

Bê tông asphalt tự phục hồi - tình hình nghiên cứu và triển vọng phát triển

Self-healing asphalt concrete - research status and development prospects

Đỗ Trọng Toàn

Tóm tắt

Vật liệu “tự phục hồi” là vật liệu có khả năng tự bắt đầu quá trình loại bỏ các khiếm khuyết về cấu trúc sinh ra bên trong vật liệu trong quá trình sử dụng. Đặc điểm chính của loại vật liệu này là có tốc độ của quá trình tự phục hồi vượt quá tốc độ phát triển các khuyết tật, cấu trúc mới hình thành có khả năng chống chịu tải trọng tương đương như cấu trúc ban đầu, từ đó làm tăng tuổi thọ của vật liệu. Trong bê tông nhựa, công nghệ tự phục hồi có thể áp dụng gắn liền với đặc điểm về cấu trúc và đặc tính nhựa nhiệt dẻo của nó. Kết quả của quá trình này là sự phục hồi tính toàn vẹn của cấu trúc liên kết hóa lý thông qua việc làm ướt bề mặt vết nứt, khuếch tán các phân tử giữa các bề mặt để hàn gắn các vết nứt. Quá trình tự phục hồi có thể đạt được hiệu quả cao bằng cách thêm vào hỗn hợp bê tông nhựa các viên nang có chứa chất biến tính (chất phục hồi) cùng với các thành phần khác ở giai đoạn chuẩn bị hỗn hợp bê tông nhựa.

Từ khóa: tự phục hồi, bê tông nhựa, viên nang, chất biến tính, vật liệu thông minh

Abstract

“Self-healing” materials are materials capable of initiating the process to eliminate structural defects that arise within the material during use. The main characteristic of this material type is that the speed of the self-healing process surpasses the speed at which defects develop. The newly formed structure has the ability to withstand loads equivalent to the original structure, thereby extending the service life of the material. In asphalt concrete, self-healing technology can be applied in line with its structural characteristics and thermoplastic properties. The result of this process is the restoration of the integrity of the physicochemical bond structure by wetting the crack surface, and diffusing molecules between surfaces to heal cracks. The self-healing process can be achieved with high efficiency by adding capsules containing modifiers (repairers) to the asphalt concrete mix along with other components during the asphalt concrete mix preparation stage.

Key words: self-healing, asphalt concrete, capsules, modifier, smart material

TS. Đỗ Trọng Toàn

Bộ môn Vật liệu xây dựng, khoa Xây dựng,

Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội

Email: trongtoan007@gmail.com;

ĐT: 0916765007

Ngày nhận bài: 30/9/2024

Ngày sửa bài: 04/10/2024

Ngày duyệt đăng: 07/10/2024

1. Mở đầu

Thực tiễn cho thấy rằng, một trong những chủ đề đang được quan tâm nghiên cứu là các giải pháp công nghệ, kỹ thuật nhằm nâng cao độ bền của vật liệu xây dựng, dẫn đến làm tăng tuổi thọ của vật liệu hoặc kết cấu. Vật liệu làm đường giao thông chịu ảnh hưởng đặc trưng bởi các yếu tố sau: tải trọng cơ học tĩnh hoặc động, tần suất của các điều kiện khí hậu (nhiệt độ, độ ẩm, tia cực tím, ...), mức độ tiếp xúc với các tác nhân hóa học và sinh học (tự nhiên và nhân tạo). Do tính biến thiên cao của các yếu tố ảnh hưởng nên các giải pháp công nghệ được đề xuất áp dụng nhằm mục đích cân bằng mức độ ảnh hưởng của một số yếu tố quan trọng được coi là then chốt. Trong thực tế, việc khôi phục chức năng của vật liệu đạt được thông qua các công việc sửa chữa và phục hồi với biện pháp cụ thể, kèm theo đó là chi phí về kinh tế.

Với sự phát triển của ngành xây dựng, nhu cầu sử dụng vật liệu có các đặc tính độc đáo giúp tăng hiệu quả chức năng của các kết cấu và giảm mức độ sử dụng vật liệu trong sản xuất ngày càng tăng. Một giải pháp đầy hứa hẹn trong lĩnh vực khoa học vật liệu nhằm tăng độ bền của kết cấu là tạo ra các vật liệu “thông minh” có khả năng thay đổi tính chất một cách có kiểm soát trong quá trình sử dụng dưới ảnh hưởng của các yếu tố nhân tạo hoặc tự nhiên [1, 2]. Điều kiện chính để phân loại vật liệu là “thông minh” là cung cấp các thay đổi có kiểm soát về cấu trúc, tính chất hoặc trạng thái chức năng, ... Đối với lĩnh vực xây dựng đường, một loại vật liệu thông minh đang được quan tâm và có triển vọng phát triển đó là những vật liệu có khả năng tự khôi phục chức năng của chúng, thường được gọi là “tự phục hồi” hay “tự chữa lành” [3].

