

ỨNG DỤNG PHÂN TÍCH PHẦN TỬ HỮU HẠN ĐỂ TRỰC QUAN HÓA TRƯỜNG ỨNG SUẤT-BIẾN DẠNG NHẪM TÌM BIỆN PHÁP NÂNG CAO ĐỘ BỀN MỎI CỦA CHI TIẾT MÁY

APPLICATION OF FINITE ELEMENT ANALYSIS TO VISUALIZE STRESS-STRAIN FIELDS TO FIND MEASURES TO IMPROVE FATIGUE STRENGTH OF MACHINE ELEMENTS

Nguyễn Văn Thanh*, Nguyễn Hữu Lộc

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

*Email: nguythanh@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Hiệu ứng Bauschinger khẳng định rằng khi vật liệu đã chịu biến dạng trước đó, nó sẽ dễ biến dạng lại theo chiều ngược và giới hạn chảy suy giảm dần theo số chu kỳ tải cho tới khi phá hủy. Cơ chế này gắn với quá trình biến dạng tuần hoàn: Ứng suất dư kích hoạt các đứt gãy chuyển động, thoát khỏi chướng ngại và quay về nguồn khi tải đảo dấu. Nghiên cứu trình bày giải pháp thiết kế hình học nhằm giảm σ_{max} , qua đó thu nhỏ vùng dẻo vượt ngoài miền đàn hồi Hooke – nơi tích lũy các vết nứt tế vi làm xuất hiện phá hủy mỏi. Phân tích phần tử hữu hạn bằng ANSYS được áp dụng để đánh giá ảnh hưởng của hai tham số R và d trong mối tương quan (R/d) đến trường ứng suất-biến dạng, từ đó đề xuất mô hình hình học có thể cải thiện độ bền mỏi của chi tiết máy.

Từ khóa: Hiệu ứng Bauschinger; Tập trung ứng suất; Độ bền mỏi; FEA.

ABSTRACT

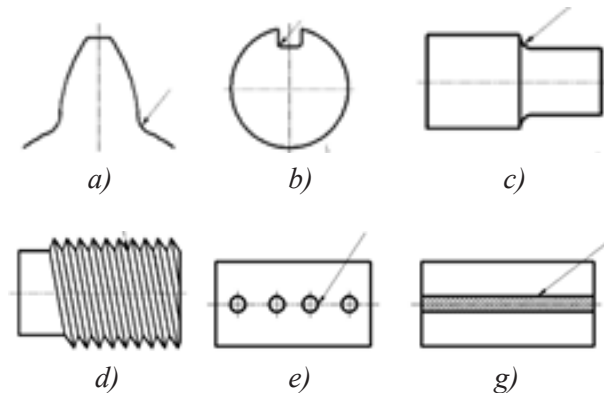
The Bauschinger effect states that when a material has been previously deformed, it is more likely to deform again in the opposite direction and the yield strength will gradually decrease with the number of loading cycles until it fails. This mechanism is associated with the cyclic deformation process: residual stresses activate moving faults, which escape from the obstacle and return to the source when the load reverses. The study presents a geometric design solution to reduce σ_{max} , thereby reducing the plastic zone beyond the Hooke elastic zone - where microcracks accumulate and cause fatigue failure. Finite element analysis by ANSYS is applied to evaluate the influence of two parameters R and d in the correlation (R/d) on the stress-strain field, thereby proposing a geometric model that can improve the fatigue strength of the machine part.

Keywords: Bauschinger effect; Stress concentration; Fatigue; FEA.



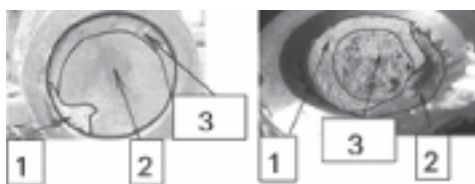
1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Vì nhiều lý do, không thể tránh việc tạo ra các vị trí có thể gây ra sự tập trung ứng suất trên tiết máy như Hình 1. Như vậy, tìm biện pháp làm giảm sự tập trung ứng suất là một hướng cần quan tâm.



