

NGHIÊN CỨU TÍNH TOÁN XÁC ĐỊNH CHIỀU DÀY LỚP BẢO VỆ NHIỆT CHO KẾT CẤU CHỊU NHIỆT ĐỘ CAO CỦA KHÍ CỤ BAY

RESEARCHING CALCULATE FOR DETERMINATION THICKNESS OF THE HEAT INSULATING LAYER FOR HIGH TEMPERATURE RESISTANCE STRUCTURE OF FLIGHT INSTRUMENTS

Trần Xuân Tiến^{1,*}

TÓM TẮT

Lớp bảo vệ nhiệt là thành phần quan trọng trong kết cấu chịu nhiệt độ cao của khí cụ bay (KCB), trong đó chiều dày lớp bảo vệ nhiệt phải vừa đảm bảo bảo vệ được kết cấu KCB dưới tác động của dòng sản phẩm cháy, đồng thời đảm bảo không làm tăng khối lượng của KCB. Bài báo đưa ra một phương pháp xác định được chiều dày cần thiết lớp bảo vệ nhiệt trong thiết kế, chế tạo KCB áp dụng trong nghiên cứu thiết kế, chế tạo sản phẩm.

Từ khóa: Lớp bảo vệ nhiệt, kết cấu chịu nhiệt độ cao, động cơ nhiên liệu rắn, chiều dày lớp bảo vệ nhiệt, kết cấu thân vỏ;

ABSTRACT

The heat insulating layer is an important component in the high-temperature resistant structure of the flying instrument, in which thickness of the heat insulating layer has a moderate thickness that used to prevent the high-temperature gas from attacking the case, but does not do increase mass of the flying instrument. The paper is given a method of determining the required thickness of the heat insulating layer in the design and fabrication of the flying instrument.

Keywords: The heat insulating layer; the high-temperature resistant structure; solid rocket motors; body structure.

¹Viện Khoa học và Công nghệ Quân sự

*Email: titanium18202@gmail.com

Ngày nhận bài: 12/10/2021

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 17/12/2021

Ngày chấp nhận đăng: 27/12/2021

1. GIỚI THIỆU

Các chi tiết chịu tải nhiệt của KCB như thân vỏ tên lửa đẩy, khoang lái của tàu vũ trụ, khoang chứa thiết bị vệ tinh, động cơ tên lửa nhiên liệu rắn... đều chịu tác dụng nhiệt lớn trong quá trình hoạt động. Nguồn nhiệt này sinh ra do quá trình ma sát với không khí trong trường hợp khi khoang lái tàu vũ trụ ma sát với tầng khí quyển trái đất, hoặc sinh ra bởi dòng sản phẩm cháy của nhiên liệu trong các động cơ tên lửa; điểm đặc biệt của dòng nhiệt này là có nhiệt độ cao thường trên ngưỡng nhiệt độ nóng chảy đối với các kim loại và hợp kim kết cấu phổ biến hiện nay. Do đó trong quá trình thiết kế, chế tạo các kết cấu này, cần bổ sung lớp bảo vệ nhiệt để bảo đảm cho kết cấu hoạt động

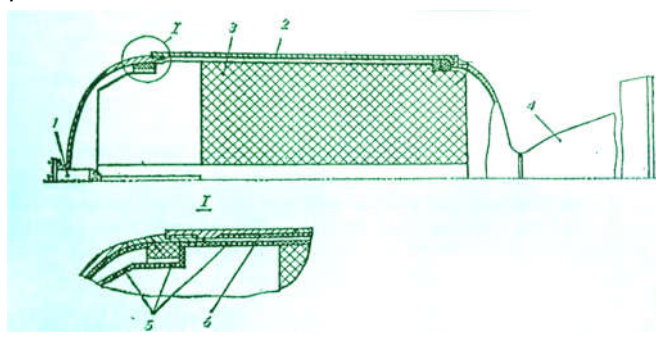
tốt trong điều kiện nhiệt độ cao, đảm bảo tính kết cấu, độ bền và các chỉ tiêu kỹ thuật đề ra.

Để đảm bảo yêu cầu thiết kế với kết cấu khí cụ bay, thì việc tính toán chiều dày lớp bảo vệ nhiệt là một yêu cầu quan trọng nhằm đảm bảo khối lượng của KCB trong quá trình thiết kế, chế tạo và bảo vệ kết cấu không phá hủy bởi tác động của nhiệt độ cao.

