

# TỔNG QUAN VỀ TẤN CÔNG SUN-PHÁT BÊN NGOÀI ĐỐI VỚI BÊ TÔNG

## A REVIEW OF EXTERNAL SULPHATE ATTACKS ON CONCRETE

Nguyễn Văn Hương

Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng; nvhuongtldud@gmail.com

**Tóm tắt** - Sự hư hỏng của bê tông do tấn công sun-phát là một trong những vấn đề nghiêm trọng ảnh hưởng xấu đến độ bền của công trình bê tông. Tấn công sun-phát là một quá trình hóa - lý rất phức tạp. Tùy thuộc vào nguồn gốc của ion sun-phát, tấn công của sun-phát có thể được chia thành hai nhóm: tấn công sun-phát bên trong và tấn công sun-phát bên ngoài. Tấn công sun-phát dẫn đến sự biến đổi các sản phẩm hydrat của xi măng thành ettringite, thạch cao và các dạng khác, và nó cũng dẫn đến sự mất ổn định cường độ và sự dính kết do một phần lớn gen C-S-H bị phá hủy. Trên cơ sở phân tích các kết quả nghiên cứu của thế giới, bài báo này sẽ trình bày tổng quan về tấn công sun-phát bên ngoài đối với bê tông và kiến nghị các giải pháp phòng ngừa đối với các công trình bê tông có nguy cơ bị tấn công sun-phát bên ngoài.

**Từ khóa** - bê tông; ettringite; sun-phát bên ngoài; tấn công sun-phát; giãn nở.

### 1. Đặt vấn đề

Bê tông là vật liệu được dùng rộng rãi cho các công trình xây dựng trên thế giới, nó có mặt gần như hầu hết các bộ phận của công trình hạ tầng xây dựng: móng, tường chắn, sàn, trụ cầu, cầu tàu, cừ, đập bê tông,... Các bộ phận này có thể tồn tại trong môi trường có chứa sun-phát và/ hoặc bản thân chúng sẵn chứa sun-phát, do đó nó tiềm ẩn nguy cơ giảm độ bền, thậm chí bị phá hoại do bị tấn công sun-phát.

Tấn công sun-phát là một quá trình phức tạp, sự hiểu biết về nó chưa thật trọn vẹn. Thật vậy, năm 1994, trong nghiên cứu của mình, Dupuy [6] cho rằng: “Mặc dù tấn công sun-phát đã được nghiên cứu một cách rộng rãi, nhưng những hiểu biết về nó thật chưa đầy đủ”. Mười năm sau, nhận định này cũng đã nhận được sự tán đồng của Neville [8], ngoài ra Neville cũng đưa ra kết luận: “Phần lớn các nghiên cứu được thực hiện trong các phòng thí nghiệm, các nghiên cứu trên công trình thực tế vẫn còn hạn chế”. Bởi do tính phức tạp, nên vẫn chưa có sự thống nhất về định nghĩa tấn công sun-phát về phương diện độ bền của vật liệu bê tông [16]. Cụ thể, các nhà nghiên cứu còn tranh luận về các vấn đề: Có nên tách biệt tấn công sun-phát thành tấn công sun-phát lý học (physical sulfate attack) và tấn công sun-phát hóa học (chemical sulfate attack) hoặc thuật ngữ tấn công sun-phát được ngầm hiểu là tấn công sun-phát hóa học, còn tấn công sun-phát lý học được gộp vào tấn công vật lý chung (physical attack) đối với bê tông?

Bài báo này đồng tình với quan điểm của Neville [8], Skalny cùng các cộng sự [16] và Collepardi [5], rằng: *Tấn công sun-phát (sulfate attack) là thuật ngữ dùng để mô tả một chuỗi các phản ứng hóa học giữa các ion sun-phát và các thành phần của bê tông (chủ yếu là hồ xi măng) do bê tông có chứa sun-phát hoặc/ và tồn tại trong môi trường sun-phát trong điều kiện ẩm gây ra sự hư hỏng cho bê tông.*

