặn bức xạ nhiệt và dẫn nhiệt. Vải nylon tráng thủy tinh có đặc tính phản xạ khác nhau phù hợp với nguy trang ngày và nguy trang vùng hồng ngoại gần. Một số loại vải thủy tinh tráng nhiều lớp được sử dụng như: tráng nhôm một mặt hoặc hai mặt, tráng một mặt nhôm và mặt còn lại được tráng màu xanh ô liu, nâu xám hay màu vàng cát,... tùy theo màu sắc chủ đạo của phong nền cần sử dụng. Bên cạnh đó, vải len có đặc tính cách nhiệt tốt, chống cháy và ổn định cũng được sử dụng trong vật liệu đa lớp để giải quyết yêu cầu về cách nhiệt cho tấm phủ [10, 30]. Ngoài ra, một số vật liệu tiên tiến như siêu vật liệu, vật liệu chọn lọc quang phổ, vật liệu hấp thụ cao,... cũng được xem xét và nghiên cứu [20-29]. Trong khi việc nghiên cứu các đặc tính riêng lẻ của các vật liệu đang được triển khai thì song song với đó, việc nghiên cứu các hệ vật liệu đa lớp nhằm giải quyết các vấn đề phức tạp mà một vật liệu đơn lẻ khó có thể giải quyết cũng diễn ra rất sôi động [10, 20-30]. Các nghiên cứu về vật liệu đa lớp ứng dụng trong nguy trang ảnh nhiệt trong những năm gần đây được tổng hợp ở bảng 2 sau đây:

Bảng 2. Các nghiên cứu về vật liệu đa lớp ứng dụng trong nguy trang ảnh nhiệt.

Tác giả/ Năm công bố	Cấu trúc đa lớp	Số lớp vật liệu	Nguy trang nhiệt vùng MWIR	Làm mát bức xạ vùng 5-8 μ m	Nguy trang nhiệt vùng LWIR
Qi et al [24] / 2016	Có	8	Có	Không	Không
Deng et al [25] / 2022	Có	6	Có	Không	Có
Zhao et al [26] / 2019	Có	20/23	Không	Có	Có
Wang et al [27] / 2021	Có	12	Có	Có	Có
Yang et al [28] / 2021	Có	4	Có	Có	Có
Zhang et al [29] / 2023	Có	3	Có	Có	Có
Dev et al [10] / 2020	Có	4/6	-	-	Có
V. Khánh [30] / 2022	Có	4	Có	-	Có

2.2.3. Siêu vật liệu Meta (metamaterials)

Siêu vật liệu thường được mô tả là các cấu trúc nhân tạo xuất hiện dưới dạng vật liệu ở một dải tần số nào đó, với các đặc tính đặc biệt không thể tìm thấy trong tự nhiên. Các đặc tính này thu được từ cấu trúc của vật liệu thay vì tính chất của vật liệu. Những năm gần đây, siêu vật liệu Meta được nghiên cứu rất sôi động trong các ứng dụng nguy trang [43]. Nhìn chung, các siêu vật liệu Meta trong nguy trang ảnh nhiệt đã được nghiên cứu và công bố đều có những đặc tính rất đặc biệt. Theo hai chiến lược cơ bản để nguy trang ảnh nhiệt đã nêu ở phần mở đầu, siêu vật liệu nhiệt kết hợp với kỹ thuật thiết kế chọn lọc bước sóng đã đạt được một số hiệu quả nhất định về nguy trang ảnh nhiệt. Sau đó, với sự tác động từ bên ngoài như kích thích điện thế, ánh sáng, sức căng, hóa học, làm ướt, nhiệt độ,... tới các siêu vật liệu đã tạo ra các hiệu quả nguy trang thích nghi. Bên cạnh đó, vật liệu chuyển pha cũng là một trong những siêu vật liệu có nhiều tiềm năng trong ứng dụng nguy trang. Các siêu vật liệu hứa hẹn khả năng ứng dụng rất lớn cho nguy trang đa phổ, nguy trang chủ động thích nghi trong tương lai. Một số siêu vật liệu nổi bật như bảng 3.

Bảng 3. Các nghiên cứu về siêu vật liệu Meta ứng dụng trong ngụy trang ảnh nhiệt.