Hình 1. Một số vị trí có tập trung ứng suất

Đặc trưng mặt cắt ngang bị phá hủy do mỏi có thể quan sát được như trong Hình 2, trong đó, vùng vết nứt mỏi lan truyền có bề mặt phẳng và nhẵn nhờ hóa bền gồm nhiều cung tròn đồng tâm đặc trưng cho giai đoạn phát triển của vết nứt, vùng phá hủy dẻo hay giòn có dạng sợi (hay tinh thể) biểu thị giai đoạn kết thúc mỏi.



a) Phá hủy dẻo. b) Phá hủy giòn.
1 - Hình thành; 2 - Lan truyền; 3 - Phá hủy

Hình 2. Vùng vết nứt mỏi lan truyền

Nhận thấy rằng, diện tích vùng hình thành vết nứt mỏi là nhỏ so với tiết diện của kết cấu làm việc và luôn phát triển từ biên giới mặt cắt của vật thể. Điều này chứng tỏ vết nứt mỏi ban đầu xuất phát tại vùng có ứng suất lớn nhất

trong kết cấu, tương ứng với vùng có trường ứng suất và biến dạng lớn nhất trên tiết diện.

Theo [1], ứng suất cho phép của vật liệu bằng thép được xác định theo công thức:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_r \cdot \epsilon \beta K_L}{K_\sigma} \quad [S] \quad (1)$$

Như vậy, nếu có thể tìm được những biện pháp thích hợp sao cho hệ số tập trung ứng suất K_σ càng giảm bằng cách giảm $\sigma_{\max}$ thì độ bền mỏi của kết cấu càng được nâng lên.

Ngoài ra, cơ năng của ngoại lực được lưu trữ lại trong vật liệu bị biến dạng dẻo khoảng từ (5-10%) [3] để tạo ra các dạng khuyết tật và sai hỏng khác nhau, dẫn đến những biến đổi về tổ chức tế vi và tính chất của nó. Biến dạng càng lớn thì những biến đổi trong tổ chức của vật liệu xảy ra càng nhiều.

Do đó, việc làm giảm biến dạng dẻo đồng nghĩa với việc giảm khả năng sinh ra khuyết tật gây hỏng do mỏi. Có thể giảm biến dạng bằng cách đã được trình bày trong nhiều tài liệu tính toán thiết kế máy như tăng độ cứng thể tích hoặc tiếp cận theo hướng ngược lại là tăng thể tích vùng cho phép biến dạng nhằm mục đích làm cho trường ứng suất rộng ra, và do đó làm giảm biến dạng đơn vị do giảm ứng suất trên một đơn vị thể tích.

Trong nội dung bài báo này, trình bày hướng tiếp cận như vậy theo cách hiệu chỉnh kết cấu sao cho độ mềm tăng lên - trường biến dạng tăng lên để biên độ biến dạng giảm xuống.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT CỦA NGHIÊN CỨU

Hệ số K_I trong các phương trình (2) và (3) là hệ số cường độ ứng suất ứng với vùng I - biểu diễn cho mối quan hệ kết hợp chặt chẽ

giữa tình trạng bề mặt và biên giới của các vết nứt, cũng như hình học mẫu và chế độ tải trọng. Như vậy, trong bài toán phẳng, nó không phụ thuộc vào các hằng số đàn hồi.

Để xác định biên giới của vùng biến dạng dẻo tại đỉnh của vết nứt trong vật thể rắn có thể chuyển sang xác định ứng suất tương đương nhận được khi xem xét khu vực đỉnh của vết nứt (theo Mises). Theo đó, ứng suất tương đương này vượt quá giá trị ứng suất σ_y (theo tính toán của Irwin) [2, 3].