Tùy thuộc vào nguồn gốc của sun-phát, sự tấn công của

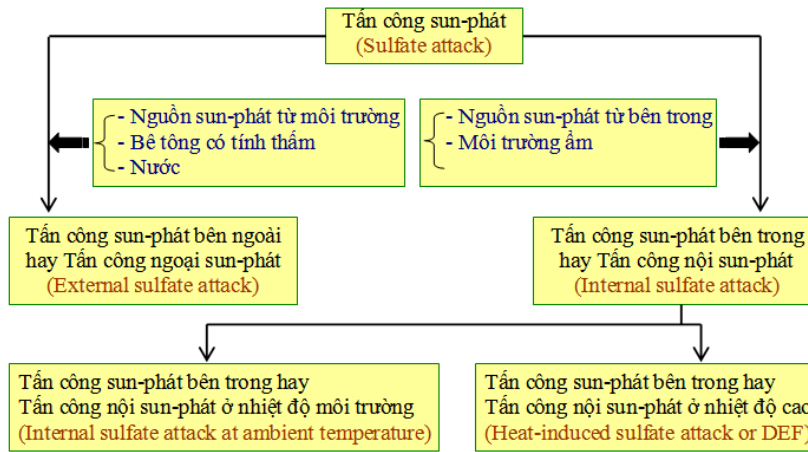
**Abstract** - Concrete damage due to sulfate attack is one of the serious problems that have bad effects on the durability of a concrete structure. Sulfate attack is a very complex physicochemical process. Depending on the source of sulfate ions, sulfate attack can be divided into two groups: internal sulfate attack and external sulfate attack. The sulfate attack leads to the conversion of the hydration products of cement into ettringite, gypsum and others forms; this also results in the destabilization of the strength and adhesion due to the destruction of a significant part of C-S-H gel. Based on an analysis of the research results in the world, this paper is to present a review of the sulfate external attack on concrete and suggest preventive solutions for concrete structures that are at risk of external sulfate attack.

**Key words** - concrete; ettringite; external sulfate; sulfate attack; expansion.

sun-phát đối với bê tông được chia thành hai nhóm: tấn công ngoài sun-phát hay tấn công sun-phát bên ngoài (external sulfate attack) và tấn công nội sun-phát hay tấn công sun-phát bên trong (internal sulfate attack). Tấn công sun-phát bên ngoài gây ra do bê tông tiếp xúc với sun-phát tồn tại trong môi trường bên ngoài (đất, nước ngầm, nước biển, nước thải, không khí,...) và gây ra sự phá hoại bê tông từ bên ngoài vào bên trong [1, 8, 16]; Tấn công sun-phát bên trong gây ra do nguồn sun-phát đến từ các thành phần của bê tông (xi măng, cốt liệu, nước trộn, phụ gia) và gây ra sự phá hoại trong toàn bộ khối bê tông [9-12, 17]. Trường hợp tấn công sun-phát bên trong tùy theo điều kiện môi trường, được chia thành hai loại [12, 16]: Tấn công sun-phát bên trong ở nhiệt độ môi trường hay tấn công nội sun-phát ở nhiệt độ môi trường (internal sulfate attack at ambient temperature), do hoạt động của sun-phát trong bê tông cứng khi nó chứa một hàm lượng sun-phát (xi măng, phụ gia, nước, cốt liệu) cao hoặc do hoạt động của các hợp chất hóa học khác của lưu huỳnh chứa trong cốt liệu [2, 4, 12, 14, 16]; Tấn công sun-phát bên trong do nhiệt hay tấn công nội sun-phát do nhiệt (heat-induced sulfate attack), loại tấn công này được ám chỉ bởi sự hình thành ettringite gián đoạn (delayed ettringite formation) [9-13, 16, 17]. Tổng quan về các dạng tấn công sun-phát được thể hiện ở sơ đồ Hình 1.

### 2. Các dạng tấn công sun-phát bên ngoài

Tấn công sun-phát bên ngoài được xem là loại tấn công sun-phát cổ điển so với tấn công sun-phát bên trong. Hầu hết các loại sun-phát đều tan trong nước và tác động xấu đến bê tông dùng xi măng pooc lăng, ngoại trừ BaSO<sub>4</sub> (bởi nó gần như không tan trong nước). Trong trường hợp tấn công sun-phát bên ngoài, nguồn sun-phát thường gặp nhất là các loại muối sun-phát của can-xi, ma-giê, na-tri, ka-li, a-mô-ni... tồn tại trong đất hay tan trong nước ngầm, nước biển; tiếp đến là rác thải công nghiệp, nước thải nông - công nghiệp; sau cùng là sun-phát có nguồn gốc từ không khí ô nhiễm.