Tác giả/ Năm công bố	Nguyên lý	Cơ chế hoạt động / vật liệu
Han et al [44] / 2014	Điều chỉnh nhiệt độ	Điều khiển và kiểm soát nhiệt trên siêu vật liệu nhiệt
Yang et al [45] / 2015		Điều khiển dòng nhiệt, điện qua lớp vật liệu siêu mỏng
Li et al [46] / 2018		Tạo ra phân bố nhiệt tùy ý trên bề mặt cấu trúc đặc biệt
Hu et al [47] / 2018		Điều khiển nhiệt độ trên vật liệu có cấu trúc 2D
Sha et al [48] / 2020		Điều khiển nhiệt độ trên vật liệu cấu trúc 3D
Zhang et al [49] / 2021		Dẫn nhiệt đồng bộ theo thời gian giữa vật liệu và nền
Zhang et al [50] / 2017	Lớp phủ có hệ số phát xạ thấp	Siêu bề mặt metasurface phát xạ thấp
Peng et al [51] / 2018	hệ số phát xạ thấp	Tấm vật liệu siêu mỏng phát xạ thấp
Zhu et al [52] / 2020	phát xạ thấp	Vật liệu chọn lọc quang phổ
Kim et al [53] / 2019	phát xạ thấp	Siêu vật liệu phân cấp có thể điều khiển tín hiệu đa phổ
Pan et al [54] / 2020	phát xạ thấp	Cấu trúc tinh thể quang tử, giao thoa màng mỏng
Coppens et al [55] / 2017	Ngụy trang chủ động	Siêu vật liệu có khả năng điều biến bằng tia cực tím
Salihiglu et al [56] / 2018		Vật liệu có khả năng điều biến điện tử sử dụng graphene
Duan et al [57] / 2020		Điều khiển sự chuyển pha của vật liệu VO ₂
Qu et al [58] / 2018		Vật liệu thay đổi pha GST (Ge ₂ Sb ₂ Te ₂)
Xu et al [59] / 2018		Vật liệu chuyển sinh học
Li et al [60] / 2020		Kết nối các đặc tính quang học của màng nano kim loại

3. PHÂN TÍCH, THẢO LUẬN

Trong phần 3, nhóm tác giả tập trung phân tích, thảo luận hiệu quả ngụy trang ảnh nhiệt của các vật liệu ngụy trang ảnh nhiệt đã được nghiên cứu, chế tạo và công bố, trong đó tập trung vào các tấm phủ MTS04, MTS06 của nước ngoài [10] và tấm phủ ngụy trang ảnh nhiệt trong nước [30]. Từ đó, đưa ra một số nhận định về xu hướng phát triển và đặt ra các vấn đề cần tiếp tục nghiên cứu, giải quyết.

Trước hết, sơn ngụy trang ảnh nhiệt là vật liệu có độ phức tạp thấp nhất so với vật liệu đa lớp và siêu vật liệu. Sơn ngụy trang ảnh nhiệt có nhiều ưu điểm trong ứng dụng, bởi sơn là công nghệ cơ bản, truyền thống và dễ triển khai trên đối tượng để quản lý dấu lộ của đối tượng. Trước khi sơn ngụy trang ảnh nhiệt được áp dụng thì sơn ngụy vùng VIS và NIR cũng đã được áp dụng. Ngoài ra, sơn còn có tác dụng bảo vệ bề mặt của đối tượng trước các tác nhân phá hoại của môi trường. Bên cạnh đó, xét về chi phí thì sơn là vật liệu khá rẻ, và có thể được thay thế, làm mới dễ dàng. Tuy nhiên, hạn chế của sơn ngụy trang ảnh nhiệt là khi kết hợp với các hạt màu và chất kết dính trong một hệ thống hoàn chỉnh, các đặc tính của các thành phần tạo ra các hiệu ứng quang học bị suy giảm. Các hạt màu và chất kết dính có hệ số phát xạ cao, do đó, các hệ thống sơn khó có thể ngụy trang hiệu quả trong vùng phổ rộng hay ngụy trang đa phổ. Một số loại sơn ngụy trang ảnh nhiệt hiện nay sử dụng các hạt màu dạng vảy được mạ phủ bởi kim loại tiêu biểu là nhôm tỏ ra có hiệu quả. Tuy nhiên, độ bám dính cao, độ phản xạ cao trong vùng VIS và xu hướng hình thành các lớp phủ dẫn điện tạo hiệu quả ngụy trang ra đa,... là những vấn đề cần giải quyết.

Siêu vật liệu Meta được nghiên cứu một cách sôi động và chứng minh được một số hiệu quả

nhất định trong nguy trang ảnh nhiệt, và thậm chí là nguy trang đa phổ bởi những đặc tính rất đặc biệt được tạo ra từ các cấu trúc đặc biệt và có độ phức tạp nhất của các hệ vật liệu. Tuy nhiên, có thể thấy rằng các kết quả nghiên cứu của siêu vật liệu đang ở dạng mô hình và phòng thí nghiệm, chưa có ứng dụng triển khai trên thực tế bởi quy mô, chi phí, độ phức tạp và tính khả thi trong thực tiễn. Hiện nay, việc áp dụng các siêu vật liệu với một số vật liệu nano tiên tiến đang mở ra nhiều hứa hẹn và triển vọng trong nguy trang ảnh nhiệt.