Như vậy, cần phải làm rõ thuật ngữ vật liệu “tự phục hồi”. Theo quy luật, động học của những thay đổi trong tham số nhạy cảm về mặt cấu trúc (F) của vật liệu được mô tả bằng phương trình vi phân [4]:

$$\frac{dF}{dt} = -k_t \cdot F^n \quad (1)$$

và nghiệm của nó có dạng:

$$\frac{F_t}{F_0} = \sqrt[n]{1 - k_t \frac{1-n}{F_0^{1-n}} t} \quad (2)$$

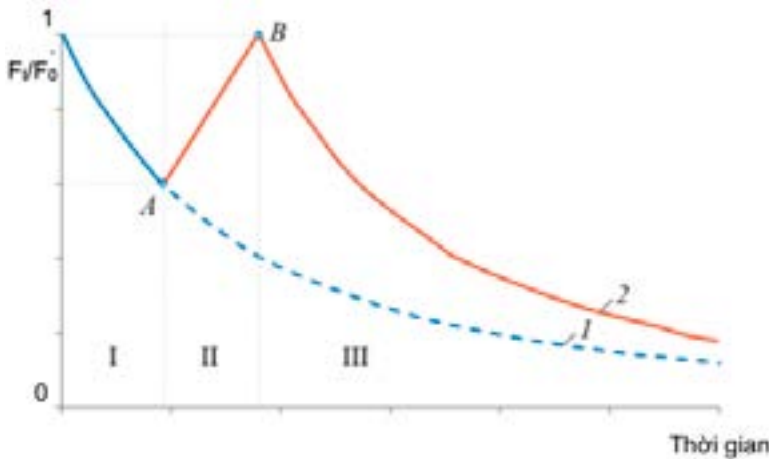
Trong đó:

F_0 - giá trị của tham số nhạy cảm với cấu trúc trong khoảng thời gian ban đầu;

n, k_t - thông số đặc trưng về năng lượng và động học; t - thời gian.

Động học về sự thay đổi giá trị của tham số nhạy cảm với cấu trúc đối với vật liệu thông thường và vật liệu tự phục hồi được trình bày trong hình 1.

Đối với vật liệu thông thường, sự thay đổi tham số nhạy cảm với cấu trúc trong quá trình sử dụng được mô tả theo công thức (2), trong đó các thông số năng lượng và động học n và k_t đặc trưng cho cường độ của quá trình phá hủy. Mô tả về vật liệu tự phục hồi được đặc trưng bởi sự hiện diện của ba giai đoạn thay đổi trong tham số nhạy cảm với cấu trúc. Ở giai đoạn I, sự thay đổi tham số nhạy cảm với cấu trúc F_t/F_0 cũng có thể được mô tả bằng sự phụ thuộc theo công thức (2). Tuy nhiên, tại thời điểm giá trị tối thiểu cho phép của tham số nhạy cảm với cấu trúc, theo đó thành phần của vật liệu được thiết kế, giai đoạn thứ hai của quá trình tự phục hồi của vật liệu sẽ bắt



Hình 1: Sơ đồ động học các thay đổi trong tham số nhạy cảm với cấu trúc. 1- Vật liệu thông thường; 2- Vật liệu tự phục hồi

đầu. Xét rằng tốc độ của quá trình này là tối thiểu, việc mô tả nó có thể được thực hiện bằng cách sử dụng mối quan hệ tuyến tính $F_{12}/F_0 = a \cdot (t - t_c) + F_{11}/F_0$, trong đó a là tốc độ của quá trình tự phục hồi; t_c là thời điểm đạt đến giá trị tới hạn F_{1c} và nảy sinh nhu cầu thực hiện các biện pháp phục hồi vật liệu. Thời điểm t_c là tối ưu để bắt đầu quá trình tự phục hồi, hiệu quả của quá trình này được xác định bởi hệ số $a > 0$ và $t > t_c$. Sau khi hoàn thành giai đoạn tự phục hồi, sự thay đổi tham số nhạy cảm với cấu trúc ở giai đoạn III cũng được mô tả bằng phương trình (2), trong đó hiệu quả tự phục hồi sẽ được đảm bảo ở các giá trị của thông số năng lượng và động học $n_2 \leq n_1$ và $k_{12} \leq k_{11}$.