Hình 1. Tổng quan các dạng tấn công của sun - phát

Tấn công sun-phát bên ngoài chỉ xảy ra khi kết cấu bê tông hội đủ ba điều kiện [5]: (1) Bê tông có tính thấm; (2) Bê tông tồn tại trong môi trường chứa sun-phát với nồng độ nhất định; (3) Sự hiện diện của nước. Nếu khuyết một trong ba điều kiện trên thì sự tấn công sun-phát bên ngoài không xảy ra, ví dụ với bê tông có lỗ rỗng và/ hay có vết nứt nhỏ (có khả năng thấm nước) tồn tại trong môi trường đất khô có chứa sun-phát sẽ không gây ra tấn công sun-phát bên ngoài (do thiếu nước nên sun-phát không thể di chuyển vào bên trong bê tông). Tùy thuộc vào cơ chế tương tác giữa sun-phát với sản phẩm hydrat của xi măng và điều kiện môi trường, sự hư hỏng của bê tông do tấn công sun-phát bên ngoài có thể theo các quá trình phổ biến sau:

### 2.1. Tấn công bởi muối sun-phát

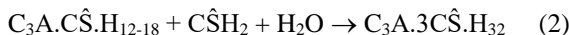
Quá trình này có thể xảy ra đối với tất cả các loại muối sun-phát ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,...), ngoại trừ  $\text{MgSO}_4$ .

- Ban đầu, sun-phát tấn công  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  và gen C-S-H (C:  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ , H:  $\text{H}_2\text{O}$ ) để hình thành thạch cao  $\text{C}_3\text{SH}_2$  ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ):



Nguồn ion  $\text{Ca}^{2+}$  cung cấp cho quá trình (1) từ sự tan của  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  hay sự mất can-xi (decalcification) từ gen C-S-H. Quá trình này có thể gây ra sự giãn nở do hình thành thạch cao trong lỗ rỗng của hồ xi măng đã đông cứng dẫn đến sự giảm cường độ, giảm tính dính kết do giảm tỷ số C/S trong gen C-S-H [7].

- Sau đó, sự tấn công sun-phát được biểu hiện bằng sự hình thành ettringite  $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{C}_3\text{S} \cdot \text{H}_{32}$  ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) do thạch cao tác dụng với mônôsunphát ( $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{C}_3\text{S} \cdot \text{H}_{12-18}$ ) [16]:

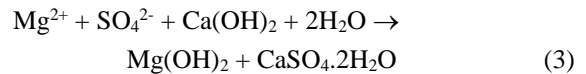


Ngoài ra, thạch cao cũng có thể tác dụng với celit ( $\text{C}_3\text{A}$ ) chưa thủy hóa của xi măng hình thành ettringite gây giãn nở, tuy nhiên trường hợp này hiếm khi xảy ra [12, 16]. Do đó, sự hình thành ettringite chủ yếu theo phương trình (2) khi bê tông đã đông cứng, đây là nguyên nhân chính làm cho bê tông bị giãn nở và có thể dẫn đến nứt nẻ, vỡ vụn [5, 16]. Lưu ý, đối với trường hợp nguồn ngoại sun-phát là  $\text{CaSO}_4$  thì sự tấn công sun-phát xảy ra trực tiếp theo phương trình (2).