So với sơn và siêu vật liệu Meta, vật liệu đa lớp là nhóm vật liệu có độ phức tạp vừa phải. Có thể thấy ưu điểm lớn nhất của vật liệu đa lớp là kết hợp được các đặc trưng (có thể là các ưu điểm) của các vật liệu đơn lẻ tạo nên một tổ hợp vật liệu có các đặc tính khác nhau, đa dạng và giải quyết được các vấn đề khó khăn trong nguy trang ảnh nhiệt mà một vật liệu đơn lẻ không thể giải quyết được. Vấn đề cốt lõi ở đây là kết hợp được vật liệu có hệ số phát xạ thấp với vật liệu có khả năng cách nhiệt, làm cho tấm phủ có hiệu quả nguy trang ảnh nhiệt. Tương tự với sơn, vật liệu đa lớp cũng được ứng dụng rộng rãi trong nguy trang ảnh nhiệt, một số trường hợp thì sơn và vật liệu đa lớp được kết hợp với nhau để làm tăng hiệu quả nguy trang ảnh nhiệt cho đối tượng.

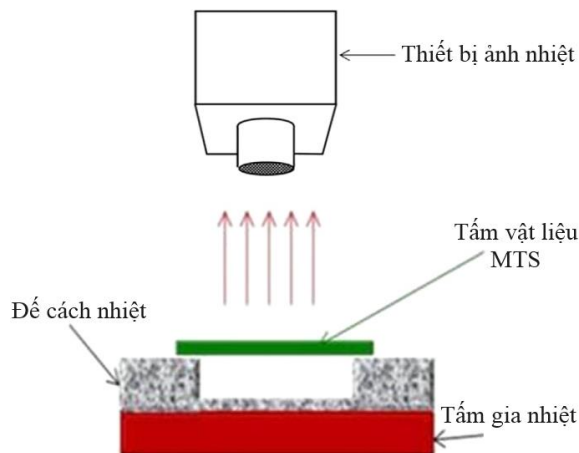
Đối với cách tiếp cận sử dụng các vật liệu phổ biến dạng vải dệt, vải sợi kết hợp với công nghệ phủ màng kim loại (nhôm, hoặc những kim loại khác,...) và các vật liệu cách nhiệt, các nghiên cứu cũng đã chỉ ra rằng tấm phủ nguy trang MTS có hiệu quả nguy trang nhiệt mà cụ thể là hiệu quả che chắn nhiệt tốt. Một cách cảm tính có thể suy luận rằng, số lớp vật liệu càng nhiều lên thì hiệu quả che chắn nhiệt càng tốt, và điều này đã được làm sáng tỏ trong các thử nghiệm dựa trên việc tính toán hiệu quả che chắn nhiệt [10, 30]. Tuy nhiên, số lớp vật liệu càng nhiều kéo theo kích thước, khối lượng tấm phủ tăng dần và chi phí cao, đồng thời làm tính khả thi trong ứng dụng thấp. Như vậy, nghiên cứu để kết hợp các vật liệu cách nhiệt truyền thống và áp dụng các vật liệu mới, vật liệu tiên tiến có hệ số phát xạ thấp, có khả năng chọn lọc phổ, có hệ số hấp thụ cao,... tạo ra tấm phủ đa lớp có nhiều tính năng ưu việt hơn, hiệu quả nguy trang nhiệt cao hơn có tính khả thi cao dựa trên các kết quả nghiên cứu mà thế giới và trong nước đã công bố.

Về tấm phủ đa lớp trong nước nghiên cứu, có thể thấy cách tiếp cận là phù hợp. Tuy nhiên, có thể thấy tấm vật liệu cách nhiệt sử dụng vải lưới 3D (lớp thứ 2) có độ dày 15 mm [30] là quá lớn, làm cho khối lượng của tấm phủ tăng lên và khả năng cơ động, gập gọn bị hạn chế. Do đó, cần nghiên cứu tối ưu cả chiều dày của các tấm vật liệu để đạt được cấu trúc tối ưu nhất.

Khi tấm phủ đa lớp MTS phủ lên đối tượng cần được nguy trang ảnh nhiệt, tấm phủ MTS chịu bức xạ nhiệt từ đối tượng chiếu tới tạo ra nhiều hiện tượng vật lý xảy ra đồng thời bên trong tấm phủ: phản xạ nhiệt giữa các bề mặt các tấm vật liệu, hấp thụ nhiệt trên các tấm vật liệu, phần không khí bị kẹt ở giữa các tấm vật liệu làm tăng tổn thất dẫn nhiệt, và bức xạ nhiệt, đối lưu ở lớp vật liệu ngoài cùng. Những hiện tượng này là nguyên nhân gây ra tổn thất đối với năng lượng nhiệt phát ra từ mục tiêu và truyền tới tấm phủ bao gồm tổn thất của phát xạ nhiệt, dẫn nhiệt và đối lưu nhiệt. Phần năng lượng còn lại được truyền qua tấm phủ MTS, điều này tạo ra hiệu quả che chắn nhiệt từ đối tượng của tấm phủ MTS. Hiệu quả nguy trang ảnh nhiệt của tấm phủ MTS thường được đánh giá thông qua hiệu quả che chắn nhiệt của tấm phủ, được thực hiện bằng mô phỏng và thực nghiệm trên cơ sở sử dụng tấm gia nhiệt (có thể thiết lập để thay đổi nhiệt độ), tấm phủ MTS và thiết bị ảnh nhiệt với sơ đồ thử nghiệm như hình 3. Tấm gia nhiệt được thiết lập ở nhiệt độ đủ lớn và cao hơn nhiệt độ của môi trường. Để tính toán hiệu quả nguy trang nhiệt của tấm phủ, sử dụng khái niệm hiệu quả che chắn nhiệt T_s (%) của tấm vật liệu, theo công thức sau [10]:

