

TỐI ƯU KIỂU DÁNG CHI TIẾT MÁY

TOPOLOGY OPTIMIZATION OF MACHINE ELEMENTS

Nguyễn Hữu Lộc

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh

TÓM TẮT

Tối ưu kiểu dáng là công cụ mạnh mẽ cho những kỹ sư cũng như những nhà thiết kế sản phẩm. Sử dụng tối ưu kiểu dáng giúp tìm ra những ý tưởng thiết kế mới, đảm bảo yêu cầu về chức năng và thẩm mỹ, tiết kiệm vật liệu, chi phí và thời gian. Bài báo này sẽ cung cấp một cái nhìn tổng quát về tối ưu hóa kiểu dáng, ảnh hưởng của nó tới nội dung quá trình thiết kế và thiết kế kiểu dáng cho một số chi tiết máy.

Từ khóa: *Tối ưu kiểu dáng; Chi tiết máy; Hệ thống CAD/CAE.*

ABSTRACT

Topology optimization is a power tool to engineers and product designers. Using topology optimization help us to find out new concept designs which get the requires about funtions, and aestheticism; material, cost, and time saving. This paper gives an overview of topology optimization, effects to design process and applications to some structural machine elements designs.

Keywords: *Topology Optimization; Machine Elements; CAD/CAE systems.*

1. TỔNG QUAN

Trong nền kinh tế thị trường để tồn tại thì sản phẩm phải hội đủ ba yếu tố: Chất lượng cao nhất, chi phí ít nhất và thời gian sản phẩm ra thị trường là ngắn nhất... Để đáp ứng nhu cầu đó, ngày càng nhiều phần mềm hỗ trợ thiết kế (CAD) và phân tích kết cấu (CAE) đã được tích hợp vào quá trình thiết kế. Đặc biệt, công cụ tối ưu hóa kiểu dáng giúp cho quá trình thiết kế ý tưởng hiệu quả hơn vì nó là sự kết hợp giữa thiết kế chức năng với thiết kế kiểu dáng sản phẩm.

Vấn đề tối ưu hóa trong cơ khí được nghiên cứu đầu tiên bởi Galileo [1]. Sau đó, các thuật toán tính tối ưu đã liên tục phát triển trên cơ sở các hàm tiêu chuẩn như Bernoulli, Euler, Lagrange, đặc biệt Cauchy là người đã có những đóng góp quan trọng khi đưa ra thuật toán phương pháp gradient năm 1847 [1]. Đến năm 1960, phương pháp số kết hợp với các phương pháp lập trình toán để giải quyết những thuật toán tối ưu. Từ đó, sự phát triển tối ưu hóa kết cấu gắn liền với quá trình phát triển của máy tính điện tử.

Sự mở rộng khái niệm thiết kế tối ưu hình dạng cho kết cấu cơ khí thực hiện vào những năm 1970. Năm 1986, Haftka và Grandhi đưa ra tối ưu hóa hình dạng với những biến thiết kế là tọa độ nút của khung kết cấu hay tọa độ nút những điểm điều khiển đường spline bao quanh cấu trúc [1].

Vào những năm cuối thập niên 80, tối ưu kiểu dáng mới được nghiên cứu. Từ đó về sau tối ưu hóa kết cấu có những bước tiến mạnh mẽ với nhiều nhà nghiên cứu về lĩnh vực này và nhiều phần mềm CAD và CAE xuất hiện.

Cho đến những năm 1990, kết hợp giữa CAD và CAE trở thành nhân tố chính để giảm thời gian và bỏ đi vài công đoạn trong chu trình thiết kế, tối ưu hóa được ứng dụng vào sản xuất. Ngành công nghiệp ô tô và hàng không đầu tư chủ yếu cho việc nghiên cứu và ứng dụng kỹ thuật tối ưu. Từ năm 2000 tới nay, CAE hoàn toàn thay thế kiểm tra vật lý. Tuy nhiên, do tính mới lạ của nó nên dù được chấp nhận như một công cụ thiết kế hiệu quả, tối ưu hóa kết cấu vẫn chưa được sử dụng phổ biến trong công nghiệp [3].