Bài báo trình bày xây dựng mô hình tính toán chiều dày lớp bảo vệ nhiệt cho một kết cấu điển hình của KCB là động cơ tên lửa nhiên liệu rắn.

Động cơ tên lửa nhiên liệu rắn (NLR) có kết cấu khá đơn giản, độ tin cậy cao, thời gian chuẩn bị chiến đấu ngắn, dễ bảo quản nên ngày càng được sử dụng rộng rãi trong chế tạo các tên lửa, thiết bị bay trên thế giới.

Về cơ bản động cơ NLR thường có cấu tạo gồm các phần sau (hình 1)[1, 2]:



Hình 1. Kết cấu đặc trưng của động cơ tên lửa nhiên liệu rắn (NLR) [1, 2]

1- cụm mũi, 2- thân vỏ, 3- thuốc phóng, 4- cụm loa phụt, 5- lớp hạn chế mặt cháy, 6- lớp bảo vệ nhiệt

Khi động cơ làm việc, một phần nhiệt lượng từ sản phẩm cháy của thuốc phóng bị đốt cháy sẽ truyền đến phần thân vỏ động cơ và thuốc phóng. Cường độ của sự trao đổi nhiệt này được xác định bởi tính chất nhiệt của các phần tử kết cấu chính của động cơ: thành vỏ, khối loa phụt, phần khí động điều khiển....

Sự truyền nhiệt từ dòng sản phẩm cháy đến kết cấu động cơ và thuốc phóng chủ yếu bằng hai cơ chế đó là trao đổi nhiệt đối lưu và bức xạ. Vì các quá trình này diễn ra một cách độc lập không phụ thuộc vào nhau cho nên tổng dòng nhiệt ở bề mặt có thể tính như sau:

$$q = q_{dl} + q_{bx} \tag{1}$$

trong đó, q_{dl} - dòng nhiệt đối lưu; q_{bx} - dòng nhiệt bức xạ. Từ quan hệ trên ta có hệ số trao đổi nhiệt được tính như sau:

$$\alpha = \alpha_{dl} + \alpha_{bx} \tag{2}$$

trong đó, α_{dl} - hệ số trao đổi nhiệt đối lưu; α_{bx} - hệ số trao đổi nhiệt bức xạ.

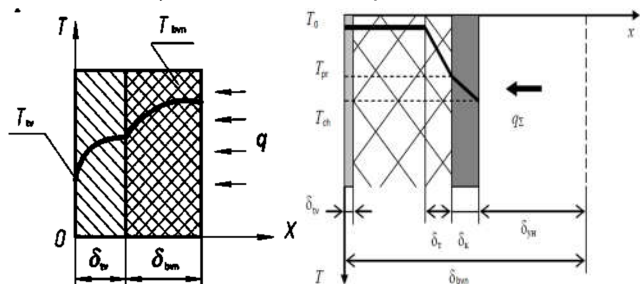
Do nhiệt độ cao của sự cháy của nhiên liệu, kết cấu động cơ chịu một tải trọng nhiệt lớn, trong những điều kiện đó thậm chí ngay cả với thép chịu nhiệt cũng mất độ bền của nó, do đó để kết cấu động cơ làm việc được tin cậy, ổn định thì cần phải làm mát hoặc phải bảo vệ kết cấu đó.

Đối với động cơ tên lửa NLR có thời gian cháy dài (trên 5s) cần phải sử dụng vật liệu bảo vệ nhiệt để bảo vệ kết cấu của động cơ, vì lớp này giữ được những ưu điểm chính của động cơ tên lửa NLR như: sự đơn giản, độ tin cậy của kết cấu và thuận tiện trong quá trình sử dụng. Độ dày lớp bảo vệ nhiệt phải vừa đảm bảo được độ bền kết cấu của động cơ, đồng thời đảm bảo khối lượng nhỏ nhất. Chính vì vậy việc tính toán xác định được độ dày lớp bảo vệ nhiệt thân vỏ động cơ có vai trò, và ý nghĩa rất quan trọng trong quá trình thiết kế, chế tạo động cơ tên lửa NLR có thời gian cháy dài.