$$T_s(\%) = \frac{T_{TG} - T_{MTS}}{T_{TG} - T_{BG}} \times 100 \quad (4)$$

Trong đó, T_{TG}, T_{BG}, T_{MTS} lần lượt là nhiệt độ của tấm gia nhiệt, nhiệt độ môi trường xung quanh và nhiệt độ bề mặt ngoài cùng của tấm vật liệu đa lớp MTS.

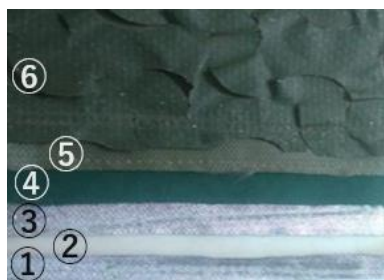


Hình 3. Sơ đồ bố trí thử nghiệm xác định hiệu quả che chắn nhiệt của tấm phủ ngưng trang.

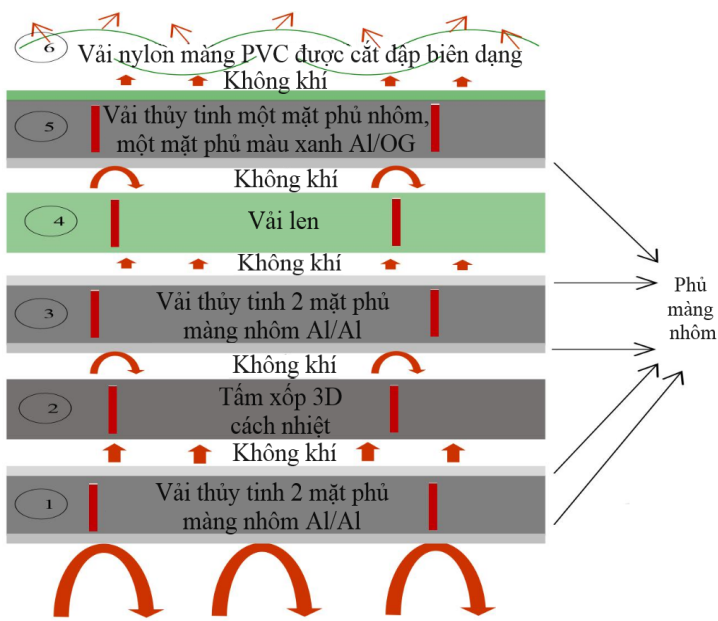
Trong phạm vi bài báo, nhóm tác giả tổng hợp 03 tấm phủ ngưng trang ảnh nhiệt tiêu biểu để nghiên cứu phân tích. Cụ thể, tấm phủ ngưng trang 4 lớp MTS04, 6 lớp MTS06 được nhóm nghiên cứu của Ấn Độ công bố [10] (hình 4) và tấm phủ ngưng trang ảnh nhiệt 4 lớp do trong nước nghiên cứu [30] (hình 5). Các lớp vật liệu được đánh số thứ tự từ 1, 2,... theo thứ tự từ bên trong (gần đối tượng) ra bên ngoài (bề mặt tiếp giáp không khí và môi trường).



a. Tấm phủ MTS04.



b. Tấm phủ MTS06.



c. Sơ đồ cấu trúc trao đổi nhiệt của tấm phủ 6 lớp MTS06.

