

**NHẬN DẠNG VÀ ĐÁNH GIÁ MÔ HÌNH ỨNG XỬ LƯU BIẾN CỦA VẬT LIỆU
COMPOZIT NỀN POLYME NHIỆT RẮN DẠNG KHỐI**
IDENTIFICATION AND VALIDATION OF A MODEL
OF BULK MOULDING COMPOUNDS (BMC) RHEOLOGICAL BEHAVIOUR

Lê Thái Hùng, Nguyễn Trọng Giảng
Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

TÓM TẮT

Bài báo trước đã trình bày các thí nghiệm và mô hình hoá ứng xử lưu biến của vật liệu composit nền polyme nhiệt rắn dạng khối (BMC - Bulk Molding Compounds). Trong bài báo này, các thông số của mô hình sẽ được nhận dạng bằng các thí nghiệm nén đơn và nén với biến dạng phẳng. Để đánh giá độ tương hợp, mô hình đã được áp dụng cho mô phỏng số quá trình điền đầy của BMC trong khuôn. Đặc biệt, đã sử dụng khuôn với vật cản để xem xét sự phức tạp của dòng chảy với các tốc độ biến dạng khác nhau. Kết quả mô phỏng số được so sánh với kết quả thí nghiệm nhận được với cùng điều kiện chảy dẻo. Kết quả tốt nhất nhận được khi giải thích cho tác động của ma sát giữa khuôn và mẫu BMC.

ABSTRACT

The previous paper deals with the tests and modeling rheological behaviour of BMC (Bulk Molding Compounds). In this paper, the material parameters of the model will be identified by simple and plane strain compression tests. For validation, this model is applied in a BMC fill process numerical simulation. Especially, a die with barricade is used for simulation to observe the complex flow situations with the different strain rates. Numerical simulation results are compared with experimental ones obtained with the same flow situations. Best results are obtained when accounting for a friction effect between the mould and the BMC sample.

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Bài báo trước đã đề cập mô hình hoá ứng xử lưu biến của vật liệu BMC thông qua việc thiết lập mối quan hệ giữa tác động cơ học và hành vi của vật liệu biến dạng. Nói một cách khác là xây dựng mối quan hệ giữa ứng suất và các biến trạng thái xác định giá trị của nó tại mỗi thời điểm quá trình biến dạng. Bài báo này, trình bày phương pháp và kết quả nhận dạng mô hình, cũng như kết quả mô phỏng số quá trình tạo hình của vật liệu BMC trong khuôn với mục đích đánh giá độ tương hợp của mô hình đề xuất.

II. NHẬN DẠNG MÔ HÌNH

2.1 Tóm tắt mô hình thuộc tính

Mô hình lưu biến của BMC [1], đã được xây dựng trên cơ sở các giả thiết sau:

- BMC có thuộc tính dẻo nhớt
- Đẳng hướng và không nén được

$$\text{div}(\underline{v}) = 0 \text{ hay } \text{Tr}(\underline{D}) = 0. \quad (1)$$

Phương trình ứng xử của BMC có dạng

$$\underline{\underline{\sigma}}^v = \frac{2}{3} \frac{\sigma_{eq}}{D_{eq}} \underline{\underline{D}}, \quad (2)$$

trong đó, quan hệ giữa ứng suất tương đương và tốc độ biến dạng tương đương được biểu diễn dưới dạng sau

$$\sigma_{eq} = \mu D_{eq}, \text{ với } \mu = \mu_{0eq} D_{eq}^{n-1} \exp(k \varepsilon_{eq}). \quad (3)$$

Với (3) mô hình ứng xử (2) của BMC có dạng cuối cùng:

$$\underline{\underline{\sigma}}^v = \frac{2}{3} \mu_{0eq} \exp(k \varepsilon_{eq}) D_{eq}^{n-1} \underline{\underline{D}}, \quad (4)$$

trong đó, 3 hệ số đặc trưng của vật liệu cần được nhận dạng: μ_{0eq} , k , n tương ứng là độ nhớt tương đương của BMC, thông số hoá bền do biến dạng và hệ số nhạy cảm của ứng suất với tốc độ biến dạng.