Phân tích các phương trình cho thấy tốc độ đạt đến trạng thái tới hạn của vật liệu, được đặc trưng bởi sự suy giảm chức năng của nó và nhu cầu loại bỏ các khuyết tật (tăng lên khi thông số năng lượng và động học tăng lên). Trong trường hợp này, độ bền của vật liệu được đảm bảo ở mức n và kt tiến dần về 0. Về vấn đề này, vật liệu "tự phục hồi" là vật liệu có khả năng bắt đầu một quá trình loại bỏ các khiếm khuyết về cấu trúc, tốc độ phục hồi vượt quá tốc độ sự phát triển tự phát của chúng và khả năng chống lại các điều kiện vận hành của cấu trúc được hình thành không kém gì cấu trúc ban đầu. Vì vậy, việc phát triển các giải pháp giúp thực hiện theo nguyên tắc này sẽ làm tăng tuổi thọ của vật liệu là một nhiệm vụ nghiên cứu cấp bách trong lĩnh vực khoa học vật liệu, bao gồm cả lĩnh vực xây dựng đường bộ có sử dụng bê tông nhựa.

2. Tổng quan

Thống kê cho thấy xu hướng phát triển nghiên cứu khoa học trong lĩnh vực công nghệ tự phục hồi có số lượng ấn phẩm ngày càng tăng lên hàng năm, trong đó tỷ trọng nghiên cứu trong lĩnh vực vật liệu đường bộ cũng tăng với số lượng đáng kể (www.scopus.com). Trong khoa học vật liệu xây dựng, các công nghệ liên quan đến khả năng tự phục hồi được sử dụng cả trong vật liệu polymer, bê tông dựa trên chất kết dính vô cơ (bê tông xi măng) hoặc hữu cơ (bê tông nhựa). Chúng đều có khả năng tự phục hồi riêng với các cơ chế tự phục hồi khác nhau [5,6].

Áp dụng công nghệ tự phục hồi trong bê tông nhựa gắn liền với đặc điểm về cấu trúc và đặc tính nhựa nhiệt dẻo của nó. Ngoài ra, còn tính đến các tính chất đặc thù khác của bitum. Bên cạnh đó, việc tăng cường độ của bê tông nhựa được thiết lập theo các văn bản quy định không đảm bảo độ bền của nó trong các điều kiện vận hành trên thực

tế [7, 8]. Độ bền được biểu thị bằng tuổi thọ sử dụng tối đa có thể có của mặt đường bê tông nhựa, mà trong thời gian đó vẫn duy trì được khả năng vận hành phù hợp và không phải tiến hành sửa chữa hoặc phục hồi. Điều này đạt được nhờ tính bất biến hoặc tính không đổi của trạng thái kết cấu vật liệu và theo thời gian đảm bảo khả năng phản ứng bình thường với các yếu tố tác động bên ngoài mà không hình thành các khuyết tật. Vì vậy, để tăng tuổi thọ của mặt đường bê tông nhựa, cần tìm kiếm các giải pháp có cơ sở khoa học mà trong thời gian vận hành, đảm bảo việc sử dụng kết cấu bê tông nhựa không có khuyết tật bằng cách tạo cho nó những đặc tính độc đáo, có thể khôi phục tính toàn vẹn của cấu trúc một cách độc lập (tự phục hồi) và khả năng chống lại các yếu tố ảnh hưởng bên ngoài.

Một giải pháp truyền thống để kéo dài tuổi thọ của mặt đường bê tông nhựa là sử dụng các loại chất thấm bề mặt trong giai đoạn vận hành để ngăn ngừa sự phát triển của các khuyết tật cơ bản. Nguyên lý chung của phương pháp này là sau khi xử lý bề mặt mặt đường bê tông nhựa, các loại chế phẩm sẽ được rải lên bề mặt (ngâm tẩm), từ đó khuếch tán vào bề mặt bê tông nhựa, khôi phục thành phần, tính chất của chất kết dính bitum, hàn gắn, sửa chữa khuyết tật [9, 10]. Tuy nhiên, tùy thuộc vào đặc tính lưu biến, khả năng xuyên qua mặt đường bê tông nhựa không vượt quá 20 mm [11], do đó hiệu quả phục hồi chỉ kéo dài đến các lớp gần bề mặt của lớp bê tông nhựa. Hơn nữa, nó có nhược điểm là để thực hiện quá trình này thì cần thời gian nhất định dừng lưu thông các phương tiện trên đường.

Trong thành phần bê tông nhựa, điều đặc biệt là bitum có khả năng tự phục hồi riêng, nó phụ thuộc vào tính chất vật lý và hóa học của bitum. Khả năng tự phục hồi của bitum trong bê tông nhựa có được khi nó không chịu ảnh hưởng của tải trọng động. Mức độ phục hồi trong trường hợp này sẽ được xác định bằng thời gian nghỉ sau mỗi lần tải trọng tác dụng lặp lại [12]. Ngoài ra, mức độ tự phục hồi của bitum còn phụ thuộc vào điều kiện nhiệt độ trong thời gian nghỉ sau các tải trọng lặp đi lặp lại và khi nhiệt độ bitum càng cao thì quá trình phục hồi càng mạnh. Trên thực tế, tính năng này của bitum còn được sử dụng trong việc tái chế bê tông nhựa.