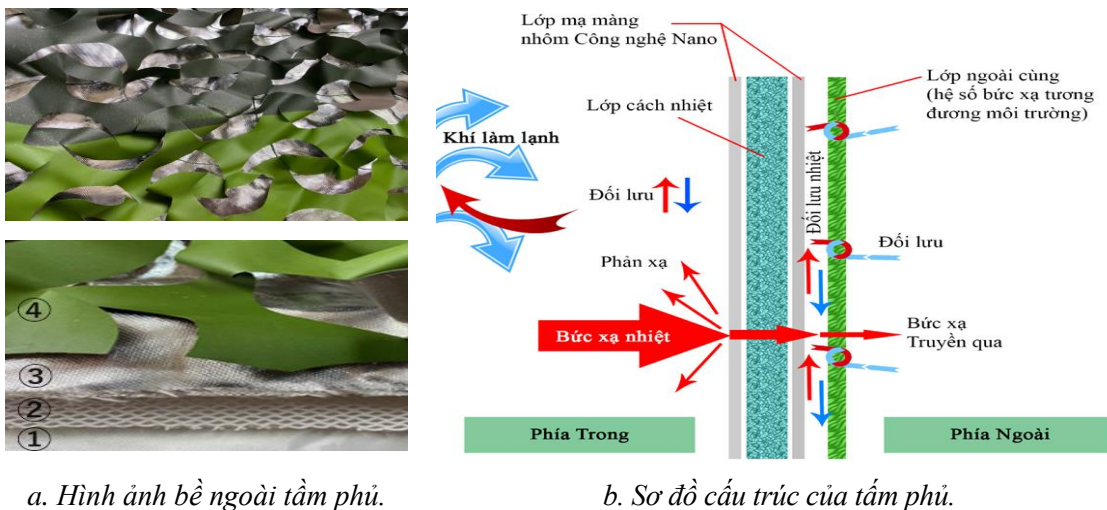
Hình 4. Hình ảnh các tấm vật liệu 4 lớp và 6 lớp và sơ đồ cấu trúc trao đổi nhiệt của tấm vật liệu 6 lớp MTS06.

Tấm phủ đa lớp của Ấn Độ được thiết kế dạng 4 lớp và 6 lớp trên cơ sở kết hợp giữa các tấm vật liệu riêng lẻ khác nhau, tiêu biểu là các tấm vật liệu có hệ số phát xạ thấp được phủ màng nhôm ở các mặt, và các tấm vật liệu cách nhiệt [10]. Bảng 4 nêu chi tiết về các lớp phủ trên tấm vật liệu có 4 lớp MTS04 (gồm các lớp 1, 2, 5 và 6) và 6 lớp MTS06 (gồm các lớp từ 1 đến 6) [10]. So với tấm vật liệu 4 lớp MTS04, tấm vật liệu 6 lớp MTS06 có bổ sung thêm 2 lớp là lớp thứ 3 (vải sợi thủy tinh phủ màng nhôm cả 2 mặt) và lớp thứ 4 (vải len màu xanh ô liu).

Bảng 4. Cấu trúc của tấm vật liệu 4 lớp MTS04 và 6 lớp MTS06.

STT	Các lớp vật liệu của tấm vật liệu 4 lớp MTS04 và tấm vật liệu 6 lớp MTS06	Độ dày (mm)	Định lượng (g/m ²)
1	Vải sợi thủy tinh phủ màng nhôm cả 2 mặt: Al/Al	0,44	550
2	Tấm xốp EVA	3,18	240
3	Vải sợi thủy tinh phủ màng nhôm cả 2 mặt: Al/Al	0,44	550
4	Vải len màu xanh ô liu	1,22	400
5	Vải sợi thủy tinh, một mặt phủ màng nhôm, một mặt phủ màu xanh ô liu (OG), hoặc nâu xám (DB) hoặc màu vàng cát: Al/OG hoặc Al/DB hoặc Al/vàng cát	0,46	600
6	Vải nylon phủ màng PVC được cắt, dập biên dạng lỗ	0,25	175

Trong nước, nhóm tác giả V. H. Khánh [30] đã đề xuất và phát triển tấm phủ nguy trang ảnh nhiệt cho xe cơ giới có kết cấu 4 lớp được mô tả như hình 5 và chi tiết các lớp ở bảng 5.



a. Hình ảnh bề ngoài tấm phủ.

b. Sơ đồ cấu trúc của tấm phủ.

Hình 5. Hình ảnh và sơ đồ cấu trúc của tấm vật liệu nguy trang ảnh nhiệt trong nước [30].

Bảng 5. Cấu trúc của tấm phủ nguy trang ảnh nhiệt của đề tài V. H. Khánh [30].

STT	Các lớp vật liệu của tấm phủ nguy trang ảnh nhiệt	Độ dày (mm)	Định lượng (g/m ²)
1	Vải sợi thủy tinh phủ màng nhôm 1 mặt: Al	0,19	212
2	Vải lưới 3D	15	685
3	Vải sợi thủy tinh phủ màng nhôm 1 mặt: Al	0,19	212
4	Vải PVC (có lưới gia cường) in màu loang (Xanh lá già, Xanh lá non, Đen, Nâu đất...) được cắt, dập biên dạng lỗ	0,18	220