Phương pháp và kết quả nhận dạng mô hình (4) được trình bày dưới đây.

2.2 Phương pháp nhận dạng mô hình

Nhận dạng mô hình có nghĩa là xác định giá trị của các hệ số đặc trưng cho vật liệu trong phương trình thuộc tính (4). Các hệ số của mô hình được xác định bằng phương pháp bình phương nhỏ nhất phi tuyến trên cơ sở các giá trị ứng suất và tốc độ biến dạng đo được. Phương pháp này cho phép chúng ta nhận được kết quả tốt nếu có một số lượng số liệu thực nghiệm đầy đủ và khoảng biến thiên đủ rộng của các biến.

Phương trình (4) có thể viết dưới dạng ứng suất và tốc độ biến dạng tương đương.

$$\sigma_{eq} = \frac{2}{3} \mu_{0eq} \exp(k \varepsilon_{eq}) D_{eq}^n, \quad (5)$$

trong đó:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2} \underline{\underline{\sigma}}^v : \underline{\underline{\sigma}}^v}; \quad (6)$$

$$\varepsilon_{eq} = \sqrt{\frac{2}{3} \underline{\underline{\varepsilon}} : \underline{\underline{\varepsilon}}};$$

$$D_{eq} = \sqrt{\frac{2}{3} \underline{\underline{D}} : \underline{\underline{D}}}$$

với $\underline{\underline{\sigma}}^v = \underline{\underline{\sigma}} - \frac{1}{3} tr(\underline{\underline{\sigma}})$.

Để xác định các hệ số trong (5), ta cần tiến hành các thí nghiệm nén đơn và thí nghiệm nén phẳng với các tốc độ biến dạng khác nhau.

- Trong trường hợp nén đơn, ta có trạng thái ứng suất, biến dạng và tốc độ biến dạng như sau :

$$\underline{\underline{\sigma}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33sc} \end{bmatrix} \Rightarrow \underline{\underline{\sigma}}^v = \begin{bmatrix} -\frac{1}{3} \sigma_{33sc} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{3} \sigma_{33sc} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{3} \sigma_{33sc} \end{bmatrix}$$

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} \varepsilon_{33sc} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2} \varepsilon_{33sc} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33sc} \end{bmatrix}; \underline{\underline{D}} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} D_{33sc} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2} D_{33sc} & 0 \\ 0 & 0 & D_{33sc} \end{bmatrix}$$

Thay các biểu thức trên vào (6) ta sẽ được biểu thức tương đương trong bài toán nén đơn (sc-simple compression) như sau:

$$\sigma_{eq}^{sc} = \sigma_{33sc}; D_{eq}^{sc} = D_{33sc} \text{ và } \varepsilon_{eq}^{sc} = \varepsilon_{33sc} \quad (7)$$

- Trong trường hợp nén phẳng, ta có trạng thái ứng suất, biến dạng và tốc độ biến dạng như sau :

$$\underline{\underline{\sigma}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22ps} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33ps} \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\underline{\underline{\sigma}}^v = \begin{bmatrix} -\left(\frac{\sigma_{22ps} + \sigma_{33ps}}{3}\right) & 0 & 0 \\ 0 & \left(\frac{2\sigma_{22ps} - \sigma_{33ps}}{3}\right) & 0 \\ 0 & 0 & \left(\frac{2\sigma_{33ps} - \sigma_{22ps}}{3}\right) \end{bmatrix}$$

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11ps} (= -\varepsilon_{33ps}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33ps} \end{bmatrix},$$

$$\underline{\underline{D}} = \begin{bmatrix} D_{11ps} (= -D_{33ps}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_{33ps} \end{bmatrix}$$

Thay các biểu thức trên vào (6) ta sẽ được biểu thức tương đương trong bài toán nén phẳng (ps-plain strain) như sau :

$$\sigma_{eq}^{ps} = (\sigma_{22ps}^2 + \sigma_{33ps}^2 - \sigma_{22ps} \sigma_{33ps})^{1/2}$$

$$D_{eq}^{ps} = \frac{2}{\sqrt{3}} D_{33ps} \text{ và } \varepsilon_{eq}^{ps} = \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_{33ps} \quad (8)$$

Vật liệu được sử dụng để làm các thí nghiệm nhận dạng là BMC có chứa 20% sợi thủy tinh (chiều dài sợi 15mm, đường kính sợi 13.7µm) trên nền polymer nhiệt rắn. Silicone được sử dụng làm chất bôi trơn trong các thí nghiệm này.