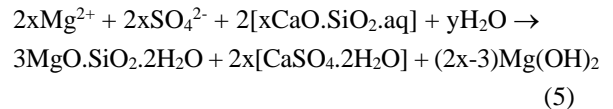
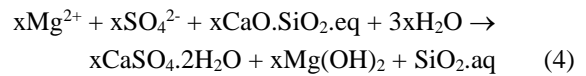
### 2.2. Tấn công Sun-phát bên ngoài bởi $\text{MgSO}_4$

$\text{MgSO}_4$  là một loại muối sun-phát, nhưng cơ chế tấn công và phá hoại hoàn toàn khác với các muối sun-phát khác (nêu

ở phần 2.1). Quá trình tấn công sun-phát do  $\text{MgSO}_4$  bắt đầu bởi sự tác dụng với  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  của hồ xi măng để hình thành brucite ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) và thạch cao [7, 16]:



Song song và nối tiếp là sự mất can-xi từ gen C-S-H, tạo thành silica vô định hình ngâm nước ( $\text{SiO}_2 \cdot \text{aq}$ ) và/ hay tinh thể serpentine kém bền ( $3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) [7, 16]:

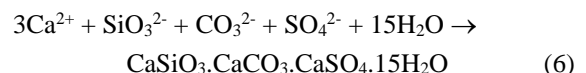


Sự mất can-xi của gen C-S-H là nguyên nhân chủ yếu dẫn đến sự mất cường độ, giảm tính dính kết và có thể dẫn đến phá hoại bê tông. Sự tấn công do dung dịch của  $\text{MgSO}_4$  là mãnh liệt hơn các loại muối sun-phát khác. Nguyên nhân là do  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  có tính tan rất thấp, do đó độ pH trong dung dịch lỗ rỗng giảm nhỏ dẫn đến gen C-S-H khó ổn định. Vì vậy, sau khi  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  bị tiêu thụ theo (4) làm cho độ pH giảm đến giá trị giới hạn thì sự mất can-xi trong gen C-S-H xảy ra nhằm đảm bảo độ cân bằng pH trong dung dịch lỗ rỗng. Tuy nhiên,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  vừa tạo thành ngay lập tức tác dụng với  $\text{MgSO}_4$  để hình thành  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  và  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  cho đến khi không còn  $\text{MgSO}_4$ . Do đó, quá trình này có thể dẫn đến sự phá hoại hoàn toàn gen C-S-H.

Sự tấn công của dung dịch  $\text{MgSO}_4$  đối với bê tông được mô tả bằng sự di chuyển của ion  $\text{OH}^-$  đến bề mặt để hình thành  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  và sự di chuyển của ion  $\text{SO}_4^{2-}$  vào bên trong để hình thành thạch cao và vùng sâu hơn hình thành một lượng nhỏ ettringite.

### 2.3. Tấn công sun-phát bởi sự hình thành thaumasite (TSA)

Sự hình thành khoáng thaumasite ( $\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ ) là một dạng của tấn công sun-phát bên ngoài (thaumasite sulfate attack, viết tắt là TSA). Khoáng thaumasite có thể hình thành khi sun-phát tấn công gen C-S-H và  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  với sự có mặt của các-bô-nát ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) trong điều kiện nhiệt độ thấp ( $<15^\circ\text{C}$ ) [3] và độ pH  $>10.5$  [18]:

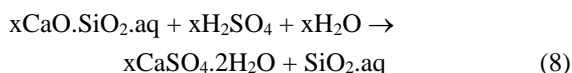


Nguồn sun-phát cung cấp cho phản ứng (6) có thể là bên trong hay/ và bên ngoài, tuy nhiên phần lớn TSA xảy ra trong thực tế là do nguồn sun-phát bên ngoài [16]. Cũng giống như ion  $\text{SO}_4^{2-}$ , nguồn các-bô-nát bên trong có thể cung cấp bởi xi măng, phụ gia hay cốt liệu và/ hay nguồn các-bô-nát bên ngoài cung cấp bởi  $\text{CO}_2$  trong không khí hay  $\text{CO}_3^{2-}$  trong nước ngầm, nước mặt, nước biển [15]. Các ion  $\text{SiO}_3^{2-}$  được cung cấp từ gen C-S-H và đây là nguyên nhân chính dẫn đến giảm khả năng dính kết và giảm cường độ của vật liệu bê tông. Đối với các trường hợp nghiêm trọng, hồ xi măng (C-S-H và  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) bị phá hủy hoàn toàn và thay thế bằng thaumasite dạng sệt, màu trắng, không có tính kết dính làm cho công trình bê tông bị phá hủy.