Có thể thấy rằng, nhóm V. H. Khánh [30] đã kết hợp các vật liệu có sẵn với chủng loại các tấm vật liệu tương tự với cấu trúc của tấm phủ MTS04 [10]. Tuy nhiên, điểm khác biệt là các tấm vải sợi thủy tinh chỉ được phủ nhôm trên một mặt, tấm vải lưới 3D khá dày (15 mm) và nặng (685 g/m²). Ngoài ra, để đánh giá hiệu quả nguy trang ảnh nhiệt của tấm phủ, khái niệm hiệu quả che

chấn nhiệt [10] được đưa ra ở công thức (4) có thể chưa phù hợp bởi, theo phương trình Stefan-Boltzmann và công thức (3), độ tương phản nhiệt của đối tượng không chỉ phụ thuộc vào nhiệt độ của đối tượng mà còn phụ thuộc vào hệ số phát xạ bề mặt. Như vậy, hiệu quả nguy trang nhiệt cần được xem xét ở góc độ suy giảm năng lượng bức xạ của đối tượng chứ không chỉ đánh giá trên yếu tố làm suy giảm nhiệt độ bề mặt đối tượng.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã nghiên cứu tổng quan về những tiến bộ trong chế tạo vật liệu nguy trang ảnh nhiệt gồm sơn, các vật liệu đa lớp và siêu vật liệu Meta. Thông qua đánh giá ưu nhược điểm của các vật liệu và đánh giá một số vật liệu nguy trang đa lớp đã được ứng dụng, bài báo đã làm sáng tỏ được:

- Siêu vật liệu Meta có tiềm năng ứng dụng lớn trong nguy trang ảnh nhiệt.
- Giải pháp vật liệu đa lớp cho nguy trang ảnh nhiệt là giải pháp có nhiều ưu điểm trong thiết kế và ứng dụng hiện nay nhằm giải quyết bài toán nguy trang ảnh nhiệt cho các đối tượng khác nhau, đặc biệt là các đối tượng mặt đất có đặc tính tỏa nhiệt lớn, có kích thước lớn.
- Vật liệu đa lớp kết hợp được nhiều đặc tính của nhiều lớp vật liệu khác nhau, trong đó, kết hợp được các vật liệu có hệ số phát xạ thấp và các vật liệu có khả năng cách nhiệt.
- Một số nghiên cứu trong nước bước đầu đã tiếp cận giải pháp vật liệu đa lớp bằng việc kết hợp các vật liệu sẵn có. Tuy nhiên, do chưa được nghiên cứu có tính hệ thống, khoa học, chỉ dựa trên kinh nghiệm và thực nghiệm nên sản phẩm có kích thước công kênh và tính ứng dụng thấp.

Từ các kết quả đó đặt ra các vấn đề nghiên cứu cần giải quyết, làm rõ như sau:

- Nghiên cứu, khảo sát phân bố nhiệt, năng lượng phát xạ bề mặt tấm phủ đa lớp, kết hợp với khảo sát đặc trưng nhiệt độ, năng lượng phát xạ của một số phong nền cụ thể dựa trên các trang thiết bị chuyên dụng như máy đo phổ từ xa SR-5000N.
- Nghiên cứu tối ưu về thiết kế, số lớp vật liệu, độ dày các lớp vật liệu dựa trên các mô hình toán học, các phần mềm hay chương trình mô phỏng,... làm cơ sở tối ưu tính năng sản phẩm.
- Nghiên cứu xây dựng một số phương pháp đánh giá trên cơ sở lý thuyết và thông qua thực nghiệm để đánh giá hiệu quả nguy trang của tấm phủ nguy trang ảnh nhiệt đa lớp.
- Tiến tới xây dựng cơ sở lý thuyết có tính khoa học, tin cậy nhằm làm chủ nghiên cứu, thiết kế và chế tạo tấm phủ nguy trang ảnh nhiệt ứng dụng trong quân đội.

Lời cảm ơn: Nhóm tác giả trân trọng cảm ơn sự hỗ trợ về trang thiết bị thí nghiệm của Viện Vật lý Kỹ thuật/Viện Khoa học và Công nghệ quân sự.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. N. T. Cầm, “*Nguy trang nghi trang trong phòng chống trinh sát quang điện tử*,” Giáo trình đào tạo NCS, NXB Quân đội Nhân dân (2023).
- [2]. J.V. R. Rao, “*Introduction to Camouflage and Deception*,” Defence Research & Development Organisation, Ministry of Defence, New Delhi-110 011, 21-24 (1999).
- [3]. A. Roglski, “*Infrared Detectors, An Overview*,” Inf. Phys. Technol. 43, tr. 187-210, (2002).
- [4]. D. Peric *et al*, “*Thermal Imager Range: Predictions, Expectations and Reality*,” Sensor, 19(15), 3313, (2019).
- [5]. J. Berela, M. Kastek, “*Measurement and Analysis of the Parameters of Modern Long-Range Thermal Imaging Cameras*,” Sensor 17, 5700, (2021).
- [6]. F.B. Olsen, “*Methods for evaluating thermal camouflage*,” A FFI Report No. RTO-MPSCI-145, (2005).
- [7]. C. Plesa *et al*, “*The use of infrared radiation for thermal signatures determination of ground targets*,” Rom. J. Phys. 51, pp.63–72, (2006).
- [8]. J. G. Hixon *et al*, “*Target detection cycle criteria when using the target task metric*,” SPIE 5612 (2004), pp. 275–276.
- [9]. G. C. Holst, “*Common Sense Approach to Thermal Imaging*,” JCD and SPIE Pub., pp. 265–290, (2000).
- [10]. O. Dev *et al*, “*Multi-layered textile structure for thermal signature suppression of ground based targets*,” Inf. Phys. Technol. 105, 103175, (2020).