Khả năng tự phục hồi của bitum được ứng dụng trong việc triển khai công nghệ phục hồi cảm ứng thông qua mặt đường bê tông nhựa, được phát triển tại Đại học Công nghệ Delft. Theo đó, 5-7% sợi kim loại được đưa vào hỗn hợp bê tông nhựa, các sợi kim loại sẽ tiếp xúc với trường điện từ xen kẽ với tần số cao bằng cách sử dụng hệ thống cảm ứng đặc biệt và được nung nóng. Trong quá trình nung nóng sợi kim loại, bitum xung quanh chúng nóng chảy trên nhiệt độ làm mềm và xảy ra quá trình phục hồi bằng cách hàn gắn các khuyết tật [11-15]. Trong trường hợp này, quá trình phục hồi được phép lặp lại ít nhất 5 lần với mức độ phục hồi tương đương nhau (hình 2).

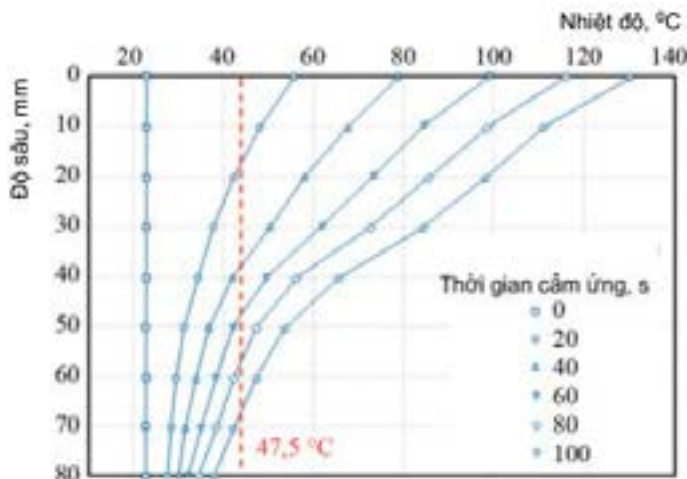
Nhược điểm của công nghệ này là trong quá trình gia nhiệt cảm ứng thì gradient nhiệt độ phụ thuộc vào chiều dày của mặt đường bê tông nhựa (hình 3). Do đó, với sự gia tăng thời gian tiếp xúc cảm ứng có công suất 8,3 kV và tần số 123 kHz trên mẫu, chênh lệch nhiệt độ trên bề mặt và ở độ sâu 80 mm có thể đạt tới hơn 90 °C. Đồng thời, ở khoảng cách tối đa từ nguồn tiếp xúc cảm ứng, nhiệt độ của vật liệu tối ưu để quá trình phục hồi diễn ra được coi bằng nhiệt độ làm mềm của bitum (47,5 °C). Nhiệt độ này không đạt được ngay cả với thời gian tối đa tác động nhiệt cảm ứng [15]. Vì

vậy, việc sử dụng nhiệt cảm ứng để phục hồi toàn bộ chiều dày mặt đường bê tông nhựa hiện nay là không khả thi. Mặt khác, nhu cầu phát triển các thiết bị cảm ứng đặc biệt sẽ làm tăng chi phí triển khai công nghệ này trong thực tế.

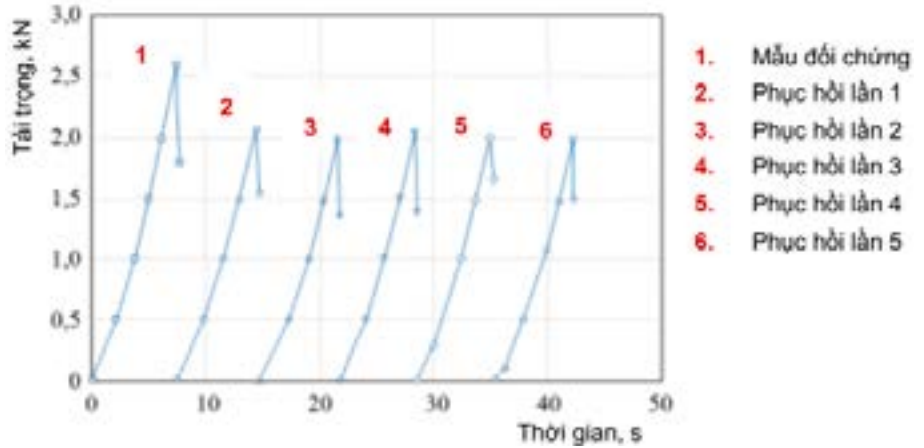
Quá trình tự phục hồi có thể đạt được hiệu quả cao bằng cách sử dụng công nghệ đóng gói các chất có chức năng phục hồi (chất biến tính, chất phục hồi) dưới dạng các viên nang hay sợi rỗng và đưa chúng vào trong thành phần ở giai đoạn chuẩn bị hỗn hợp bê tông nhựa. Việc thực hiện giải pháp như vậy giúp bê tông nhựa có thể phản ứng độc lập với những thay đổi về kết cấu trong quá trình vận hành nhằm khôi phục trạng thái chức năng ban đầu, vì vậy vật liệu này được xếp vào loại “thông minh” với khả năng tự phục hồi. Tuy nhiên, khi thực hiện các giải pháp này trong bê tông nhựa có liên quan đến một số đặc điểm công nghệ trong việc chuẩn bị hỗn hợp bê tông nhựa, cần được nghiên cứu và đánh giá. Các viên nang chứa chất phục hồi cũng phải tuân theo các yêu cầu về khả năng chịu nhiệt và độ bền của vỏ, chúng cần thiết phải duy trì tính toàn vẹn ở giai đoạn chuẩn bị và ép tạo hình hỗn hợp vì nhiệt độ yêu cầu ở quá trình này thường từ 140 đến 185 °C.