Bán kính của vùng dẻo r_p tại đỉnh của vết nứt ($\theta = 0$) tỉ lệ với bình phương của hệ số cường độ ứng suất trong trạng thái phá huỷ I là:

- Với ứng suất phẳng:

$$r_p = \frac{1}{3\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_y} \right)^2 \quad (2)$$

- Với biên dạng phẳng:

$$r_p = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_y} \right)^2 \quad (3)$$

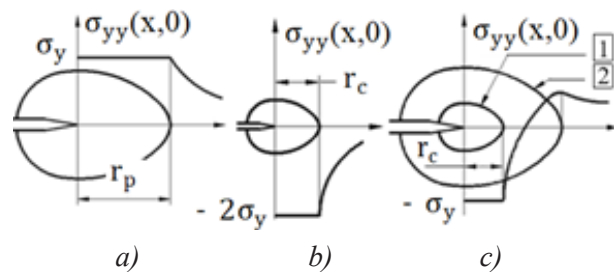
Sự tồn tại một khu vực dẻo, phát sinh và phát triển rộng ra xung quanh đỉnh của vết nứt (theo hướng ngược lại) đã được nghiên cứu trong các công trình của Paris, McClintock, Rice. Các giá trị ứng suất trong vùng này cũng được tính toán, theo đó kết quả đã được Rice trình bày trong [4, 5].

Xem xét trạng thái chịu tải và ứng xử của vật liệu khi có tải, với bán kính lớn nhất của vùng dẻo r_p , được minh họa trong Hình 3a.

Với cùng mô hình thử nghiệm nhưng giảm tải đi một lượng là ΔF , sự tập trung ứng

suất giảm xuống và do đó khu vực dẻo thu gọn vào bên trong [6].

Đối với chế độ tải thay đổi, các thông số trong phạm vi khu vực gần đỉnh vết nứt được tính toán theo như trong vùng tải tĩnh, ngoại trừ thông số tải σ_y tăng lên hai lần. Sự hiệu chỉnh này được thêm để đảm bảo sự chính xác của các kết quả xác định ứng suất trong khu vực dẻo được hình thành sau khi trừ đi các thay đổi biên độ ΔF , kết quả như minh họa trong Hình 3b.



a) Vùng dẻo khi vật thể chịu tải P tĩnh; b) Vùng dẻo khi vật thể chịu tải tuần hoàn với biên độ ΔF ngược chiều với lực F ; c) Kết quả tổng hợp; 1: Vùng dẻo tuần hoàn; 2: Vùng dẻo đều.

Hình 3. Sơ đồ mô tả quá trình hình thành khu vực dẻo dưới tác dụng của tải tuần hoàn

Nếu biên giới của các vết nứt không gặp các mặt nứt khác đột ngột, thì sự chồng chất của các ứng suất trong trường hợp tải tuần hoàn (Hình 3a) với trường hợp bỏ tải từng phần (Hình 3b) sẽ dẫn đến kết quả phân phối ứng suất tổng hợp như trong Hình 3c.

Ứng suất trong khu vực dẻo tuần hoàn tương đương với ứng suất nén (σ_y). Bán kính của vùng dẻo khi giảm tải một lượng ΔF là r_c , được tính theo phương trình (3), với lưu ý thay thế cường độ ứng lực K_I bằng biên độ cường độ ứng lực ΔK_I và σ_y bằng $-2\sigma_y$. Như vậy, kết quả thu được như sau:



$$r_c \approx \frac{1}{\pi} \left(\frac{\Delta K_I}{2\sigma_y} \right)^2 \quad (4)$$

Nếu tải trọng có chu kỳ mạch động, nhận được kết quả: $\Delta K_I = K_I$ và khi đó bán kính của vùng dẻo có giá trị như sau: $r_c = r_p/4$.

Trong trường hợp ứng suất phẳng và biến dạng phẳng, kích thước của vùng biến dạng dẻo tỉ lệ với hệ số tập trung ứng suất tại đỉnh của vết nứt. Tùy hình dạng ban đầu của vết nứt, nếu bán kính tại đỉnh vết nứt càng lớn thì hệ số tập trung ứng suất tại đó càng nhỏ và r_p càng nhỏ, nghĩa là vùng dẻo mở rộng trước khi bị phá hủy càng thu hẹp; nếu bán kính tại đỉnh vết nứt càng nhỏ thì hệ số tập trung ứng suất tại đó càng lớn và r_p càng lớn, nghĩa là vùng dẻo mở rộng trước khi bị phá hủy càng mở rộng [7].