#### 2.4. Tấn công sun-phát bởi $\text{H}_2\text{SO}_4$

Nguồn  $\text{H}_2\text{SO}_4$  có thể gây ra tấn công sun-phát bên ngoài đối với bê tông có thể đến từ: axit sun-phu-ric tự do tồn tại trong nước ngầm (hình thành từ sự oxy hóa các loại sulfide, chủ yếu là  $\text{FeS}_2$  tồn tại trong đất với sự hiện diện của oxy trong điều kiện ẩm);  $\text{H}_2\text{SO}_4$  tồn tại trong nước thải công nghiệp;  $\text{H}_2\text{SO}_4$  hình thành từ nước cống thải;  $\text{H}_2\text{SO}_4$  cũng có thể tồn tại trong nước mưa.

Ban đầu,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  tấn công  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  để hình thành thạch cao theo phản ứng (7), tiếp theo hoặc đồng thời  $\text{H}_2\text{SO}_4$  tấn công gen C-S-H tạo thành silica vô định hình ngâm nước và thạch cao theo phản ứng (8):



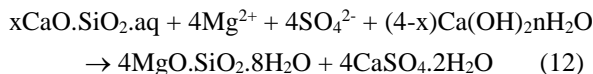
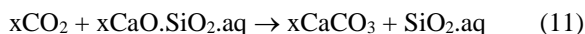
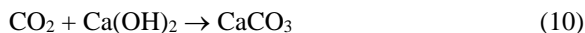
Sự có mặt và tấn công của  $\text{H}_2\text{SO}_4$  làm cho độ pH giảm, dẫn đến các sản phẩm hydrat của xi măng như Afm và AFt mất ổn định và có thể biến đổi thành  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  và  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ . Tuy nhiên, ở sâu bên trong, nơi độ pH còn được

duy trì và thạch cao (sinh ra trước đó) di chuyển đến nên một lượng nhỏ ettringite có thể được hình thành [16]. Quá trình tấn công sun-phát do  $\text{H}_2\text{SO}_4$  theo các phản ứng (7) và (8) làm phá hủy sâu các sản phẩm hydrat của xi măng, dẫn đến sự mất cường độ của bê tông. Mặt khác, nếu kết cấu bê tông bị tấn công bởi  $\text{H}_2\text{SO}_4$  tồn tại trong môi trường có dòng chảy thì các sản phẩm sinh ra do quá trình tấn công trên (đặc biệt là các muối kiềm sun-phát và muối nhôm sun-phát, ở mức độ thấp hơn là muối can-xi sun-phát) sẽ bị dịch chuyển ra bề mặt tự do và rửa trôi. Nghiêm trọng hơn, nếu bê tông sử dụng cốt liệu như đá vôi, đá đolômit, đá magnesite,... thì loại cốt liệu này cũng xảy ra quá trình phá hủy cùng với hồ xi măng.

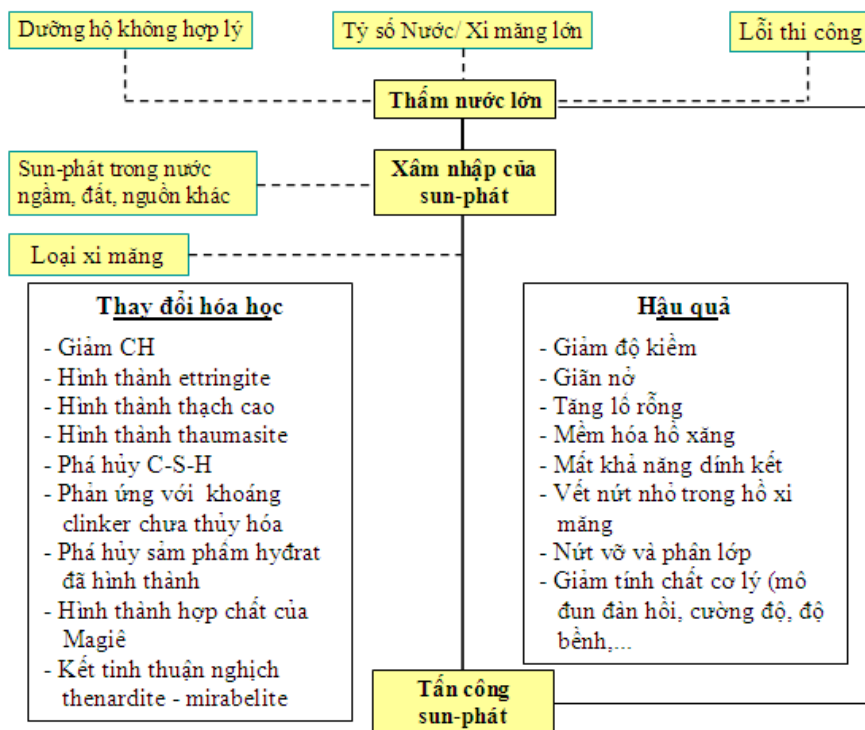
#### 2.5. Tấn công sun-phát bởi nước biển