Để chế tạo các viên nang siêu nhỏ có chứa chất phục hồi cho bê tông nhựa có thể áp dụng nhiều công nghệ khác nhau (bao gồm sự khác nhau về thành phần ban đầu, độ phức tạp của quy trình công nghệ và tính chất của sản phẩm). Sử dụng công nghệ đông tụ hai giai đoạn được sử dụng để sản xuất các viên nang siêu nhỏ dựa trên hợp chất metanol-melamine formaldehyde được biến tính từ metanol nhưng công nghệ này không an toàn về mặt môi trường [16]. Theo nghiên cứu [17] đã xem xét các phương pháp sản xuất vỏ viên nang cho chất phục hồi được nhũ hóa trong nước từ xenlulo và polymer. Còn theo công trình nghiên cứu [18] đã đề xuất một công nghệ nhiều giai đoạn để bao bọc chất phục hồi, trong đó chất phục hồi được nhũ hóa trong nước và phủ một lớp vỏ urê - formaldehyde.

Phương pháp công nghệ đơn giản nhất để thu được viên



Hình 3: Sự phụ thuộc của phân bố nhiệt độ theo chiều dọc vào thời gian gia nhiệt cảm ứng [15]



Hình 2: Động học của sự thay đổi tải trọng lớn nhất [14]

nang siêu nhỏ chứa chất phục hồi đã được đề xuất theo nguyên tắc như sau: ở tốc độ khuấy không đổi, natri alginate ($C_6H_7O_6Na$) và chất phục hồi lần lượt được thêm vào nước. Sử dụng phễu nhỏ giọt, hỗn dịch thu được sẽ được chia thành các viên nang riêng lẻ thông qua dung dịch canxi clorua. Sau khi lọc, viên nang được sấy khô ở 40°C [19]. Tác giả của tất cả các tài liệu được đánh giá đều sử dụng chất trẻ hóa dưới dạng dầu hữu cơ có trọng lượng phân tử khác nhau làm chất phục hồi. Tuy nhiên, cơ chế hoạt động của chất phục hồi này trong bê tông nhựa là hòa tan các thành phần bitum bị kém chất lượng trong quá trình vận hành và giảm độ giòn cục bộ.

Kết quả của quá trình tự phục hồi là sự phục hồi tính toàn vẹn của cấu trúc liên kết hóa lý trong hỗn hợp thông qua việc làm ướt các bề mặt vết nứt, khuếch tán giữa các bề mặt và sự phân tán ngẫu nhiên ra môi trường xung quanh của tác nhân phục hồi. Tuy nhiên, trong trường hợp chất phục hồi có nguồn gốc là chất dầu, các quá trình này không được thực hiện nên hiệu ứng hợp nhất các khuyết tật trong bitum không diễn ra mà chỉ xảy ra hiện tượng pha loãng một phần các thành phần bitum bởi chất phục hồi, giúp giảm khả năng phát triển vết nứt.

3. Một số kết quả nghiên cứu về bê tông nhựa tự phục hồi có sử dụng viên nang chứa chất biến tính

Tùy thuộc vào công nghệ áp dụng, các viên nang thu được có thể khác nhau cả về thành phần ban đầu cũng như đặc tính của viên nang thu được (kích thước, tính chất cơ lý), nhưng phải đáp ứng các yêu cầu về cường độ để đảm bảo tính toàn vẹn của chúng trong quá trình chuẩn bị hỗn hợp bê tông nhựa và ép tạo hình mẫu thí nghiệm hay trong thi công mặt đường trên thực tế.