Nếu chu kỳ tải trọng thay đổi tuần hoàn đã kết thúc, vẫn còn ứng suất dư tồn tại trong khu vực của đỉnh vết nứt. Sự tồn tại của ứng suất dư trong khu vực đỉnh vết nứt là để tạo ra sự cân bằng giữa ứng suất dư tại đỉnh của vết nứt và ứng suất dư tại các vùng khác xung quanh đỉnh vết nứt. Chính ứng suất này có thể gây ảnh hưởng của quá trình hình thành và phát triển vết nứt trong các chu kỳ ứng suất tiếp sau [8, 9].

Khi vết nứt không được đóng kín ứng suất dư tại khu vực đỉnh của vết nứt có thể quyết định quá trình phát triển vết nứt theo trạng thái phá hủy I (phá chẻ). Giá trị bán kính của vùng dẻo r_c , ứng suất thay đổi theo chu kỳ, biến dạng và chuyển vị chỉ phụ thuộc vào giá trị biên độ của tải trọng ΔF mà không phụ thuộc vào giá trị F . Lúc này, khu vực dẻo tuần hoàn tiếp tục mở rộng đến lúc $r_c = r_p$ (tại giới hạn này vật liệu bắt đầu bị phá hủy với với tốc độ cao hơn).

Nếu có một sự biến đổi tuần hoàn giá trị của hệ số cường độ ứng suất ΔK_I , từ $0 \div K_I$ đỉnh vết nứt sẽ được mở rộng thêm một đoạn $\Delta \delta_t$ - là một nửa trong tổng chiều dài mở rộng của vết nứt δ , ứng với hệ số cường độ tập trung ứng suất K_I . Như vậy, độ lớn của vết nứt mở rộng theo mô hình dẻo Dugdale, có thể viết thành:

$$\Delta \delta_t \approx \frac{\Delta K_I^2}{2\sigma_y E} \quad (5)$$

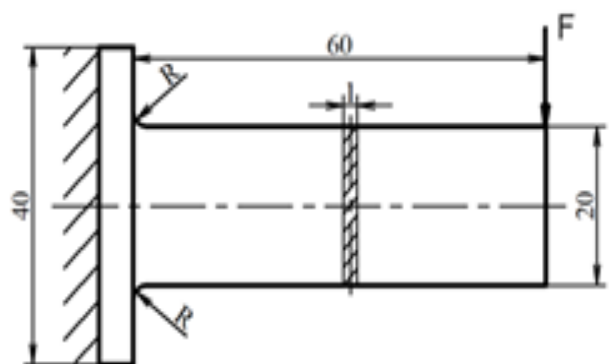
Phương trình (5) cho thấy rằng, có thể khảo sát bài toán với tải trọng mỗi thông qua khảo sát bài toán tải trọng tĩnh. Do đó, kết quả của bài toán tĩnh có thể dùng để hiệu chỉnh (về mặt kết cấu) cho bài toán mỗi.

3. PHƯƠNG PHÁP TRỰC QUAN HÓA VÙNG TẬP TRUNG ỨNG SUẤT

Sử dụng phần mềm ANSYS để khảo sát trường ứng suất và biến dạng phân bố trong mẫu. Tính hệ số tập trung ứng suất và đề xuất những thay đổi về mặt hình học nhưng vẫn đảm bảo chức năng làm việc của chi tiết.

- Vật liệu mẫu: $E = 207000 \text{ MPa}$; $\nu = 0,3$; $\sigma_b = 400 \text{ MPa}$; $F = 100 \text{ N}$.