Như vậy, việc mô phỏng để thiết kế và phân tích kết cấu đã phát triển mạnh mẽ theo sự ứng dụng lớn mạnh và rộng rãi của máy tính. Việc mô phỏng động học và phân tích động lực học cơ cấu phức tạp ngoài thực tế sẽ ngày càng gia tăng trong tương lai [2, 4-8]. Mô hình hóa và mô phỏng hệ thống ta có thể quan sát được chuyển động của nó và những tương tác phức tạp giữa các phần tử trong hệ thống. Nhưng mô hình này được thực hiện trên những số liệu và kết quả tính toán, quan sát, đo lường chứ chưa phải là kết quả tối ưu. Bằng việc kết hợp tối ưu hóa vào trong mô hình hóa người thiết kế không chỉ loại bỏ rất nhiều giới hạn của nó mà còn mở rộng ra nhiều lĩnh vực ứng dụng và khả

năng nghiên cứu hơn nữa. Trong khuôn khổ bài báo này xin giới thiệu tính ứng dụng cao của tối ưu hóa kết cấu trong việc tìm ra hình dáng cho chi tiết máy từ một không gian thiết kế ban đầu. Kết quả thu được không chỉ đảm bảo yêu cầu về tính năng kỹ thuật và thẩm mỹ trong thiết kế mà còn ít tốn vật liệu nhất.

2. QUÁ TRÌNH THIẾT KẾ TỐI ƯU KẾT CẤU

Quá trình thiết kế đã được biến đổi liên tục qua các thời kỳ, hiện nay đa số quá trình thiết kế sản phẩm là một chu trình sử dụng công cụ CAD/CAE. Đầu vào của thiết kế là nhiệm vụ thiết kế, tải trọng, điều kiện biên, phương pháp chế tạo, chi tiêu chi phí, không gian thiết kế, kiểu dáng thiết kế, những thiết kế có cùng chức năng và nhiều thông tin khác... Giai đoạn đầu, một ý tưởng mới được đưa ra dựa trên ý tưởng và kinh nghiệm của người thiết kế. Tiếp theo là phân tích kích thước chi tiết dựa trên tiêu chuẩn hay tính bằng giải tích. Thiết kế sau đó được mô hình hóa lại bằng phần mềm CAD và kiểm tra lại bằng phần mềm CAE. Hệ thống CAD xây dựng mô hình hình học dựa trên tham số, sau đó xuất qua chương trình FEA. Hệ thống FEA sẽ chia lưới, đặt điều kiện biên, chia tải trọng, thiết lập đặc tính vật liệu và những thông tin liên quan.

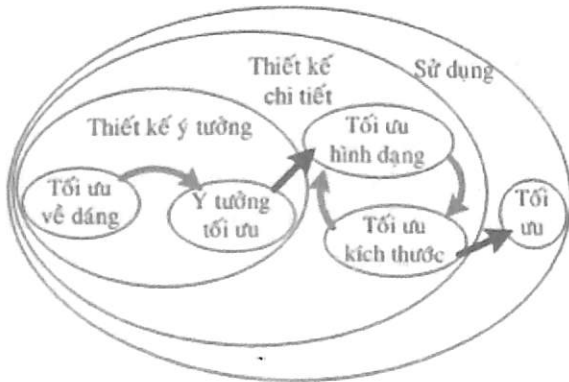
Có một số vấn đề ảnh hưởng đến khả năng thiết kế của quá trình trên:

- Khi thiết kế được hoàn thành trong hệ thống CAD, nó bị giới hạn bởi hình dạng ban đầu đã chọn. Do đó có rất ít khả năng hình dáng hình học khác hoàn toàn tạo ra từ sự thay đổi tham số. Vì vậy, thiết kế theo phương pháp này chỉ có thể xem xét được một số thiết kế gần giống với mô hình ban đầu.



- Nếu giả sử đã có một thiết kế ban đầu tốt, nghĩa là gần tối ưu, khắc phục được hạn chế trên thì một khó khăn mới xuất hiện, đó là giới hạn trong sự chuyển đổi qua lại giữa hệ thống CAD và CAE do việc chuyển đổi dữ liệu giữa chúng còn nhiều thiếu sót, tuy nhiên gần đây được khắc phục.

- Sau khi đã có những giá trị tối ưu của biến thiết kế cho mô hình chi tiết, liên kết từ CAE trở lại hệ thống CAD, và tái tạo lại mô hình để có hình dáng mới của chi tiết.



Hình 1. Quá trình thiết kế với tối ưu kết cấu.