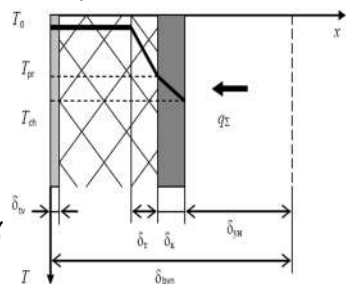
2. MÔ HÌNH TOÁN XÁC ĐỊNH CHIỀU DÀY LỚP BẢO VỆ NHIỆT

Thân vỏ chịu lực của động cơ thông thường được bảo vệ tránh tác động trực tiếp của dòng sản phẩm cháy nhiệt độ cao bằng cách phủ lên nó các vật liệu bảo vệ nhiệt và chịu mài mòn. Phần lớn các phần tử kết cấu trong thực tế đều làm việc trong điều kiện nung nóng không ổn định, về phương diện dòng nhiệt có thể sử dụng hai sơ đồ trong tính toán được chỉ ra trên hình 2 và 3.

Mô hình thứ nhất (hình 2) có khả năng áp dụng trong thiết kế động cơ NLR khi biết được các đặc tính của động cơ, vật liệu thông số nhiệt lý vật liệu chế tạo vỏ, vật liệu và đặc tính nhiệt lý vật liệu chế tạo lớp bảo vệ nhiệt.



Hình 2. Sơ đồ tính toán cho tấm hai lớp [2, 4]



Hình 3. Sơ đồ tính toán cho tấm hai lớp khi có sự phân rã của lớp bảo vệ nhiệt [3, 4, 5]

Mô hình thứ hai (hình 3) thường sử dụng trong quá trình chế tạo mới vật liệu bảo vệ nhiệt, khi đó cần có thêm các nghiên cứu thực nghiệm liên quan đến quá trình phân rã nhiệt của vật liệu, thường được sử dụng trong thiết kế tối ưu; tính toán chiều dày cho vỏ động cơ quản bằng vật liệu composite; dùng thiết kế cho những bộ phận cần bảo vệ đặc biệt như vỏ khoang tàu con thoi...

Nghiên cứu sẽ tính toán chiều dày lớp bảo vệ nhiệt phục vụ quá trình thiết kế, chế tạo động cơ với yêu cầu cho trước, nên sử dụng theo mô hình thứ nhất (hình 2). Đặc trưng của sự phân bố nhiệt lên thành động cơ có lớp phủ bảo vệ nhiệt thụ động được mô tả trên hình 2, từ đó dễ dàng nhận thấy rằng ở lớp phủ bảo vệ nhiệt xảy ra sự giảm nhiệt độ rõ rệt. Ở biên $x = \delta_{tv}$ thì nhiệt độ của thành thân động cơ và của lớp phủ bảo vệ nhiệt là bằng nhau, ta có:

$$T_{tv(\delta_{tv}, \tau)} = T_{bvn(\delta_{bvn}, \tau)$$

Đồng thời cũng có điều kiện cân bằng dòng nhiệt:

$$\lambda_{tv} \frac{\partial T_{tv(\delta_{tv}, \tau)}}{\partial x} = \lambda_{bvn} \frac{\partial T_{bvn(\delta_{bvn}, \tau)}}{\partial x} \tag{3}$$

trong đó, λ_{tv} , δ_{tv} lần lượt là hệ số dẫn nhiệt và độ dày của thân vỏ động cơ; λ_{bvn} , δ_{bvn} lần lượt là hệ số dẫn nhiệt và độ dày của lớp bảo vệ nhiệt;

Để xác định profil đường cong nhiệt của thành hai lớp, đặc trưng cho kết cấu động cơ đã cho, ta có thể sử dụng hệ phương trình dẫn nhiệt, mà trong trường hợp tổng quát cần phải giải có tính đến sự thay đổi của các tính chất nhiệt lý của vật liệu bảo vệ nhiệt và của thành động cơ theo thời gian.

Với phương pháp đó bài toán sẽ rất phức tạp vì vậy để phục vụ cho việc tính toán trong quá trình thiết kế ta sẽ đơn giản hóa bằng cách sử dụng các giả thiết sau:

- các thông số nhiệt lý của lớp bảo vệ nhiệt và của vật liệu thành động cơ không thay đổi theo nhiệt độ;
- nhiệt độ thành động cơ không thay đổi theo chiều dày, nghĩa là $T_{tv(x)} = \text{const}$.