Trước tiên, ta xác định sơ bộ được các giá trị của μ_0 , n nhờ vào các thí nghiệm với các tốc độ biến dạng khác nhau.

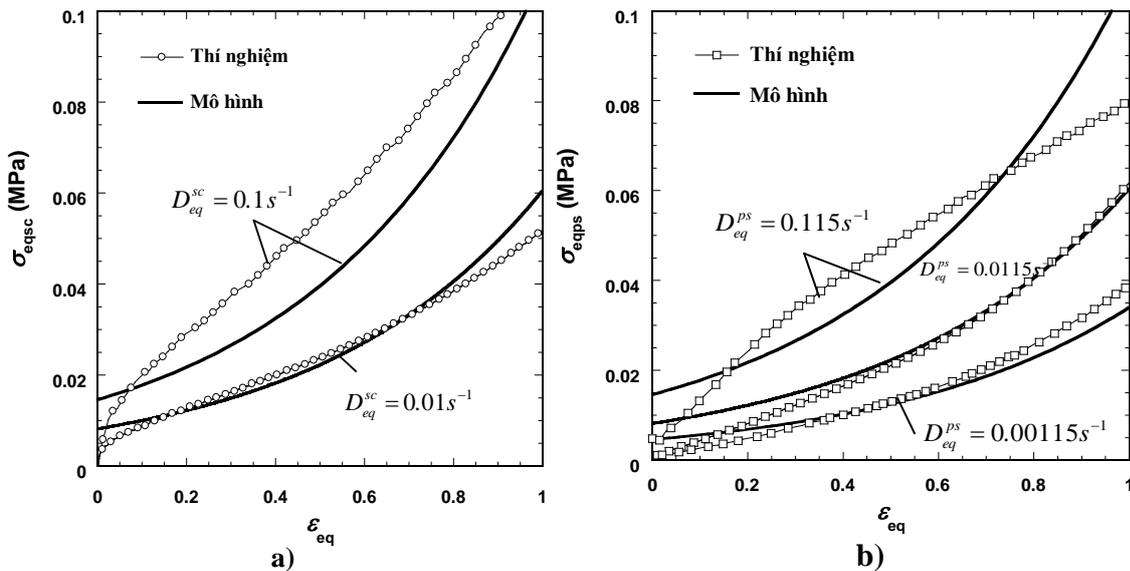
Thay μ_0 , n vào phương trình (5) ta sẽ xác định được k . Các hệ số trong mô hình được hiệu chỉnh sao cho sai số của các hệ số giữa hai lần tính không vượt quá giá trị cho phép. Giá trị của các hệ số nhận được như sau :

$$\mu_{0eq} = 0.025 \text{ MPas}, n = 0.25, k = 2.$$

2.3 Kiểm tra độ chính xác của nhận dạng

Hình 1 so sánh giữa kết quả dự báo của mô hình và kết quả thí nghiệm nhận được tại các tốc độ biến dạng tương đương khác nhau.

Đường nét liền biểu diễn kết quả nhận dạng mô hình, đường nối hình tròn và vuông là kết quả thí nghiệm tương ứng với thí nghiệm nén đơn (a) và nén bằng biến dạng phẳng (b). Đường cong mô tả quan hệ giữa ứng suất và biến dạng tương đương cho tất cả các tốc độ biến dạng xem xét.



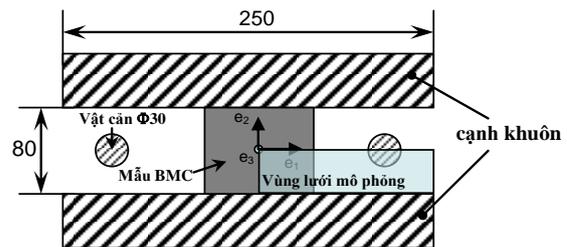
Hình 1. So sánh giữa kết quả thí nghiệm và dự báo mô hình : quan hệ giữa ứng suất và biến dạng tương đương với các tốc độ biến dạng khác nhau cho : nén đơn (a) và nén bằng biến dạng phẳng (b).