Viên nang thu được bằng nhiều phương pháp khác nhau có thể có kích thước từ 10 μm đến 3 mm, trong đó dầu thực vật hướng dương chủ yếu được sử dụng làm chất biến tính (chất phục hồi) nhưng cũng có thể thay bằng các chất có nguồn gốc công nghiệp khác. Hàm lượng chất phục hồi trong viên nang có thể đạt đến 90-94% theo khối lượng [16, 18-25]. Thông thường, các viên nang có dạng hình cầu hoặc hình elip sẽ tạo điều kiện thuận lợi khi sử dụng chúng trong quá trình trộn với các thành phần khác của hỗn hợp bê tông nhựa, còn nếu ở dạng sợi chứa chất phục hồi có nhược điểm là cấu trúc này dễ bị phá hủy trong quá trình trộn và trong quá trình vận hành thực tế. Ngoài ra, việc sử dụng các viên nang chứa chất phục hồi sẽ làm suy giảm tính chất cơ lý của bê tông vì chúng có cường độ chịu lực nhỏ.

Thống kê cho thấy, lĩnh vực nghiên cứu tự phục hồi có số lượng lớn các phương pháp khác nhau để tổng hợp các chất phục hồi, tuy nhiên cần có những dữ liệu đầy đủ mang tính khoa học để chứng minh sự cải thiện các tính chất cơ lý của vật liệu sau khi các khuyết tật hay vết nứt được chữa lành bởi các chất phục hồi có trong vật liệu (chính là thực hiện quá trình tự phục hồi).

Chất lượng của công nghệ tự phục hồi bao gồm các đặc tính công nghệ của viên nang và đặc tính phục hồi của chất được bao bọc. Hiện tại, không có phương pháp thống nhất để theo dõi khả năng tự phục hồi của vật liệu. Điều này là do thiếu các tiêu chí mô tả khả năng của vật liệu phản ứng độc lập với các điều kiện một cách có kiểm soát và thực hiện các biện pháp để loại bỏ ảnh hưởng bất lợi đến tính chất hoặc cấu trúc của vật liệu. Tài liệu [26] đề xuất các tiêu chí chất lượng phản ánh tính hiệu quả của vật liệu có khả năng tự phục hồi: mức độ phục hồi trạng thái của cấu trúc; tốc độ phục hồi trạng thái của kết cấu; độ bền của cấu trúc được khôi phục và tính kịp thời của việc bắt đầu quá trình khôi phục. Tuy nhiên, cần có nhiều nghiên cứu thực nghiệm hơn để lựa chọn các chỉ số đặc tính mô tả từng tiêu chí chất lượng.

Phân tích các công trình nghiên cứu [20, 21, 23, 27-31] cho thấy rằng tất cả các phương pháp được đề xuất để đánh giá khả năng tự phục hồi của vật liệu đều tính toán chỉ số thay đổi tương đối của kết quả đo được:

$$HL = \frac{X_h}{X_0} \quad (3)$$

Trong đó: X_0 và X_h lần lượt là kết quả về tính chất của vật liệu trước và sau khi tự phục hồi.

Chỉ số này, theo tài liệu [26], có thể được phân loại thành các chỉ số phản ánh tiêu chí về mức độ phục hồi trạng thái của kết cấu, nên chưa đủ để đánh giá khách quan tính hiệu quả của các giải pháp công nghệ đến quá trình tự phục hồi. Mặt khác, trong các trường hợp theo tài liệu [20, 21, 23, 27-31], tác giả xác định các chỉ số thuộc tính đặc trưng cho trạng thái hoạt động của vật liệu khi khiếm khuyết về cấu trúc ở mức độ nghiêm trọng, thậm chí cấu trúc bị phá hủy. Tuy nhiên, trong kết cấu đường, việc bắt đầu quá trình tự phục hồi trong vật liệu bê tông nhựa phải xảy ra ở giai đoạn trước khi kết cấu bị phá hủy. Việc thiếu một hệ thống đánh giá thống nhất không cho phép chúng ta so sánh một cách khách quan hiệu quả của các giải pháp công nghệ khác nhau để sản xuất viên nang siêu nhỏ có chứa chất phục hồi, cũng như đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố công nghệ đến quá trình tự phục hồi.