Nước biển chứa các ion chính là:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$  và  $\text{SO}_4^{2-}$ , cùng với các ion khác có nồng độ nhỏ hơn như:  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  và  $\text{Br}^-$ . Sự tấn công của nước biển là kết quả của sự tương tác đồng thời của một số ion kể trên với bê tông ở các mức độ khác nhau.

Kết quả của sự tấn công hóa học của nước biển đối với bê tông là tạo thành  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{SiO}_2 \cdot \text{aq}$ ,  $4\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , ettringite theo các phản ứng:



Tác nhân chính dẫn đến sự mềm hóa của hồ xi măng và giảm cường độ của bê tông trong môi trường biển chính là sự phá hủy gen C-S-H theo phản ứng (11), (12) và hình thành tinh thể  $4\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  kém bền.



Hình 2. Sơ đồ thể hiện tổng quát cơ chế tấn công sun-phát bên ngoài [16]

Từ cách phân loại như trên, bài báo này đưa ra kết luận: Tấn công sun-phát bên ngoài là sự tương tác giữa nguồn sun-phát bên ngoài với sản phẩm hydrat của xi măng trong bê tông đã đông cứng, gây ra sự thay đổi về hóa học các sản phẩm hydrat của xi măng, hậu quả dẫn đến sự giãn nở, mất tính dính kết, giảm cường độ, tăng độ rỗng, vỡ bề mặt hay tách lớp, thậm chí phá hoại hoàn toàn kết cấu bê tông. Hai đặc điểm chính dẫn đến sự hư hỏng bê tông do tấn công sun-phát bên ngoài là: (1) Sự hình thành thạch cao và ettringite khi bê tông đã đông cứng (secondary ettringite) gây ra giãn nở (2) và/ hoặc phá hủy gen C-S-H (nhân tố chính góp phần hình thành cường độ bê tông). Bức tranh toàn cảnh về tấn công sun-phát bên ngoài đối với bê tông được thể hiện bằng sơ đồ Hình 2.

### 3. Giải pháp phòng ngừa

Hậu quả do tấn công sun-phát bên ngoài đối với công trình bê tông là rất nghiêm trọng và phức tạp. Khi đã xảy ra thì rất khó thậm chí không thể sửa chữa và rất tốn kém. Do đó, trong thiết kế đối với các công trình sử dụng bê tông có nguy cơ bị tấn công ngoại sun-phát thì cách tốt nhất là tìm giải pháp phòng ngừa từ khi thiết kế cấp phối cho bê tông. Xuất phát từ cơ chế tấn công sun-phát bên ngoài, một số giải pháp phòng ngừa được đề nghị sau đây:

- Dùng bê tông có tính chống thấm cao hoặc dùng lớp chống thấm bề mặt (coating or hydrophobizing), tuy nhiên giải pháp này thường có giá thành cao;

- Đối với trường hợp công trình tiếp xúc với môi trường có nồng độ sun-phát thấp, có thể dùng xi măng bèn sun-phát type II (xi măng có hàm lượng  $C_3A < 8\%$  theo tiêu chuẩn ASTM C150); Đối với môi trường có nồng độ sun-phát cao, có thể dùng xi măng bèn sun-phát type V (xi măng có hàm lượng  $C_3A < 5\%$  và  $C_3A + C_4AF < 25\%$  theo tiêu chuẩn ASTM C150) [1];

- Dùng hỗn hợp chất kết dính của xi măng pooc lăng với các loại phụ gia khoáng hoạt tính pu-zô-lan-nic (muối silic, métakaolan, tro trấu, tro bay,...) với hàm lượng phù hợp có tác dụng tương đương thậm chí tốt hơn xi măng bèn sun-phát type V. Trong điều kiện môi trường khắc nghiệt, cần phải dùng xi măng bèn sun-phát type V kết hợp với phụ gia khoáng có hoạt tính pu-zô-lan-nic cao.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] ACI, Guide to Durable Concrete, *American Concrete Institutes*,

Farmington, 2008, 53p.