III. MÔ PHỎNG KIỂM ĐỊNH ĐỘ TƯƠNG HỢP CỦA MÔ HÌNH

Mô phỏng số quá trình biến dạng của vật liệu BMC trong quá trình điền đầy đối với bài toán phun trong khuôn đã được nghiên cứu khá phổ biến [2]. Tuy nhiên, bài toán biến dạng điền đầy của vật liệu trong khuôn có vật cản với biến dạng phẳng chưa được nghiên cứu đầy đủ. Chính vì vậy, để đánh giá độ tương hợp, mô hình ứng xử đề xuất đã được áp dụng cho mô phỏng số quá trình biến dạng trong khuôn có vật cản.

Chúng ta nhận thấy, sự tương hợp có thể chấp nhận được giữa các đường cong thực nghiệm và mô hình. Điều đó chứng tỏ tính hợp lý của các giả thiết về thuộc tính của vật liệu và độ tin cậy của phương pháp cũng như kết quả nhận dạng. Tuy nhiên, tại phần đầu của các đường cong ta thấy, do mô hình không tính đến tác động của đàn nhót (ảnh hưởng của miền đàn hồi đến lưu biến của BMC) nên giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm có xu hướng phân tách theo hai hướng rõ rệt.

3.1 Mô hình hình học



Hình 2. Hình chiếu bằng sơ đồ nén BMC trong khuôn với vật cản.

Hình 2 mô tả sơ đồ nén phẳng BMC trong khuôn với mẫu có kích thước ban đầu 80x80mm. Hai vật cản hình trụ tròn có đường kính 30mm, được bố trí cố định ở giữa dòng chảy và đối xứng với mẫu biến dạng. Thí

nghiệm này được thực hiện với khuôn có đế dưới bằng kính dày chịu lực trong suốt cho phép ghi lại hình ảnh của vật liệu chuyển động trong quá trình ép nhờ vào một camera tốc độ cao. Ngoài ra, cũng nhờ quan sát này ta có thể kiểm tra ma sát và thuộc tính không nén được của vật liệu bằng cách đo kích thước mẫu trước và sau khi biến dạng.

3.2 Điều kiện bài toán

Bài toán được thực hiện trong điều kiện tốc độ biến dạng là hằng số tương ứng: $D_{33}=10^{-1}, 3.10^{-1} \text{ s}^{-1}$ với hệ số ma sát giữa vật liệu và khuôn là $2.10^{-3} \text{ N s mm}^{-3}$. Giả thiết về dòng chảy nút (plug) hình thành bên trong khuôn dưới tác động của ma sát thủy tĩnh đã được tính đến. Quá trình mô phỏng được thực hiện bởi phần mềm phần tử hữu hạn được thiết kế riêng để dự báo ứng xử dòng chảy của vật liệu composite như SMC, GMT [3,4] và cũng có thể áp dụng cho vật liệu BMC.