- [11]. Hexels, “*Thermal Camouflage Sheet*,” US Patent 7244684 B2, (2007).
- [12]. Hellwig *et al*, “*Thermal Camouflage Tarpaulin*,” US Patent 7148161 B2, (2006).
- [13]. Cox *et al*, “*Infrared Camouflage Covering*,” US Patent 6127007, (2000).
- [14]. G. D. Culler *et al*, “*Infrared reflective coverings*,” US Patent 5750242, (1998).
- [15]. V. Rubeziene *et al*, “*Reduction of thermal signature using fabrics with conductive additives*,” Mater. Sci. (Medziagotyra) 19, pp.409–414, (2013).
- [16]. C. Oahman, “*Emittance Measurement using AGEMA E-Box*,” Technical Report, AGEMA, (1999).
- [17]. Z. S. Abdel-Rehim *et al*, “*Textile fabrics as thermal insulators*,” AUTEX Res. J.6, pp.148-161, (2006).
- [18]. M. Matusiak, “*Investigation of the thermal insulation properties of multilayer textiles*,” J. Fibres Text. East. Eur. 14, pp.98–102, (2006).
- [19]. N. N. Son *et al*, “*A high-accuracy measurement method of surface emissivity using a spectroradiometer SR-5000N*,” Proc. of 8th CASEAN, 28-30 August, Vinh, pp.674-681, (2023).
- [20]. P. Ding *et al*, “*Multilayer graphene-based radiation modulator for adaptive infrared camouflage with thermal management*,” J. Phys. D Appl. Phys., 55, 345103, (2022).
- [21]. Q. Kang *et al*, “*Tunable thermal camouflage based on GST plasmonic metamaterial*”, Nanomaterials 2021, 11, 260.
- [22]. Y.J. Huang *et al*, “*Broadband metamaterial as an “Invisible” radiative cooling coat*,” Opt. Commun., 407, 204-207, (2018).
- [23]. A. Ali *et al*, “*A review from the perspectives of materials, mechanisms and advanced metadevices*,” Nanomaterials, 12, 1027, (2022).
- [24]. D. Qi *et al*, “*Design and characterization of one-dimensional photonic crystals based on ZnS/Ge for infrared-visible compatible stealth applications*,” Opt. Mater., 62, 52–56, (2016).
- [25]. Z. Deng *et al*, “*Nanostructured Ge/ZnS films for multispectral camouflage with low visibility and low thermal emission*,” ACS Appl. Nano Mater., 5, 5119–5127, (2022).
- [26]. Z. Zhao *et al*, “*Selectively thermal radiation control in long-wavelength infrared with broadband all-dielectric absorber*,” Opt. Express, 27, 35088–35095, (2019).
- [27]. L. Wang *et al*, “*Combined multi-band infrared camouflage and thermal management via a simple multilayer structure design*,” Opt. Lett., 46, 5224–5227, (2021).
- [28]. M. Yang *et al*, “*Infrared and Terahertz compatible absorber based on multilayer film*,” Front. Phys., 9, 633971, (2021).
- [29]. L. Zhang *et al*, “*Three-Layered Thin Films for Simultaneous Infrared Camouflage and Radiative Cooling*,” MDPI, Materials, 16, 4188, (2023).
- [30]. V. H. Khánh, “*Nghiên cứu phương pháp và phương tiện để xây dựng cơ sở dữ liệu phục vụ công tác nguy trang phòng chống các phương tiện trinh sát ảnh*,” Báo cáo tổng kết đề tài cấp Viện KH-CN quân sự (2022).
- [31]. N. N. Son *et al*, “*Một phương pháp thiết kế họa tiết nguy trang hòa trộn với phòng nền*”, Tạp chí Nghiên cứu KH&CN quân sự, 92, tr. 121-129, (2023).
- [32]. M. C. Hall, “*Thermal Signature Management*,” Master thesis (2017), North Carolina State University.
- [33]. G. Song, “*Modeling thermal protection outfits for fire exposures*,” PhD thesis, N. Carolina State University, (2002).
- [34]. Y. A. Cengel *et al*, “*Heat and mass transfer- fundamentals and applications*,” NXB McGraw Hill Education, tr. 144-153, (2015).
- [35]. N. T. Lâm, “*Nghiên cứu công nghệ nguy trang thích nghi và đề xuất giải pháp công nghệ ứng dụng cho một số đối tượng quân sự*,” Báo cáo tổng kết đề tài cấp Viện Vật lý Kỹ thuật (2023).
- [36]. <https://www.baesystems.com/en/feature/adativ-cloak-of-invisibility>. Truy cập ngày 11/4/2024.
- [37]. K. Andersson, “*On the military utility of spectral design in signature management: a system approach*,” Luận văn Tiến sĩ, Finnish National Defence University, Thụy Điển, (2018).
- [38]. K. E. Andersson and C. Akerlind, “*A review of materials for spectral design coatings in signature management applications*,” Proc. of SPIE Vol. 9253, 9253Y (2014).
- [39]. T. Hallberg *et al*, “*Development of low emissive camouflage paint: Final report Development of low-emissive camouflage paint: Final report*,” FOI, (2005).
- [40]. H. Karlsson *et al*, “*Ny typ av låg emissiv kamouflagefärg - slutrapport*,” FOI-R--2316--SE (2007).
- [41]. F. C. Shen *et al* “*Study on the Low-Emissive Camouflage Pigment*,” Adv Mater Res., 624, 303–306 (2012).
- [42]. <https://intermatdefense.com/anti-thermal>. Truy cập ngày 11/4/2024.