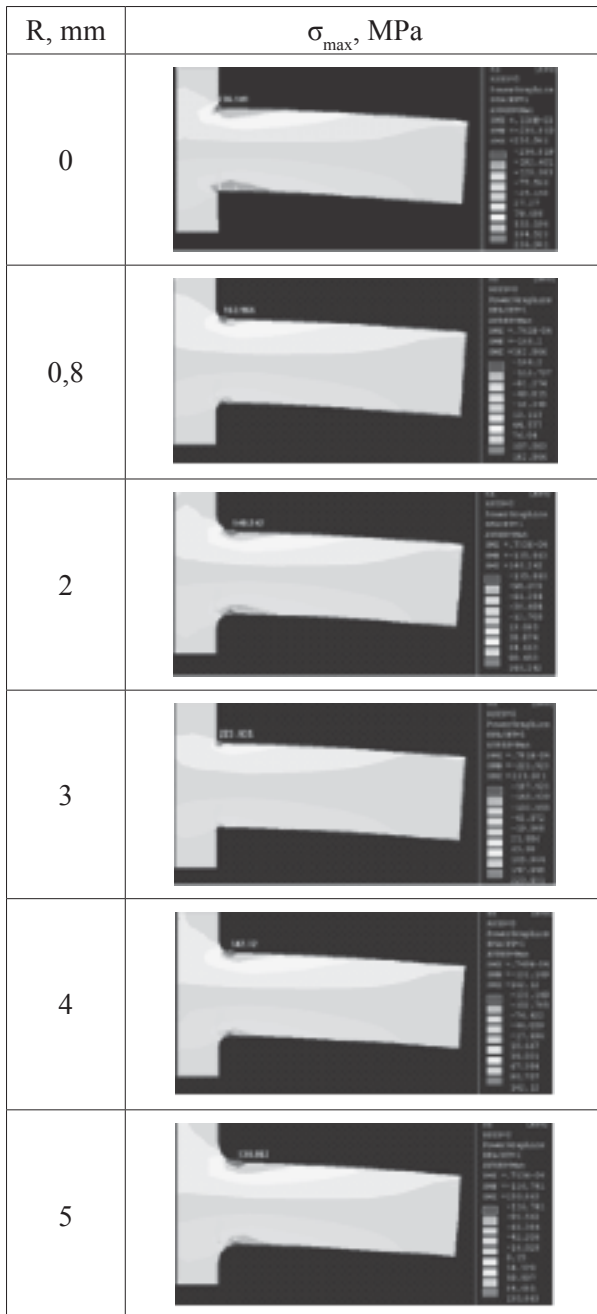
- Hình học mẫu như Hình 4.



Hình 4. Hình học mẫu

4. KẾT QUẢ VÀ BÀN LUẬN

Kết quả phân tích ứng suất như Hình 5.



Hình 5. Kết quả mẫu phân tích ứng suất

Hệ số tập trung ứng suất lý thuyết như Bảng 1.

Bảng 1. Hệ số tập trung ứng suất lý thuyết

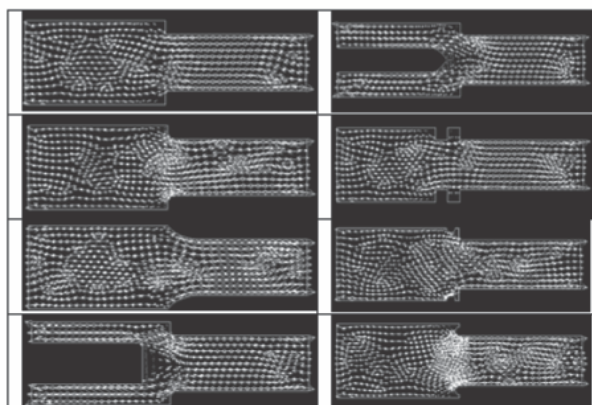
R, mm	σ_n , MPa	σ_{max} , MPa	$K_{\sigma t}$
0	90	236,941	2,63
0,8	90	223,931	2,59
2	90	162,966	1,81
3	90	142,120	1,58
4	90	140,242	1,56
5	90	130,863	1,45

Một số kết luận từ kết quả:

1) Việc tính toán xác định bán kính vùng dẻo theo lý thuyết phức tạp và trừu tượng. Trong khi đó, bằng việc dùng máy tính có ứng dụng phân tích ứng suất sẽ cho kết quả trực quan về vùng chịu ứng suất lớn, giúp nhanh chóng tìm được hệ số tập trung ứng suất, giúp dự đoán tuổi thọ của chi tiết máy.