3.3 Kết quả và thảo luận

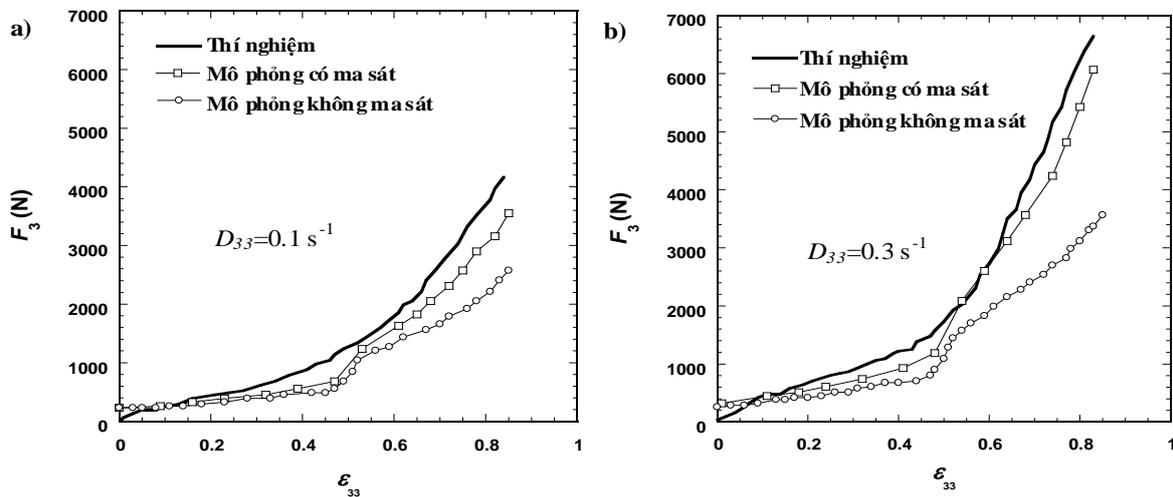
Hình 3 so sánh kết quả mô phỏng và thực nghiệm của lực dọc trục F_3 trong trường hợp nén sử dụng khuôn với vật cản trong mặt phẳng với các tốc độ biến dạng khác nhau: $D_{33}=10^{-1}, 3.10^{-1} \text{ s}^{-1}$ trong cả hai trường hợp có và không

có ma sát. Kết quả mô phỏng cho ta sự tương hợp khá tốt, điều đó chứng tỏ tính hợp lý và khả dụng của mô hình đề xuất. Kết quả tốt nhất nhận được trong trường hợp có tác động ma sát giữa khuôn và mẫu BMC.

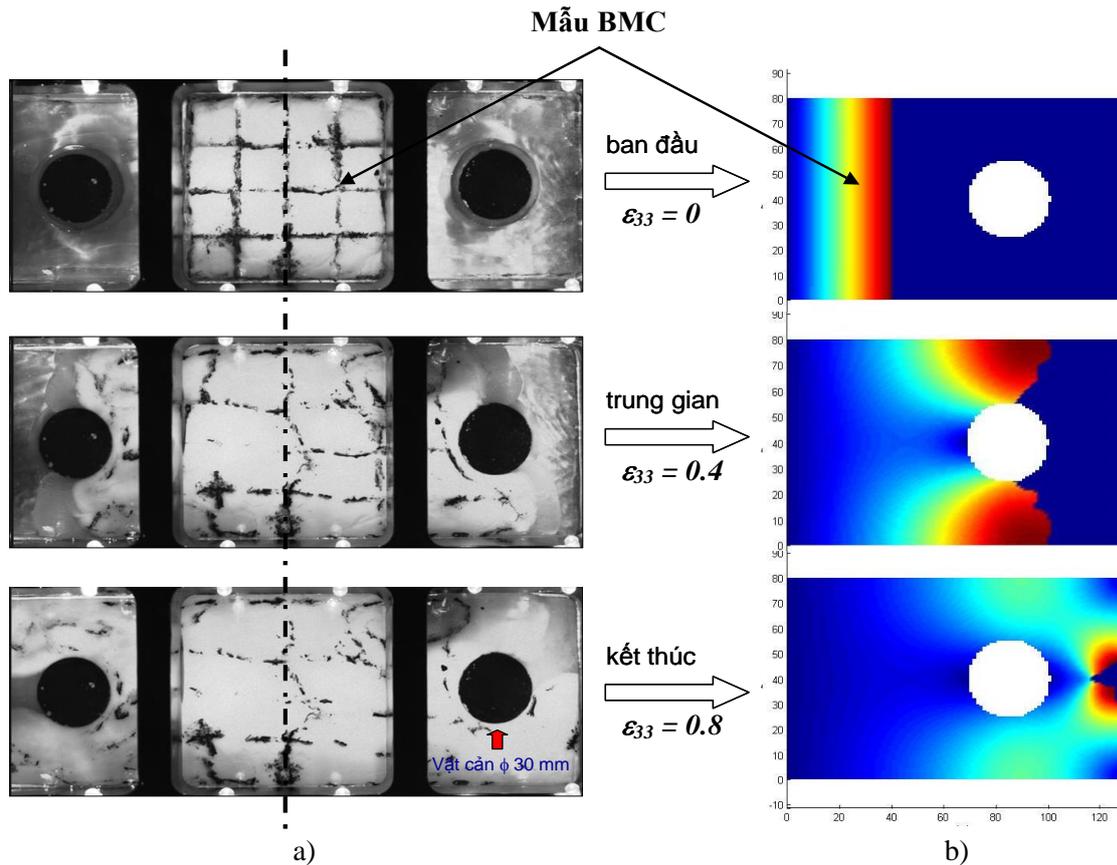
Hình 4 giới thiệu kết quả nhận được so sánh giữa thí nghiệm và mô phỏng. Hình 4a mô tả kết quả thí nghiệm khi BMC được nén với tốc độ biến dạng $D_{33} = 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ tại các trạng thái: ban đầu $\varepsilon_{33} = 0$, trung gian $\varepsilon_{33} = 0.4$ và kết thúc quá trình điền đầy $\varepsilon_{33} = 0.8$. Chúng ta nhận thấy khả năng điền đầy của vật liệu trong khuôn là khá tốt, bôi trơn được đảm bảo.