- [2] Araújo G.S., Chinchón S., Aguado A., Evaluation of the behavior of concrete gravity dams suffering from internal sulfate attack, *IBRACON Structures and Materials Journal*, 2008, Vol 1(1), p.84-112.
- [3] Blanco-Varela M.T., Aguilera J., Martínez-Ramírez S., Effect of cement C3A content, temperature and storage medium on thaumasite formation in carbonated mortarsOriginal, *Cement and Concrete research*, 2006, Vol 36, p.707-715.
- [4] Casanova I., Agullo L., Aguado A., Aggregate expansivity due to sulfide oxidation - I. Reaction system and rate model, *Cement & Concrete Research*, 1996, Vol 26(1), p.993-998.
- [5] Collepardi M., A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete, *Cement & Concrete Composites*, 2003, Vol 25, p.401-407.
- [6] Depuy G.W., Chemical resistance of concrete. *Concrete and Concrete-Making Material*, ASTM STP 169C, Philadelphia, PA, 1994, p.263-281
- [7] Gollop R.S., Taylor H.F.W., Microstructural and microanalytical studies of sulfate attack III. Sulfate-resisting portland cement: Reactions with sodium and magnesium sulfate solutions, *Cement and Concrete research*, 1995, Vol 25, p.1581-1590.
- [8] Neville A., The confused word of sulfate attack on concrete, *Cement and Concrete research*, 2004, Vol 34, p.1275-1296.
- [9] NGUYEN Van Huong, Effets d'additions minérales sur l'apparition de la Réaction Sulfatique Interne: étude paramétrique, développement et optimisation de méthodes accélérées, *Thèse de Doctorat*, Université de Nantes, Loire-Atlantique, France, 2013.
- [10] NGUYEN Van Huong, Leklou N., Aubert J.E., Mounanga P., The effect of natural pozzolan on delayed ettringite formation of the heat-cured mortars, *Construction and Building Materials*, 2013, Vol 48, p.479-484.
- [11] Nguyễn Văn Hương, Nghiên cứu ứng sử của vữa xi măng trong quá trình hình thành ettringite gián đoạn, *Hội thảo hạ tầng giao thông Việt Nam với phát triển bền vững TISDV - NXB Xây dựng*, 2013, p.279-286.
- [12] Nguyễn Văn Hương, Bài học từ những công trình bê tông khối lớn hư hỏng do tấn công nội sun-phát, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Đại học Đà Nẵng*, 2014, số 78, p.43-48.
- [13] Recharadson M. G., *Fundamentals of Durable Reinforced Concrete*, Taylor & Francis Group, London and New York, 2004, 273p.
- [14] Shayan A., Deterioration of a concrete surface due to the oxidation of pyrite contained in pyritic aggregates, *Cement & Concrete Research*, 1988, Vol 18(5), p.723-730.
- [15] Shi C., Wang D., Behnood A., Review of Thaumasite Sulfate Attack on Cement Mortar and Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2012, Vol 24, p.1450-1460.
- [16] Skalny J., Marchand J., Odler I., Sulfate Attack on Concrete, *Taylor & Francis Group*, London and New York, 2003, 230p.
- [17] Taylor H.F.W., Famy C., Scrivener K.L., Delayed ettringite formation, *Cement & Concrete Research*, 2001, Vol 31(5), p.683-693.
- [18] Zhou Q., Hill J., Byars E.A., Cripps J.C., Lynsdale C.J., Sharp J.H., The role of pH in thaumasite sulfate attack, *Cement and Concrete research*, 2006, Vol 36, p.160-170.

(BBT nhận bài: 29/11/2014, phản biện xong: 14/12/2015)