Với các giả thiết trên hệ phương trình xác định trường nhiệt độ lớp bảo vệ nhiệt được viết dưới dạng sau:

$$\frac{\partial T_{bvn(x, \tau)}}{\partial x} = a_{bvn} \frac{\partial^2 T_{bvn(x, \tau)}}{\partial x^2} \tag{4}$$

khi $\delta_{tv} \leq x \leq \delta_{tv} + \delta_{bvn}$; trong đó a_{bvn} - hệ số khuếch tán nhiệt độ của lớp bảo vệ nhiệt.

$$\lambda_{bvn} \frac{\partial T_{bvn(x, \tau)}}{\partial x} = \alpha_k [T_k - T_{bm}(\tau)] \tag{5}$$

khi $x = \delta_{tv} + \delta_{bvn}$, trong đó α_k - hệ số trao đổi nhiệt ở mặt ngoài lớp bảo vệ nhiệt.

$$\lambda_{bvn} \frac{\partial T_{bvn(x, \tau)}}{\partial x} = (c \cdot \rho \cdot \delta)_{tv} \frac{\partial T_{tv(\tau)}}{\partial x} \tag{6}$$

khi $x = \delta_{tv}$

$$T_{bvn(x, 0)} = T_0 \tag{7}$$

khi $\tau = 0$.

Mục tiêu của bài toán là xác được giá trị nhiệt độ tại mặt tiếp giáp với thân vỏ động cơ, đây chính là nhiệt độ trung bình của thành động cơ. Để giải bài toán trên ta giải theo giá trị của nhiệt độ không thứ nguyên ở mặt tiếp xúc dưới dạng hàm hai tham số sau:

$$\theta = f(F_0, \mu) \tag{8}$$

trong đó:

$$\theta_k = \frac{T_k - T_{bvn}}{T_k - T_0} - \text{nhiệt độ không thứ nguyên tại nhiệt độ } T_k;$$

$$F_0 = a_{bvn} \cdot \tau / \delta_{bvn}^2 - \text{tiêu chuẩn Furie};$$

$$\mu = \frac{1}{B_i} + \frac{1}{M} + \frac{1}{B_i M} - \text{tiêu chuẩn thành phần};$$

$$B_i = \alpha \cdot \delta_{bvn} / \lambda_{bvn} - \text{tiêu chuẩn Bio};$$

$$M = (c \cdot \rho \cdot \delta)_{bvn} / (c \cdot \rho \cdot \delta)_{tv}.$$

Giá trị nhiệt độ không thứ nguyên từ hệ phương trình dẫn nhiệt (4)-(7) được viết dưới dạng sau:

$$\theta_k = \frac{T_k - T_{bvn}}{T_k - T_0} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\mu_n \cdot e^{-\Phi^2 \cdot F_0 \cdot \text{sec}^2}}{1 + \mu_n + \mu_n^2 \cdot \Phi^2}, \tag{9}$$

trong đó, Φ - nghiệm nguyên dương của phương trình $\Phi \cdot \text{tg} \Phi = 1/\mu_n$.

Giá trị của μ từ 0 đến 50 ta xây dựng sự phụ thuộc theo quan hệ $\theta = f(F_0)$, từ đó với các giá trị của F_0 và μ sẽ xác định được sự phụ thuộc của nhiệt độ lớp bảo vệ nhiệt theo chiều dày và thời gian. Từ giản đồ sự phụ thuộc trên ta có quan hệ:

$$A \cdot F_0 = \lg\left(\frac{\theta_0}{\theta}\right) (C + \mu) \tag{10}$$

trong đó: A, C là hằng số được xác định từ điều kiện biên ($A = 0,20$; $C = 0,3$). Thay các giá trị của F_0 và μ và biến đổi ta có phương trình sau:

$$\delta_{bvn}^2 + \left(\frac{\lambda_{bvn} + \alpha}{C \cdot M}\right) \cdot \delta_{bvn} + \frac{\lambda_{bvn}}{C \cdot M} + \frac{1}{C} \left(\frac{A \cdot \alpha \cdot a_{bvn} \cdot \tau}{\lg \theta - \lg \theta_0}\right) = 0 \tag{11}$$

Từ điều kiện biên và điều kiện về nhiệt độ tới hạn bề mặt thành động cơ biến đổi ta có được công thức tính chiều dày lớp bảo vệ nhiệt như sau:

$$\delta_{bvn} = -\frac{1}{2 \cdot 0,4} \cdot \left(\frac{\lambda_{bvn}}{\alpha} + \frac{(c \cdot \rho \cdot \delta)_{tv}}{(c \cdot \rho)_{bvn}}\right) + \sqrt{\frac{1}{4 \cdot 0,4^2} \cdot \left(\frac{\lambda_{bvn}}{\alpha} + \frac{(c \cdot \rho \cdot \delta)_{tv}}{(c \cdot \rho)_{bvn}}\right)^2 - \frac{1}{0,4} \cdot \left(\frac{\lambda_{bvn} \cdot (c \cdot \rho \cdot \delta)_{tv}}{\alpha \cdot (c \cdot \rho)_{bvn}} + \frac{a_{bvn} \cdot \tau}{\lg \theta_k - \lg \theta_0}\right)} \tag{12}$$

trong đó, $\theta_k = \frac{T_k - T_{th}}{T_k - T_0}$, $\lg \theta_0 = 0,0212$.