Có thể nhận thấy rằng, chỉ số HL này không tính đến hai yếu tố: độ bền còn lại, (được xác định bởi các liên kết không bị phá vỡ do kết quả thử nghiệm) và khả năng phục hồi của chính chất kết dính. Vì vậy, cách tiếp cận chính xác hơn để đánh giá hiệu quả phục hồi là tính đến sự thay đổi độ bền bị suy giảm của bê tông nhựa khi sử dụng viên nang có chứa chất phục hồi. Với mục đích này, hệ số phục hồi đã được đề

xuất sử dụng theo công thức sau [32] :

$$k_h = \frac{IR'}{IR} \quad (4)$$

Trong đó:

$IR' = 1 - R'_h/R'_0$: chỉ số suy giảm cường độ của bê tông nhựa không có viên nang;

$IR = 1 - R^h/R_0$: chỉ số suy giảm cường độ của bê tông nhựa có sử dụng viên nang;

R'_0 và R_0 : cường độ nén của bê tông nhựa trước khi phục hồi khi không có và có sử dụng viên nang, MPa;

R'_h và R_h : cường độ nén của bê tông nhựa sau khi phục hồi khi không có và có chất sử dụng viên nang, MPa.

Khi nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng viên nang chứa chất phục hồi đến khả năng tự phục hồi của bê tông nhựa thông qua hệ số phục hồi - kh cho thấy, hàm lượng viên nang sử dụng cho khả năng tự phục hồi tối ưu là 3% so với lượng dùng bitum có trong hỗn hợp bê tông đã nghiên cứu và hệ số tự phục hồi có thể đạt đến 1,93 [32].

4. Kết luận

Vật liệu tự phục hồi bao gồm những vật liệu có khả năng tự phục hồi mà không cần nguồn năng lượng bổ sung bất buộc mang tính chủ động, các quá trình bắt đầu một cách độc lập để khôi phục trạng thái của kết cấu và có tốc độ phục hồi vượt quá tốc độ hình thành các khuyết tật. Các giải pháp công nghệ, kỹ thuật hiện tại có thể chế tạo được các viên nang chứa chất biến tính (chất phục hồi) lên tới 90-94% theo khối lượng. Công nghệ tự phục hồi cho bê tông nhựa có thể thực hiện được thông qua việc sử dụng nhiều loại chất biến tính (chất phục hồi) được đóng gói khác nhau, có thể thúc đẩy quá trình phục hồi bằng cách tăng cường khả năng phục hồi của chất kết dính thông qua tác dụng phục hồi tính kết dính hoặc bằng cách tạo ra các liên kết kết dính mới trong quá trình chuyển đổi chất phục hồi. Phân tích tài liệu khoa học và kỹ thuật cho thấy sự quan tâm ngày càng tăng của các nhà khoa học đối với nghiên cứu trong lĩnh vực công nghệ vật liệu tự phục hồi, cũng như những thành công nhất định đã đạt được theo hướng nghiên cứu này.

Từ kết quả phân tích và nghiên cứu ở trên, nhận thấy rằng, cần phải có các nghiên cứu khoa học nhằm cải tiến không chỉ về yếu tố công nghệ và vật liệu để có thể chế tạo được các viên nang có độ bền thích hợp, chứa hàm lượng chất phục hồi tối ưu mà còn phải phát triển các phương pháp đánh giá về hiệu quả của các giải pháp áp dụng, phản ánh mức độ của sự thay đổi về khiếm khuyết của cấu trúc, tốc độ thay đổi trong quá trình tự phục hồi và động học của việc hình thành các khuyết tật trong cấu trúc sau quá trình tự phục hồi một cách toàn diện nhất. Điều quan trọng là cần thiết lập một chỉ số định lượng phản ánh mức độ khiếm khuyết mà việc bắt đầu tự phục hồi cho phép đạt được hiệu quả tối đa là một trong những nhiệm vụ chính trong lĩnh vực công nghệ tự phục hồi, từ đó sớm có những nghiên cứu về ứng dụng trên thực tế./.

Tài liệu tham khảo

1. L. Bengisu M., Ferrara M. *Designing with kinetic materials. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology*. 2018; 65-80.
2. Shahinpoor M., Schneider H.-J. *Intelligent Materials*. Royal Society of Chemistry. 2007.
3. Ghosh S.K. *Self-healing materials: fundamentals, design strategies, and applications. SelfHealing Materials*. Weinheim, Wiley. 2009; 1-28.
4. Korolev E.V., Bazhenov Yu.M., Al'bakasov A.I. *Radiation-protective and chemically resistant sulfur building materials*. Orenburg, Orenburg State University. 2010; 364.
5. Zhuang X., Zhou S. *The prediction of self-healing capacity of bacteria-based concrete using machine learning approaches. Computers, Materials & Continua*. 2019; 57-77.
6. De Belie N., Wang J. *Bacteria-based repair and self-healing of concrete. Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. 2016; 35-56.