2) Có thể quan sát trực quan và xác định được diện tích (thể tích) trường ứng suất nguy hiểm phân bố trên chi tiết, từ đó ước lượng được phạm vi vùng biến dạng đàn hồi, điều này cho ta căn cứ để xử lý kết cấu nhằm giảm hệ số tập trung ứng suất bằng cách làm tăng thể tích vùng biến dạng đàn hồi (tăng liên kết hình học của phần kết cấu có ứng suất lớn với các vùng lân cận có ứng suất nhỏ hơn như tăng bán kính góc lượn, thay thế cung tròn chuyên tiếp bằng các đường cong phù hợp, thêm gân, gờ chịu lực...), giảm sự chênh lệch độ cứng tiết diện tại vị trí có vùng phân bố ứng suất lớn (thay vì tăng tỉ lệ r/d có thể dùng biện pháp khác như vòng kẹp, chốt để định vị và chịu lực dọc...), hoặc dùng các pha vật liệu có độ cứng lớn làm đỡ chịu lực bên ngoài giúp lan truyền vùng chịu lực ra thể tích lớn hơn thông qua các biện pháp nhiệt luyện hoặc biện pháp công nghệ như phun bi, lăn ép hoặc ghép kết cấu từ nhiều lớp. 

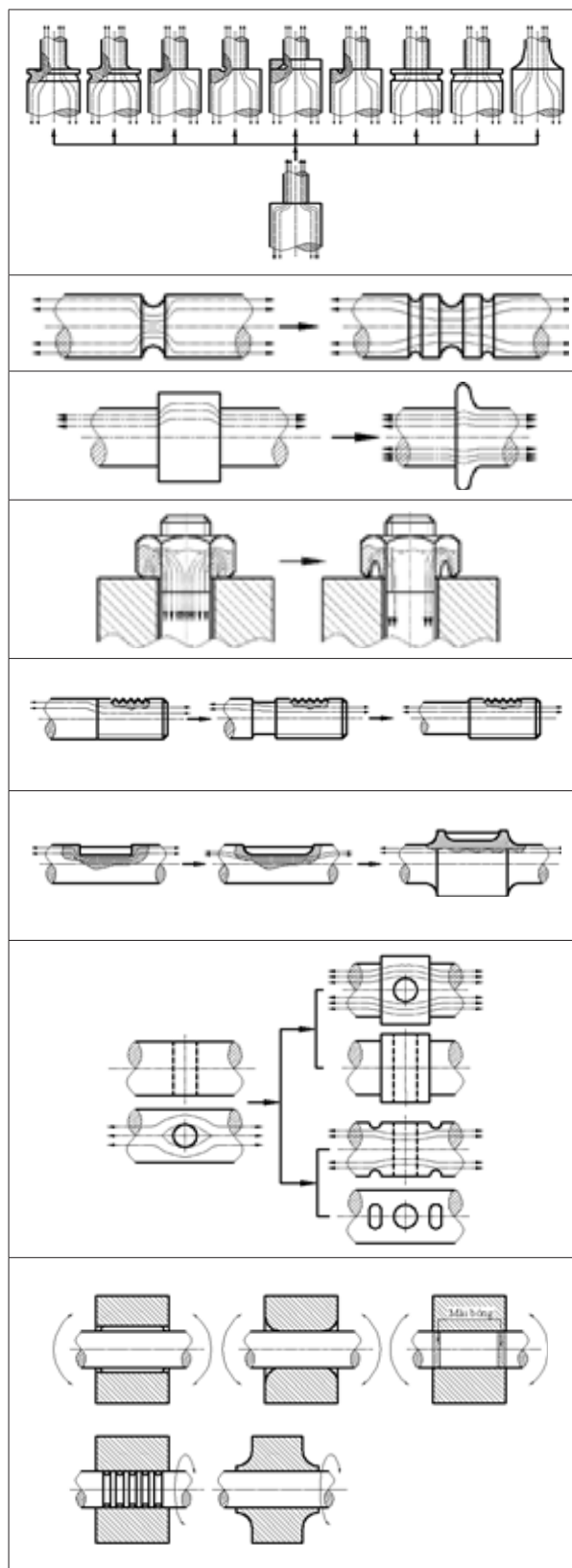
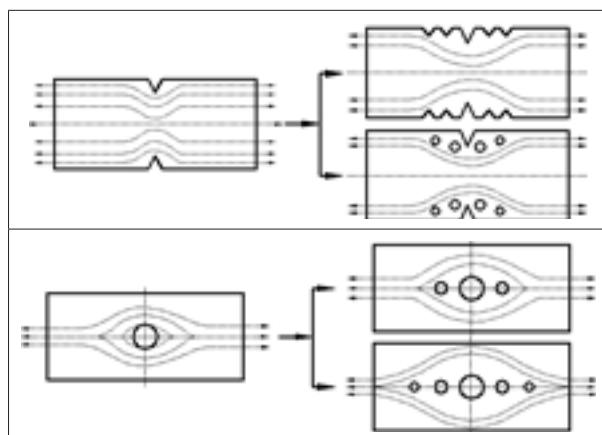
3) Có thể giải thích các kết cấu có khả năng cải thiện độ bền mỗi một cách trực quan thay vì thí nghiệm trên mô hình vật lý, từ đó có phương hướng điều chỉnh kết cấu chủ động nhằm cải thiện độ bền mỗi mà không nhất thiết phải trải qua quá trình thực nghiệm vốn tốn nhiều chi phí. Một số ví dụ trong việc hiệu chỉnh chủ động kết cấu như sau:



Hình 6. Mô hình điều chỉnh sự tập trung ứng suất khi kéo

Kết quả hiệu chỉnh mẫu theo dạng tải trình bày trên Bảng 2.

Bảng 2. Lược đồ trường ứng suất trước và sau hiệu chỉnh kết cấu



***Hướng phát triển:**

- Nghiên cứu khả năng chống mỏi của kết cấu có kết cấu nhiều lớp cùng loại vật liệu và khác loại vật liệu lắp chặt với nhau hoặc mối ghép dán.

- Nghiên cứu khả năng kéo dài tuổi thọ trên cơ sở thiết kế kết cấu gồm nhiều lớp vật liệu lắp chặt sẽ ngăn việc phát triển vết nứt do năng lượng cơ học tích lũy trong vùng dẻo gây ra vết nứt tế vi ban đầu sẽ trở về không trên bề mặt vết nứt. ❖

Ngày nhận bài: **02/6/2025**

Ngày phản biện: **16/6/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Nguyễn Hữu Lộc (2020), “*Giáo trình Cơ sở thiết kế máy*”. NXB. Đại học Quốc gia Tp. Hồ Chí Minh.
- [2]. Suresh, S. (1998), “*Fatigue of Materials*” (2nd ed.). Cambridge University Press.
- [3]. Collins, J. A. (1993), “*Failure of Materials in Mechanical Design: Analysis, Prediction, Prevention*” (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- [4]. Peterson, R. E. (1974), “*Stress Concentration Factors*”. John Wiley & Sons.
- [5]. Weibull, W. (1961), “*Fatigue Testing and Analysis of Results*”. Pergamon Press, Oxford.
- [6]. Nguyen, H.-G., Young, S.-J., Le, T.-D., Vu, T.-N., & Fang, T.-H. (2025), “*Bauschinger effect on high entropy alloy under cyclic deformation*”. *Intermetallics*, 183, 108830.
- [7]. Kassner, M. E., Geantil, P., Levine, L. E., & Larson, B. C. (2008), “*Backstress, the Bauschinger Effect and Cyclic Deformation*”. *Materials Science Forum*, 604-605, 39-51.
- [8]. Pommeir, S., & Bompard, P. H. (2000), “*Bauschinger effect of alloys and plasticity-induced crack closure: a finite element analysis*”. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 23(2), 129-139.
- [9]. Prajwal, S., Dhinakaran, V., & Jagadeesha, T. (2020), “*Size optimization of shoulder-filletted shafts with relief grooves for improving their fatigue life*”. *AIP Conference Proceedings*, 2283(1), 020057.