- [43]. R. Hu *et al*, “Thermal camouflaging metamaterials,” *Materialstoday*, Vol 45, pp. 120-141, (2021).
- [44]. T. Han *et al*, “Full Control and Manipulation of Heat Signatures: Cloaking, Camouflage and Thermal Metamaterials,” *Advanced Materials*, Volume 26, Issue 11, pp.1731-1734, (2014).
- [45]. T. Yang *et al*, “Invisible Sensors: Simultaneous Sensing and Camouflaging in Multiphysical Fields,” *Advanced Materials*, Volume 27, Issue 47, pp.7752-7758, (2015).
- [46]. Y. Li *et al*, “Structured thermal surface for radiative camouflage,” *Nat Commun* 9, 273 (2018).
- [47]. R. Hu *et al*, “Illusion thermotics,” *Advanced Materials*, Vol. 30, No. 22, 1707237, (2018).
- [48]. W. Sha *et al*, “Illusion thermotics with topology optimization,” *J. Appl. Phys.* Vol. 128. Issue 4 (2020).
- [49]. J. Zhang *et al*, “Adaptive Radiative Thermal Camouflage via Synchronous Heat Conduction,” *Chinese Physics Letters*, 38 010502 (2021).
- [50]. C. Zhang *et al*, “An ultralight and thin metasurface for radar-infrared bi-stealth applications,” *J. Phys. D: Appl. Phys.* 50 444002 (2017).
- [51]. L. Peng *et al*, “A Multilayer Film Based Selective Thermal Emitter for Infrared Stealth Technology,” *Advanced Optical Materials*, 6, 1801006, (2018).
- [52]. H. Zhu *et al*, “High-temperature infrared camouflage with efficient thermal management,” *Light, Science & Applications*, 9:60, (2020).
- [53]. T. Kim *et al*, “Hierarchical Metamaterials for Multispectral Camouflage of Infrared and Microwaves,” *Adv. Funct. Mater.*, 29, 1807319, (2019).
- [54]. M. Pan *et al*, “Multi-band middle-infrared-compatible camouflage with thermal management via simple photonic structures,” *Nano Energy*, Vol 69, 14449, (2020).
- [55]. Z. J. Coppens and J. G. Valentine, “Spatial and Temporal Modulation of Thermal Emission,” *Advanced Materials*, Vol 29, Issue 39, 1701275, (2017).
- [56]. O. Salihoglu *et al*, “Graphene-Based Adaptive Thermal Camouflage,” *Nano Lett.* 2018, 18, 7, 4541–4548.
- [57]. X. Duan *et al*, “Reconfigurable Multistate Optical Systems Enabled by VO₂ Phase Transitions,” *ACS Photonics*, 7, 11, 2958–2965, (2020).
- [58]. Y. Qu *et al*, “Thermal camouflage based on the phase-changing material GST,” *Light Sci Appl* 7, 26 (2018).
- [59]. C. Xu *et al*, “Adaptive infrared-reflecting systems inspired by cephalopods,” *Sci* 359(6384): 1495-1500, (2018).
- [60]. M. Li *et al*, “Manipulating metals for adaptive thermal camouflage,” *Sci. Adv.* 6, eaba3494 (2020).

ABSTRACT

Advances in manufacturing multi-layer materials for thermal camouflage applications

Thermal imaging reconnaissance technology has been widely and effectively exploited in the military sector to serve reconnaissance, search and track objects and other purposes, because the heat signature of any target is very difficult to conceal, and can easily be detected by thermal imaging reconnaissance devices. Thermal imaging camouflage covers are researched and developed to limit detection by thermal imaging devices by minimizing the heat signature of the target. Multi-layered Textile Structures (MTS) coverings are proposed based on overlapping layers of different materials, combining and optimizing the properties of individual materials to create one with thermal camouflage properties. This article studied and summarized national and international research on thermal imaging camouflage coverings with multi-layer structures, as a basis for orienting research, developing a design method, optimizing and manufacturing a covering with a multi-layer structure that effectively thermal camouflages by domestic resources.

Keywords: Thermal camouflage; Multi-layered textile structures; Emissivity; Target; Background; Metamaterials.