7. Иноземцев С.С., Королев Е.В. Агрессивность эксплуатационных условий дорожно-климатических зон России. *Наука и техника в дорожной отрасли*. 2019; 22-26.
8. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Increasing the weathering resistance of asphalt by nanomodification. *Materials Science Forum*. 2019; 147-157.
9. Шеховцова С.Ю., Королев Е.В. Обзор современного опыта использования реюнивателей для реверсинга асфальтобетонных покрытий. *Региональная архитектура и строительство*. 2018; 5-16.
10. Zaujanis M., Mallick R.B., Poulikakos L., Frank R. Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*. 2014; 538-550.
11. Shen J., Amirhanian S., Miller J.A. Effects of rejuvenating agents on superpave mixtures containing reclaimed asphalt pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2007; 376-384.
12. Tang J., Liu Q., Wu Sh., Ye Q., Sun Y., Schlangen E. Investigation of the optimal self-healing temperatures and healing time of asphalt binders. *Construction and Building Materials*. 2016; 1029-1033.
13. Liu Q., Schlangen E., van de Ven M., Garcia A. Induction heating of electrically conductive porous asphalt concrete. *Construction and Building Materials*. 2010; 1207-1213.
14. Liu Q., Schlangen E., van de Ven M. Induction healing of porous asphalt concrete beams on an elastic foundation. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2013; 880-885.
15. Xu Sh., Garcia A., Su J., Liu Q., Tabaković A., Schlangen E. Self-healing asphalt review: from idea to practice. *Advanced Materials Interfaces*. 2018.
16. Su J.F., Wang Y.Y., Han N.X., Yang P., Han S. Experimental investigation and mechanism analysis of novel multi-self-healing behaviors of bitumen using microcapsules containing rejuvenator. *Construction and Building Material*. 2016; 317-329.
17. Barrasa R.C., López V.B., Montoliu C.M., Ibáñez V.C., Pedrajas J., Santarén J. Addressing durability of asphalt concrete by self-healing mechanism. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2014; 188-197.
18. Xue B., Wang H., Pei J., Li R., Zhang J., Fan Z. Study on self-healing microcapsule containing rejuvenator for asphalt. *Construction and Building Materials*. 2017; 641-649.
19. Al-Mansoori T., Micaeloab R., Artamendi I., Norambuena-Contreras J., Garcia A. Microcapsules for self-healing of asphalt mixture without compromising mechanical performance. *Construction and Building Materials*. 2017; 1091-1100.
20. Xu S., Tabaković A., Liua X., Schlangen E. Calcium alginate capsules encapsulating rejuvenator as healing system for asphalt mastic. *Construction and Building Materials*. 2018; 379-387.
21. Al-Mansoori T., Norambuena-Contreras J. Effect of capsule addition and healing temperature on the self-healing potential of asphalt mixtures. *Materials and Structures*. 2018.
22. Prajer M., Wu X., Garcia S.J., van der Zwaag S. Direct and indirect observation of multiple local healing events in successively loaded fibre reinforced polymer model composites using healing agent-filled compartmented fibres. *Composites Science and Technology*. 2015; 127-133.
23. Tabakovic A., Dirk B., van Gerwen M., Copuroglu O., Post W., Garcia S.J. et al. The compartmented alginate fibres optimisation for bitumen rejuvenator encapsulation. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2017; 347-359.
24. Xu S., Tabakovic A., Liu X., Palin D., Schlangen E. Optimization of the calcium alginate capsules for self-healing asphalt. *Applied Sciences*. 2019.
25. Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Technological features of production calcium-alginate microcapsules for self-healing asphalt. *MATEC Web of Conferences*. 2018.
26. Inozemtcev S., Korolev E. Indicators of the effectiveness of self-healing asphalt concrete. *E3S Web of Conferences*. 2019.
27. Al-Mansoori T., Norambuena-Contreras J., Micaelo R., Garcia A. Self-healing of asphalt mastic by the action of polymeric capsules containing rejuvenators. *Construction and Building Materials*. 2018; 330-339.
28. Norambuena-Contreras J., Liu Q., Zhang L., Wu S., Yalcin E., Garcia A. Influence of encapsulated sunflower oil on the mechanical and self-healing properties of dense-graded asphalt mixtures. *Materials and Structures*. 2019.
29. Xu S., Liu X., Tabaković A., Schlangen E. Investigation of the potential use of calcium alginate capsules for self-healing in porous asphalt concrete. *Materials*. 2019; 168.
30. Tabaković A., Schuyffel L., Karač A., Schlangen E. An evaluation of the efficiency of compartmented alginate fibres encapsulating a rejuvenator as an asphalt pavement healing system. *Applied Sciences*. 2017; 647.
31. Shu B., Bao S., Wu S., Dong L., Li C., Yang X. et al. Synthesis and effect of encapsulating rejuvenator fiber on the performance of asphalt mixture. *Materials*. 2019; 1266.
32. Do T.T., Inozemtcev S.S., Korolev E.V. Method for assessing the effect of self-healing of asphalt concrete with encapsulated modifier. *Journal of Physics: Conference Series: Advanced Trends in Civil Engineering 2021 (ATCE 2021)*. 2021; 2124. 012006.