Mặc dù phương pháp này giúp ích rất nhiều cho quá trình thiết kế, hiện nay với sự phát triển mạnh mẽ của máy tính và phần mềm, các nhà nghiên cứu đã cho ra đời một hệ thống mới để cải tiến quá trình, hiệu quả hơn trong thiết kế và loại trừ những khó khăn của hệ thống cũ. Hệ thống này hợp nhất các phần riêng lẻ trong tối ưu (tối ưu kiểu dáng, tối ưu hóa hình dạng và tối ưu hóa kích thước) lại thành một phần duy nhất (Hình 1), để tối ưu kết cấu hiệu quả hơn [9-10].

Mục đích của tối ưu kiểu dáng là tìm cách phân bố vật liệu tốt nhất cho cấu trúc để đạt sự cực tiểu hoặc cực đại giá trị về một tiêu chuẩn nào đó (như độ cứng toàn phần, năng lượng biến dạng, tần số tự nhiên ...) thỏa mãn

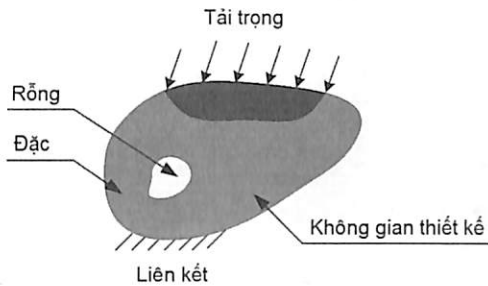
những ràng buộc (như giảm thể tích, ứng suất ...). Do đó, người thiết kế có thể loại bỏ những phần vật liệu không cần thiết, tiết kiệm chi phí lớn nhất trong sản xuất là vật liệu. Đặc tính này không chỉ hữu ích trong những ngành mà sự giảm vật liệu là yêu cầu chủ yếu như: hàng không, vũ trụ, ô tô, đóng tàu... và những chi tiết thể tích lớn trong nhiều ngành khác mà còn góp phần mang lại lợi nhuận cao cho đa số các ngành. Mặt khác, nó còn giúp hình thành nhiều ý tưởng mới hơn và hiệu quả hơn cho quá trình thiết kế ý tưởng vì nó tạo ra kiểu dáng mới cho thiết kế từ một không gian thiết kế ban đầu chưa rõ hình dáng.

Tối ưu kiểu dáng có thể được dùng để thiết kế ban đầu hoặc là phương tiện tinh chỉnh thiết kế đã có. Nó là bước đầu của giai đoạn phát triển sản phẩm. Khi dữ liệu được nhập vào, phần mềm tối ưu hóa sẽ số hóa việc xây dựng hình dạng để có giá trị tốt nhất của vật liệu, độ cứng và yêu cầu tải trọng. Cụ thể là mô hình chi tiết sẽ được chia ra nhiều phần tử nhỏ, mỗi phần tử sẽ được đặc trưng bằng một giá trị số nằm trong khoảng 0 – 1. Tính tối ưu về dáng là tìm giá trị tối ưu của tập hợp số đó sao cho đạt giá trị tốt nhất về năng lượng biến dạng (tích số của lực tác dụng và chuyển vị) thỏa điều kiện ràng buộc về thể tích cho trước. Những màu sắc trên mô hình 2-D và 3-D cho biết những phần chịu lực cần phải giữ lại (tương ứng với giá trị 1) và những phần cần phải bỏ đi (tương ứng với giá trị 0) như hình 2.

Trong bài toán tối ưu hóa kiểu dáng, hàm mục tiêu chính là công biến dạng. Lượng vật liệu bị ràng buộc và phân bố trong không gian thiết kế Ω . Không gian thiết kế được cố định bởi những vùng đặc và rỗng.

Để giải quyết bài toán tối ưu hóa này, các nhà nghiên cứu đưa ra rất nhiều phương

pháp: Tiêu chuẩn tối ưu (OC), lập trình lồi liên tục (SCP), lập trình tuyến tính liên tục (SLP), lập trình bậc hai liên tục (SQP), giải thuật di truyền (GA) ...



Hình 2. Mô hình tối ưu kiểu dáng.

Trong đó, phương pháp tiêu chuẩn tối ưu sử dụng hàm Lagrange để tìm kết quả tối ưu, trong một số phần mềm được gọi là phương pháp OC. Ưu điểm của phương pháp này là nó có thể giải quyết bài toán tối ưu kiểu dáng với cấu trúc liên tục, một hàm mục tiêu và một ràng buộc nhanh hơn và hiệu quả hơn các phương pháp khác. Trong các phần mềm còn sử dụng phương pháp thứ hai là SCP. Phương pháp này được phát triển lên từ phương pháp đường tiệm cận di chuyển. Nội dung chính của nó là xấp xỉ hàm mục tiêu và hàm ràng buộc có dạng phi tuyến bởi những phương trình có dạng tuyến tính và lồi. Phương pháp này có thể giải được tất cả các dạng vấn đề tối ưu kiểu dáng kể cả những bài toán với số lượng biến rất lớn. Phương pháp SLP và phương pháp SQP đều là những phương pháp xấp xỉ. Phương pháp SLP xấp xỉ hàm mục tiêu và hàm ràng buộc bởi những đường thẳng tuyến tính tại những nghiệm tức thời của những vòng lặp trong quá trình giải. Phương pháp SQP xấp xỉ hàm mục tiêu và hàm ràng buộc bởi những phương trình phụ bậc hai. Cả hai phương pháp này chỉ có hiệu quả cao khi giải các bài toán tối ưu kiểu dáng vừa và nhỏ [10].

Trong tối ưu kiểu dáng có hai loại, đó là

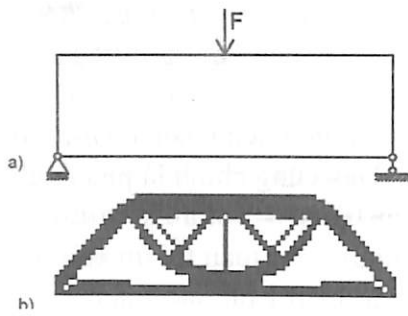
tối ưu kiểu dáng cấu trúc liên tục và tối ưu kiểu dáng cấu trúc rời rạc. Tối ưu kiểu dáng cấu trúc liên tục là tối ưu những cấu trúc khối tạo bởi những phần tử liên tiếp nhau, có thể ở dạng rắn hoặc rỗng. Đây cũng chính là phần nghiên cứu chủ yếu của bài báo. Tối ưu kiểu dáng cấu trúc rời rạc là những bài toán tối ưu cho những cấu trúc do phần tử rời rạc tạo thành như khung, giàn ... Phương pháp giải thuật di truyền GA rất hiệu quả trong việc giải các bài toán tối ưu hóa cấu trúc rời rạc. Nội dung cơ bản của phương pháp này là dựa trên thuật toán di truyền như trong sinh học. Phương pháp này đã được rất nhiều các nhà nghiên cứu trong những năm gần đây ứng dụng và phát triển mạnh mẽ.

Mặc dù có rất nhiều phương pháp tính nhưng hai phương pháp phần mềm CAE chọn để thực hiện tính toán tối ưu kiểu dáng là phương pháp OC và SCP. Hai phương pháp này đáp ứng đầy đủ và nhanh chóng cho ra kết quả tối ưu đối với tất cả các dạng vấn đề tối ưu kiểu dáng.

Quá trình tối ưu kiểu dáng theo những bước chính sau:

- 1) Tạo hình dáng ban đầu chi tiết và thiết lập thông số tải trọng, điều kiện biên (Hình 3a).
- 2) Định nghĩa hàm mục tiêu, hàm ràng buộc và các tham số điều khiển.
- 3) Tính toán dựa trên thuật toán để loại bỏ dần những vật liệu không cần thiết (theo chỉ tiêu loại bỏ của thuật toán).
- 4) Xác định xem kết cấu đã thỏa mãn điều kiện ràng buộc và yêu cầu kỹ thuật hay chưa.
- 5) Nếu chưa thì quay lại bước 3, còn thỏa mãn thì qua bước 6.
- 6) Xem kết quả (Hình 3b).





Hình 3. Tối ưu kiểu dáng

Tối ưu kiểu dáng vẫn đứng riêng rẽ trong khi tối ưu hóa hình dạng và kích thước đã được kết hợp thành một quá trình chung. Sự tách rời của tối ưu kiểu dáng này có thể bởi vì nó chỉ được dùng để tìm những ý tưởng thiết kế khi thiết kế sơ bộ, trong khi tối ưu hóa hình dạng và kích thước được dùng để thiết kế chi tiết ở những giai đoạn sau quá trình thiết kế.

Tuy nhiên, những yêu cầu từ các ngành công nghiệp đã chỉ ra rằng ngay từ lúc nghiên cứu ý tưởng cũng cần phải xem xét sự tác động của yếu tố tham số chính về hình dạng và kích thước đến tối ưu kiểu dáng. Do vậy, việc tập hợp ba phần tối ưu kiểu dáng, kích thước, hình dạng trong một phần mềm tối ưu không những cho phép sự tự do tìm thiết kế tốt hơn mà còn giúp cho việc đạt được mục tiêu hiệu quả hơn.

3. TÍNH TOÁN MỘT SỐ CHI TIẾT MÁY

Để minh họa cho công cụ tối ưu kiểu dáng và trình tự tính toán đã trình bày trong mục 2, ta thực hiện tính toán một số chi tiết máy trên phần mềm ANSYS.

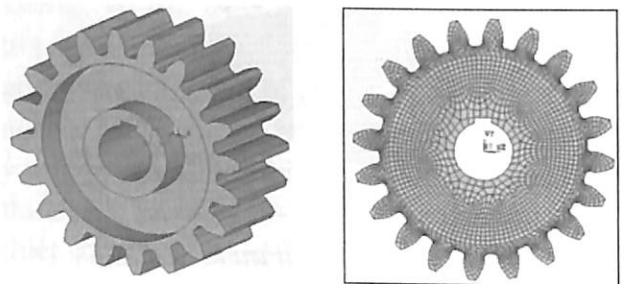
3.1. Tối ưu kiểu dáng và hình dạng bánh răng

Tối ưu hình dáng bánh răng trụ răng thẳng, các thông số hình học bánh răng đã tính toán [11].

Trình tự thực hiện:

Sử dụng phần tử 3D và 2D.

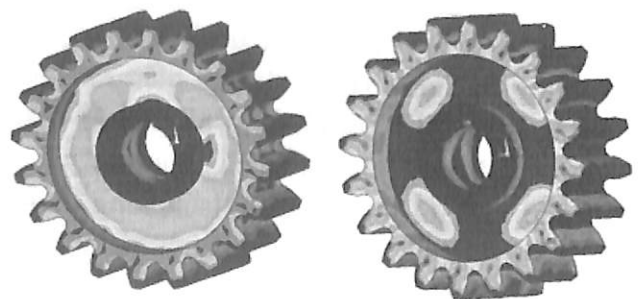
Bánh răng được thiết kế ban đầu như Hình 4a:



Hình 4: a) Mô hình 3D; b) Chia lưới

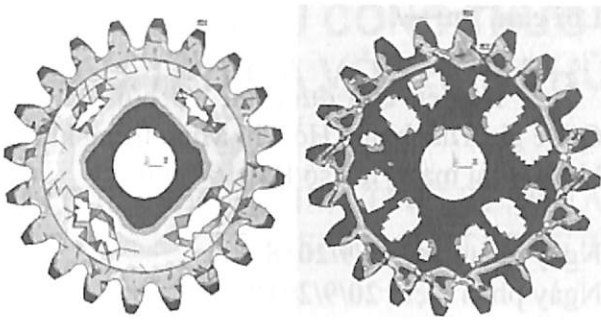
Mục tiêu tìm hình dáng lỗ khoét trên rãnh phụ thuộc vào tải trọng tác dụng. Đầu tiên ta gán lực vòng. Mục tiêu phân tối ưu hình dạng này là giảm thể tích mô hình solid từ 5% đến 95%.

Việc lựa chọn phần trăm giảm thể tích và số lần lặp đòi hỏi chạy chương trình rất nhiều lần, mất nhiều thời gian và cấu hình máy rất mạnh. Thực hiện theo trình tự các Hình 5 đến Hình 8.



Hình 5: a) Giảm 20% thể tích; b) Giảm 70% thể tích

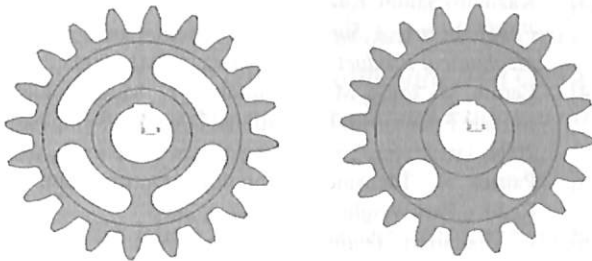
Sau khi loại bỏ các phần tử có mật độ phân bố thấp ta có Hình 6.



a) Phần tử 3D b) Phần tử 2D

Hình 6. Loại phần tử mật độ thấp

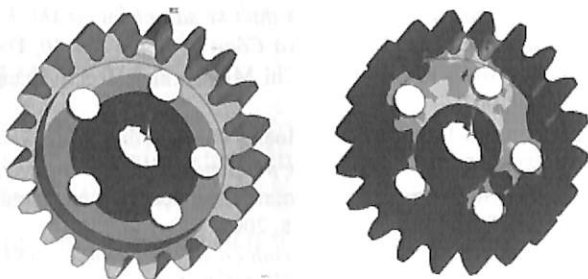
Hình dạng lỗ thứ hai với tỉ lệ phần trăm giảm thể tích đến 80% thể tích với số lần lặp là 30 như hình 6.



a) Phần tử 3D b) Phần tử 2D

Hình 7. Hình dạng lỗ

Sau đó tối ưu kích thước và hình dạng (Hình 8). Với mục tiêu thể tích nhỏ nhất và các ràng buộc về kích thước các chi tiết thành phần.



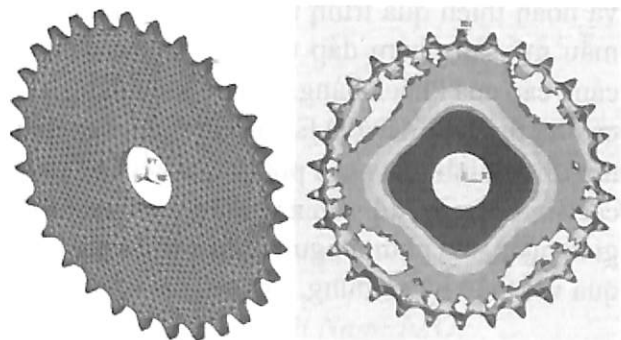
Hình 8: a) Kết quả chuyển vị; b) Kết quả ứng suất

Sau khi tính toán chuyển vị lớn nhất là 0,185mm (Hình 8a). Ứng suất lớn nhất quy về ứng suất Von Misses là 250,73N/mm² (Hình 8b).

Thể tích ban đầu: $V_1 = 9744880,22 \text{ mm}^3$ sau khi tối ưu: $V_1 = 6810900 \text{ mm}^3$. Phần trăm thể tích vật liệu được giảm 30%.

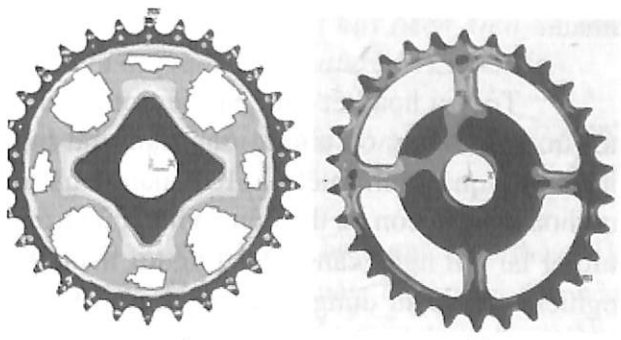
3.2 . Tối ưu kiểu dáng và hình dạng đĩa xích

Tối ưu hình dáng đĩa xích sử dụng các phần tử SOLID92 và PLANE82 (Hình 9, 10). Giả sử ban đầu thông số đĩa xích [11]: Đường kính vòng chia $d = 200 \text{ mm}$, đường kính vòng ngoài $d_a \approx 210 \text{ mm}$, đường kính đáy: $d_i = 185 \text{ mm}$, chiều dày $h = 5 \text{ mm}$.



a) b)

Hình 9: a) Mô hình lưới; b) Lặp 8 và giảm 40% thể tích: Loại bỏ các phần tử mật độ thấp hơn 0,5



a) b)

Hình 10: a) Mô hình lặp 12 lần giảm 50% thể tích b) Loại bỏ vật liệu có mật độ thấp hơn 0,5

Sau khi tối ưu thì chương trình vẽ số lỗ và kích thước thiết kế tối ưu cần thiết như bảng thông số. Chuyển vị lớn nhất là 0,0015mm. Ứng suất lớn nhất là 243 N/mm².

Thể tích vật liệu ban đầu: $V_1 = 139728mm^3$, sau tối ưu: $V_2 = 80095mm^3$. Phần trăm vật liệu được giảm 42,6%.

4. KẾT LUẬN

Qua bài báo này, đưa ra quá trình thiết kế tối ưu với các hệ thống CAD/CAE, những ý tưởng của tối ưu kiểu dáng, hình dạng và kích thước, cũng như khả năng và tính quan trọng của nó trong thiết kế để có thể cải thiện kiểu dáng, hình dạng và kích thước sản phẩm và hoàn thiện quá trình thiết kế sản phẩm, tạo mẫu mã sản phẩm đáp ứng tốt nhu cầu ngày càng cao của khách hàng. Tối ưu kiểu dáng trên các hệ thống CAD/CAE giúp ta giảm vật liệu, thu được hình dáng sản phẩm của kết cấu máy, các chi tiết máy, kết cấu xây dựng... Trong thời gian ngắn, mà những người đi trước đã phải trải qua vài thập kỷ sử dụng, tìm tòi, cải tiến.

Các kết quả trên khẳng định khả năng to lớn của tối ưu kiểu dáng trong việc tạo dáng sản phẩm, tiết kiệm vật liệu và có thể ứng dụng cho nhiều chi tiết máy và hệ thống cơ khí khác nhau.

Tối ưu hóa kết cấu, cụ thể trong bài là tối ưu kiểu dáng, có những ứng dụng rất hữu ích trong quá trình thiết kế. Khả năng của tối ưu hóa kết cấu còn có thể tiến xa hơn nữa trong tương lai khi ngày càng nhiều người tham gia nghiên cứu và sử dụng phần mềm hỗ trợ thiết kế. Qua bài báo này đưa ra quy trình và ứng dụng của tối ưu kiểu dáng, cũng như khả năng và tính quan trọng của nó trong thiết kế để có thể cải thiện kiểu dáng sản phẩm và hoàn thiện quá trình thiết kế sản phẩm nói chung và chi tiết máy nói riêng.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh trong khuôn khổ Đề tài mang mã số B2016-20-04. ❖

Ngày nhận bài: 07/9/2018

Ngày phản biện: 20/9/2018

Tài liệu tham khảo:

- [1]. A.A. Seireg, Jorge Rodriguez, *Optimizing the shape of mechanical elements and structures*, Marcel Dekker .
- [2]. Chih-Fu Wu, Chun-Yin Wu, Mu-Lin Lu, Yu-Mao Lin, *A Study on Computer Aided Optimization Design for the Frame Form Generation of Electric Bicycle*, 6th Asian Design International Conference, Japan, 2003.
- [3]. Kazuhiro Saltou, Kazuhro Izul, Shinji Nishiwaki, Panos Papalambros, *A Survey of Structural Optimization in Mechanical Product Development*, ASME, 2005.
- [4]. Eerme, M., Enok, M., Roosimolder, L., *Mass Reduction of Plate Frames*, 4th International DAAAM Symposium, 2004.
- [5]. Patrick A. Toensmeier, *Topology Optimization Can Reduce Part Weight and Cut Cost*, 2005.
- [6]. U. Sharamm, *Optimization Technology in Design – Trends, Direction, Gaps*, 6th World Congresses of Structural and Multidisciplinary Optimization, 2005.
- [7]. Sergey Ananiev, *On Equivalence between Optimality Criteria and Projected Gradient Methods with Application to Topology Optimization Problem*, Colloquium on Computer – Aided Optimization of Mechanical System, EUROMECH 442, 2003.
- [8]. Eylem Tekin, Ishan Sabuncuoglu, *Simulation optimization: A comprehensive review on theory and applications*, IIE Transactions, 2004, 36, 1067 – 1081.
- [9]. Nguyễn Như Ý, Nguyễn Hữu Lộc, *Ứng dụng tối ưu hóa kiểu dáng trong quá trình thiết kế sản phẩm cơ khí*, Kỷ yếu Hội nghị Khoa học và Công nghệ lần thứ 10, Đại học Bách Khoa TP Hồ Chí Minh, trang 50-55. Tháng 10/2007
- [10]. Nguyễn Hữu Lộc, Bùi Hoàng Giang, *Tối ưu hóa kiểu dáng kết cấu theo phương pháp mật độ và phương pháp tiến hóa*, Tạp chí Phát triển Khoa học và Công nghệ. 03/2008, Tập 11. Tr. 57-68, 2008.
- [11]. Nguyễn Hữu Lộc; *Giáo trình cơ sở thiết kế máy*. NXB. Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, 2018.