3. KẾT QUẢ VÀ BÌNH LUẬN

Sử dụng công thức (12) với các thông số đầu vào để tính toán được lấy từ kết quả đo đạc thực tế đối với động cơ NLR đang sử dụng trong quân đội.

Kết quả tính toán được dung để so sánh với chiều dày lớp bảo vệ nhiệt đáy động cơ NLR hiện có đang được sử dụng cho kết quả như bảng 1.

Kết quả tính trong bảng 2 có thể thấy rằng giá trị tính toán theo công thức (12) cho kết quả rất sát với chiều dày

mẫu bảo vệ nhiệt của động cơ nhiên liệu rắn hiện đang sử dụng.

Bảng 1. Thông số đầu vào để tính toán chiều dày lớp bảo vệ nhiệt

Hệ số trao đổi nhiệt, α_k , B.m ² /K	Thời gian làm việc của động cơ τ , s	Mật độ ρ_{tv} , kg/m ³	Nhiệt dung riêng C_{tv} , J/kg.K	Mật độ vật liệu bvn ρ_{bvn} , kg/m ³	Nhiệt dung riêng bvn C_{bvn} , J/kg.K	Hệ số dẫn nhiệt bvn λ_{bvn} , W/m.K	Nhiệt độ dòng sản phẩm cháy T_c , K	Nhiệt độ tới hạn T_{th} , K	Nhiệt độ ban đầu T_0 , K
723.201	24*	7850	546	1800	1256	0,256	2000	680*	293

(*kết quả đo trong thực tế trên động cơ nhiên liệu rắn).

Bảng 2. Kết quả tính toán chiều dày của lớp bảo vệ nhiệt đáy động cơ

1	Chiều dày tính theo công thức (12), m.	0,002004
2	Chiều dày mẫu bảo vệ nhiệt hiện có, m.	0,002

4. KẾT LUẬN

Có thể thấy rằng phương pháp tính chiều dày lớp bảo vệ nhiệt có độ tin cậy, có khả năng áp dụng trong quá trình thiết kế, chế tạo động cơ nhiên liệu rắn phục vụ quân sự, quốc phòng, cũng như áp dụng trong quá trình thiết kế các KCB có tốc độ bay lớn như động cơ đẩy tên lửa, khoang chứa thiết bị vệ tinh, khoang người lái của tàu vũ trụ.

Với kết quả đạt được, trong quá trình thiết kế ban đầu, kết hợp với quá trình thử nghiệm giúp ích rất nhiều trong việc xác định được chiều dày tối ưu của lớp bảo vệ nhiệt. Kết quả tính toán rất gần với kết quả thiết kế hiện có mở ra khả năng áp dụng công thức tính toán chiều dày phục vụ quá trình nghiên cứu, thiết kế chế tạo các kết cấu chịu nhiệt độ cao trong tương lai, làm nền tảng cho việc từng bước làm chủ công nghệ thiết kế, chế tạo các động cơ nhiên liệu rắn có thời gian cháy dài đáp ứng được các yêu cầu đề ra đối với các sản phẩm quốc phòng và dân dụng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Bulanov I.M., Vorobey V.V., 1998. *Technology of rocket and aerospace structures made of composite materials*. Moscow: MG TU, 516 p.
- [2]. V. A. Kalinchev, D. A. Yagodnikov, 2011. *Technology for the production of solid fuel rocket engines*. M.: MG TU, 687p.
- [3]. V.V. Vorobey, V. B. Markin, 2003. *Fundamentals of technology and design of rocket engine casings*. Novosibirsk: Nauka, 164p.
- [4]. VP Belov, 2010. *Thermal protection of structural elements of solid propellant rocket engines*. Textbook. SPb, 51p.
- [5]. A. R. Bahramian, Mehrdad Kokabi, Navid Famili, Mohammad Hosain Beheshty, 2006. *Ablation and thermal degradation behavior of a composite based on resol type phenolic resin: Process modeling and experimental*. Polymer, volume 47, Issue 10, Pages.3661-3673.

AUTHOR INFORMATION

Tran Xuan Tien

Academy of Military Science and Technology