Hình 4b giới thiệu kết quả mô phỏng trường vận tốc của BMC trong quá trình điền đầy vào khuôn có vật cản.

Chúng ta nhận thấy trường vận tốc gần như đối xứng theo hướng dòng chảy. Với điều kiện bôi trơn thích hợp, khả năng điền đầy của BMC trong khuôn là tốt ngay cả khi có vật cản. Ta cũng nhận thấy trên đồ thị tại mức độ biến dạng $\varepsilon_{33} > 0.4$ ứng suất tăng đột ngột hơn trong cả hai trường hợp thí nghiệm và mô phỏng, đó là do BMC bắt đầu tiếp xúc với vật cản.



Hình 3. So sánh giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm của lực dọc trục F_3 trong thí nghiệm nén phẳng với khuôn có vật cản. Hai trường hợp mô phỏng được xem xét: có và không có tác động của ma sát thủy tĩnh.



Hình 4. Dòng chảy của BMC trong khuôn: a) kết quả thí nghiệm, b) kết quả mô phỏng trường vận tốc (đối xứng).

IV. KẾT LUẬN

Kết quả nhận dạng mô hình cho thấy rõ sự tương hợp tốt giữa mô hình đề xuất và kết quả thí nghiệm nhận được trong trường hợp dòng chảy phức tạp của BMC, đặc biệt trong trường hợp có ảnh hưởng của ma sát tiếp xúc giữa BMC và khuôn.

Kết quả mô phỏng số cũng cho thấy rõ tính hợp lý của mô hình đề xuất khi so sánh kết quả thí nghiệm và mô phỏng.

Mô hình đề xuất có thể áp dụng để tính toán dự báo ứng xử của một lớp BMC trong quá trình tạo hình.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Lê Thái Hùng, Nguyễn Trọng Giảng; Mô hình hoá thuộc tính lưu biến của vật liệu composit nền polyme nhiệt rắn dạng khối (BMC); Tạp chí khoa học và công nghệ các trường đại học kỹ thuật, N^o 68, pp 63-68, 2008.
2. Blanc R., Agassant J.F., Vincent M.; Injection molding of unsaturated polyester compounds; Polym. Eng. Sci., Vol.32, N^o19, pp. 1440-1450, 1992.
3. Dumont P., Orgéas L., Favier D., Pizette P., Venet C.; Compression of SMC: in-situ experiments, modelling and simulation; Composites: Part A., Vol. 38, pp. 353-368, 2007.
4. Dumont P., Le Corre S., Orgéas L., Favier D., Gaborit C., Lory P.; Finite element implementation of a two-phase model for compression molding of composites; Euro. J. Comput. Mech., Vol. 14, pp. 885-902, 2005.

Địa chỉ liên hệ: Lê Thái Hùng - Tel: (04) 3868.0116, 0944.910.639, Email: hung-cankl@mail.hut.edu.vn
 Bộ môn Cơ học vật liệu và Cán kim loại, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội