

## TÓM TẮT NHỮNG ĐÓNG GÓP MỚI CỦA LUẬN ÁN

Họ & tên NCS: Nguyễn Vĩnh Phối MSNCS: 1424005  
Thuộc chuyên ngành: Kỹ thuật cơ khí Khoá: 2014-2017  
Tên luận án: *Nghiên cứu ảnh hưởng của lớp phủ bề mặt đến độ bền  
mỏi của chi tiết máy dạng trục*  
Người hướng dẫn chính: PGS. TS. Đặng Thiện Ngôn  
Người hướng dẫn phụ: PGS. TS. Lê Chí Cương

### Tóm tắt những đóng góp mới về lý luận và học thuật của luận án:

Công nghệ mạ phủ bằng crôm cứng được nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi trong công nghiệp với các ưu điểm như có độ cứng cao, hệ số ma sát thấp và đặc biệt là giá thành rẻ. Tuy nhiên, phương pháp này có nhược điểm lớn là gây ra ô nhiễm môi trường và ảnh hưởng xấu đến sức khỏe của người vận hành hệ thống mạ. Vì vậy, hiện nay đã có nhiều phương pháp phủ được nghiên cứu phát triển để thay thế cho phương pháp này. Trong đó, phương pháp phủ nhiệt khí tốc độ cao (High Velocity Oxy Fuel - HVOF) sử dụng vật liệu phủ carbide vonfram thay cho phương pháp mạ crôm đang được xem là một trong các phương pháp thay thế hiệu quả. Các tính chất của lớp phủ này trong việc so sánh và đánh giá với lớp phủ crôm đã trở thành các hướng nghiên cứu đang được quan tâm. Các nghiên cứu trình bày trong luận án về việc đánh giá ảnh hưởng đến đặc tính mỏi của chi tiết trục được làm từ thép C45 phủ carbide vonfram và mạ crôm cứng dựa trên các tiêu chí: ứng suất dư, vết nứt tế vi, chiều dày lớp phủ là một đóng góp theo định hướng này. Kết quả nghiên cứu sẽ góp phần đề xuất các giải pháp phủ phù hợp cho chi tiết trục trong điều kiện làm việc thực tế. Từ đó, các nội dung chính trong luận án đã tập trung nghiên cứu và giải quyết các nhiệm vụ cụ thể sau:

- Khảo sát các tính chất bên trong của lớp mạ crôm và phủ carbide vonfram: trường ứng suất dư, mật độ vết nứt tế vi,... ứng với các chiều dày khác nhau;
- Đánh giá ảnh hưởng của chiều dày lớp mạ crôm, lớp phủ carbide vonfram đến độ bền mỏi trên nền thép C45 đã được nhiệt luyện;
- Thiết lập phương trình mỏi theo mô hình Basquin cho các chiều dày mạ phủ khác nhau cho lớp mạ crôm và lớp phủ carbide vonfram;

- So sánh, đánh giá, dự đoán độ bền mỏi của chi tiết trục được chế tạo trên nền thép C45 ứng với các chiều dày mạ phủ crôm cứng, carbide vonfram khác nhau.

Với lớp phủ mạ crôm cứng, kết quả nghiên cứu cho thấy ứng suất dư kéo luôn tồn tại trong lớp mạ crôm. Giá trị ứng suất dư giảm dần từ bề mặt lớp phủ đến bề mặt chi tiết nền thép C45. Chiều dày lớp phủ càng tăng thì độ bền mỏi giảm càng mạnh so với chi tiết nền, giá trị giảm tương ứng với chiều dày lớp phủ 10  $\mu\text{m}$ , 30  $\mu\text{m}$ , 60  $\mu\text{m}$  và 90  $\mu\text{m}$  là 2.3% , 6.97% 9.3 % và 11.62 %. Nguyên nhân quan trọng gây giảm độ bền mỏi của lớp phủ crôm là mặc dù ứng suất dư kéo có xu hướng giảm theo chiều dày lớp mạ nhưng mật độ vết nứt tế vi lại tăng. Chính lý do này đã gây ra giảm độ bền mỏi. Kết quả chụp mặt gãy mỏi (SEM) cũng đã chứng tỏ các vết nứt mỏi xuất phát từ vết nứt tế vi của lớp mạ crôm.

Với lớp phủ carbide vonfram, ứng suất dư nén luôn tồn tại trong lớp phủ. Đây là kết quả của sự va chạm của các hạt cứng WC với nền thép và do hệ số giãn nở nhiệt của lớp phủ nhỏ hơn hệ số giãn nở nhiệt của vật liệu nền nên sẽ tạo ra ứng suất nén. Khi tăng chiều dày lớp phủ, ứng suất nén có xu hướng tăng lên và khi khảo sát trường ứng suất dư cũng cho thấy ứng suất dư nén tăng dần từ bề mặt đến lớp tiếp giáp với vật liệu nền thép C45. Nguyên nhân là trước khi phủ, vật liệu nền được phun bi tạo độ nhám nhằm tăng độ bám dính với hạt  $\text{Al}_2\text{O}_3$  tạo nên biến dạng dẻo bề mặt nền và sinh ra ứng suất dư nén. Kết quả nghiên cứu cho thấy, độ bền mỏi của lớp phủ tăng theo chiều dày và giá trị tăng tương ứng với chiều dày lớp phủ 30  $\mu\text{m}$ , 60  $\mu\text{m}$ , 90  $\mu\text{m}$  là 4,65%, 6,97%, 10,46% so với nền thép.

*Tp. Hồ Chí Minh, ngày 10 tháng 03 năm 2020*

**Nghiên cứu sinh**

*(Ký và ghi rõ họ tên)*

**Nguyễn Vĩnh Phôi**

**Người hướng dẫn chính**

*(Ký và ghi rõ họ tên)*

**Người hướng dẫn phụ**

*(Ký và ghi rõ họ tên)*

PGS. TS. Đặng Thiện Ngôn

PGS. TS. Lê Chí Cường



substrate. The fatigue strength of coating sample decreases when compared to the substrate with 10  $\mu\text{m}$ , 30  $\mu\text{m}$ , 60  $\mu\text{m}$  and 90  $\mu\text{m}$  thickness are 2.3%, 6.97%, 9.3% and 11.62%, respectively. The main cause of the chromium coating's fatigue strength reduction is that the tensile residual stress tend to decrease with the coating thickness, but the microcracks density increases. It is this reason that reduces fatigue strength.

For the tungsten carbide coating, compressive residual stress always exists in the coating layer. The impaction of hard particles WC and substrate, the thermal expansion coefficient of the coating is smaller than that of the substrate which creates compressive stress. As the coating thickness increases, the compressive residual stress tends to increase. The residual stress gradient show that the residual stress increased from the surface coating layer to the substrate. The reason is that the substrate roughness induced by grit blasting using  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particles before coating process and compressive stress were formed in substrate surface. The fatigue strength of coating sample increase when compared to the substrate with 30  $\mu\text{m}$ , 60  $\mu\text{m}$  and 90  $\mu\text{m}$  thickness are 4.65%, 6.97% and 10.46%, respectively.

**Supervisor**

*(Sign and name)*

Assoc. Prof. PhD. Dang Thien Ngon

*HCMC, 10/03/2020*

**PhD candidate**

*(Sign and name)*

Nguyen Vinh Phoi

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT  
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH**

**---oo0oo---**

**NGUYỄN VĨNH PHỐI**

**NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA LỚP PHỦ BỀ  
MẶT ĐẾN ĐỘ BỀN MỎI CỦA CHI TIẾT MÁY  
DẠNG TRỤC**

**TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ**

**NGÀNH: KỸ THUẬT CƠ KHÍ**

**MÃ SỐ: 62520103**

**Tp. Hồ Chí Minh, tháng 03/2020**

## MỞ ĐẦU

### 1. Đặt vấn đề

Các chi tiết máy sau một thời gian làm việc nhất định sẽ bị mài mòn dẫn đến không đảm bảo được yêu cầu hoạt động hoặc bị phá hủy. Để tiết kiệm chi phí chế tạo gia công chi tiết mới, các chi tiết bị mài mòn trước khi bị phá hủy sẽ được phục hồi bằng các phương pháp như mạ phủ, hàn đắp và phun phủ. Trong đó, phương pháp mạ phủ được nghiên cứu và ứng dụng khá rộng rãi. Trong số các vật liệu mạ phủ, crôm được sử dụng nhiều nhất để tăng bền cho bề mặt chi tiết với các tính chất như chống mài mòn, kháng ăn mòn tốt, độ cứng cao,.... trong mạ phục hồi các chi tiết máy, khuôn đúc. Bên cạnh những ưu điểm trên, mạ crôm có một nhược điểm lớn là gây ô nhiễm môi trường và ảnh hưởng đến sức khỏe của người công nhân vận hành thiết bị mạ. Vì vậy, ở các nước tiên tiến trên thế giới đã có một số nghiên cứu về những phương pháp phủ mới để dần thay thế cho phương pháp mạ crôm. Một trong những phương pháp tiên tiến hiện nay có khả năng thay thế cho mạ crôm là phương pháp phủ nhiệt khí tốc độ cao (High Velocity Oxygen-Fuel - HVOF). Vật liệu sử dụng để phủ lên bề mặt chi tiết khi ứng dụng phương pháp HVOF khá đa dạng, trong đó vật liệu carbide vonfram (WC-10Co-4Cr) đã cho thấy là một trong các vật liệu phủ có tính chất cơ học tốt nhất để thay thế cho mạ crôm.

Độ bền mỏi của chi tiết là một trong các thông số quan trọng để đánh giá tuổi thọ của chi tiết, đặc biệt là các chi tiết dạng trục [1]. Do vậy, sau khi mạ phủ phục hồi, độ bền mỏi của chi tiết cũng là một trong các tính chất cơ học được quan tâm. Quá trình phá hủy mỏi xảy ra khi chi tiết máy chịu ứng suất thay đổi theo chu kỳ, bắt đầu từ những vết nứt tế vi sinh ra từ vùng chi tiết máy chịu ứng suất đủ lớn và thường xuất hiện từ bề mặt ngoài phát triển vào bên trong chi tiết [1]. Với định hướng trên, việc đánh giá ảnh hưởng của lớp phủ bằng phương pháp mạ crôm cứng và phủ HVOF với vật liệu WC-10Co-4Cr trên nền thép C45 chi tiết dạng trục là một trong các nội dung nghiên cứu chính của đề tài "*Nghiên cứu ảnh hưởng của lớp phủ bề mặt đến độ bền mỏi của chi tiết máy dạng trục*".

### 2. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài

#### 2.1 Ý nghĩa khoa học

- Xây dựng phương trình đường cong mỏi theo mô hình Basquin dựa vào chiều dày của lớp mạ crôm và lớp phủ carbide vonfram WC-10Co-4Cr giúp dự đoán được độ bền mỏi tương ứng với chiều dày lớp mạ xác định.

- Đề xuất cách thức tính toán sự thay đổi của ứng suất dư giúp xác định quan hệ giữa ứng suất dư với độ bền mỏi cũng như mật độ của vết nứt tế vi xuất hiện trong lớp mạ phủ ứng với một chiều dày xác định của lớp mạ.

- Đối với lớp mạ crôm, ứng suất dư kéo giảm theo chiều dày mạ nhưng mật độ vết nứt lại tăng, điều này làm độ bền mỏi giảm khi chiều dày lớp mạ tăng. Trong khi đó, ứng suất dư nén tăng theo chiều dày của lớp phủ carbide

vonfram WC-10Co-4Cr trên nền thép C45 nên độ bền mỏi có xu hướng tăng tương ứng.

## **2.2 Ý nghĩa thực tiễn**

Nghiên cứu này góp phần phát triển công nghệ phun phủ HVOF, góp phần ứng dụng công nghệ tiên tiến, năng suất và chất lượng cao này trong phủ bề mặt cũng như phục hồi chi tiết máy ở Việt Nam.

Các kết quả nghiên cứu của luận án chỉ ra khả năng và phạm vi áp dụng mạ crôm cứng, phun phủ HVOF với vật liệu carbide vonfram (WC-10Co-4Cr) lên nền thép C45 trong công nghệ phục hồi chi tiết máy với các chiều dày lớp phủ 10, 30, 60 và 90  $\mu\text{m}$ .

## **3. Mục tiêu nghiên cứu**

### **3.1 Mục tiêu chung**

Nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của lớp phủ bề mặt đến độ bền mỏi của chi tiết máy dạng trục khi được mạ crôm cứng và phủ carbide vonfram (bằng phương pháp phủ HVOF) trên nền thép C45 ứng với các chiều dày mạ phủ khác nhau.

### **3.2 Mục tiêu cụ thể**

- Phân tích, đánh giá ảnh hưởng của các thông số của lớp mạ (chiều dày, ứng suất dư, mật độ vết nứt tế vi) của lớp mạ crôm đến độ bền mỏi của chi tiết máy dạng trục.
- Phân tích, đánh giá ảnh hưởng của các thông số của lớp phủ (chiều dày, ứng suất dư) của lớp phủ carbide vonfram đến độ bền mỏi của chi tiết máy dạng trục.
- So sánh đánh giá độ bền mỏi của 2 phương pháp trên các chiều dày lớp mạ phủ khác nhau.
- Xác định được thông số tối ưu của lớp phủ (chiều dày, ứng suất dư) để nâng cao độ bền mỏi của chi tiết máy.

## **4. Đối tượng, phạm vi nghiên cứu**

### **4.1 Đối tượng nghiên cứu**

- Chi tiết máy dạng trục chịu tải theo chu kỳ;
- Lớp mạ phủ crôm và carbide vonfram lên nền thép C45 chi tiết dạng trục.

### **4.2 Phạm vi nghiên cứu**

- Vật liệu nền: thép C45.
- Vật liệu mạ phủ: crôm (mạ điện) và carbide vonfram (WC-10Co-4Cr) (phun phủ HVOF).
- Chiều dày lớp phủ từ 10  $\mu\text{m}$  đến 90  $\mu\text{m}$ .
- Quy trình mạ phủ, phun phủ HVOF sử dụng các quy trình chuẩn trong công nghiệp hiện đang được sử dụng rộng rãi trong các cơ sở, xí nghiệp mạ ở Việt Nam (các thông số của quá trình mạ phủ sẽ không được nghiên cứu trong đề tài).

## 5. Phương pháp tiếp cận

Để thực hiện được các mục đích nghiên cứu của luận án, tác giả sử dụng phương pháp tiếp cận như sau:

- Nghiên cứu tài liệu để tìm hiểu các công trình đã công bố liên quan đến đề tài ở trong và ngoài nước. Từ đó xác định rõ những gì đã được công bố và tìm ra những nội dung mới mà luận án cần phải giải quyết. Khảo sát, tìm hiểu về cơ sở vật chất và các trang thiết bị sẵn có để lựa chọn thực hiện luận án.

- Nghiên cứu các công nghệ mạ phủ: quy trình mạ crôm cứng, quy trình phủ HVOF với các nội dung: nguyên lý, thiết bị, vật liệu, các thông số công nghệ.

- Nghiên cứu phương pháp đo nhiễu xạ X-quang để xác định ứng suất dư của lớp mạ phủ.

- Sử dụng các trang thiết bị sẵn có phù hợp với điều kiện thực nghiệm để chế tạo mẫu thí nghiệm; kiểm tra cơ tính và phân tích tổ chức tế vi của kim loại nền; tiến hành đo chiều dày và ứng suất dư ứng với từng chiều dày cụ thể; thí nghiệm kiểm tra đánh giá độ bền mỏi của từng phương pháp mạ phủ.

- Xây dựng mô hình, thực nghiệm và xử lý số liệu thực nghiệm để tìm ra phương trình đường cong mỏi cho từng phương pháp phủ ứng với các chiều dày khác nhau nhằm xác định được phương pháp phủ và chiều dày phủ hợp lý.

## 6. Kết cấu của luận án

Kết cấu của luận án gồm các phần:

- Mở đầu
- Chương 1: Tổng quan
- Chương 2: Nội dung và phương pháp nghiên cứu
- Chương 3: Cơ sở lý thuyết
- Chương 4: Kết quả nghiên cứu
- Kết luận và kiến nghị

### Chương 1. TỔNG QUAN

#### 1.1 Tổng luận các công trình đã công bố về vấn đề nghiên cứu

##### 1.1.1 Các nghiên cứu của nước ngoài

Các nghiên cứu ở nước ngoài cho thấy: lớp mạ crôm cứng được ứng dụng nhiều để tăng độ cứng, khả năng chống mài mòn, ăn mòn và hệ số ma sát thấp để ứng dụng trong các lĩnh vực hàng không vũ trụ, ô tô và hóa dầu. Các tính chất như: ứng suất dư, độ cứng tế vi... của lớp mạ crôm được đánh giá tốt. Bên cạnh đó, một số nghiên cứu cũng cho thấy ứng suất dư kéo và mật độ vết nứt tế vi của crôm gây giảm độ bền mỏi và hầu hết các nghiên cứu được thực hiện trên nền thép có độ bền cao: thép AISI 4340, kim nhôm Al 2024-T4, vật liệu 12CrMoV,...



Trong thời gian gần đây, công nghệ phủ HVOF đã và đang được nghiên cứu. Phương pháp này có thể phủ với nhiều loại vật liệu. Tuy nhiên với vật liệu carbide vonfram với thành phần chủ yếu là pha WC và chất kết dính Co được chú trọng nghiên cứu nhiều nhất. Với tính chất ưu việt của loại vật liệu này, chúng được ứng dụng nhiều trong quá trình phủ các chi tiết trong ngành hàng không, khai thác mỏ, dầu khí...và đặc biệt nó có thể thay thế cho mạ crôm cứng. Một số nghiên cứu bước đầu thực hiện đánh giá về lớp phủ cacbire vonfram này. Các thông số: ứng suất dư, độ bám dính, độ cứng...cũng được đánh giá. Độ bền mỏi cũng được nghiên cứu, đánh giá nhưng khi phủ trên các vật liệu khác nhau lại cho kết quả tăng hoặc giảm. Điều này cho thấy quá trình phủ là hết sức phức tạp.

Tuy nhiên, nhiều nghiên cứu cũng cho thấy sự ảnh hưởng của lớp phủ đến vật liệu nền khi áp dụng quy trình nhiệt luyện hay không sẽ cho kết quả khác nhau.

### **1.1.2 Các nghiên cứu trong nước**

Hiện nay, ở nước ta công nghệ xử lý bề mặt đang được quan tâm và phát triển, đặc biệt là mạ điện. Với ưu điểm là nâng cao chất lượng bề mặt, tăng khả năng chịu mài mòn, ăn mòn, tăng độ cứng bề mặt...đây là một công nghệ hứa hẹn sẽ là lĩnh vực chú trọng nghiên cứu trong thời gian tới. Một số công trình nghiên cứu về mạ composite trên một số chi tiết máy, nâng cao tính năng ma sát của lớp mạ xoa đồng và niken...đã được thực hiện. Bên cạnh đó, công nghệ phun phủ nhiệt cũng đã bước đầu được nghiên cứu nhưng chỉ dừng lại nghiên cứu các tính chất như độ cứng, bám dính, mài mòn ở hợp kim 67Ni18Cr5Si4B, hợp kim  $Cr_3C_2 - NiCr$  để phục hồi chi tiết.

## **1.2 Các tồn tại và định hướng nghiên cứu**

### **1.2.1 Các tồn tại**

Qua phân tích các công trình nghiên cứu cho thấy các nghiên cứu tập trung vào việc nâng cao chất lượng lớp bề mặt của chi tiết bằng cách phủ một lớp vật liệu có tính chịu nhiệt, chịu mài mòn nhằm đáp ứng các điều kiện làm việc khác nhau của chi tiết. Bên cạnh đó, các thông số của lớp phủ như độ bám dính, ứng suất dư,... và đặc biệt là độ bền mỏi của lớp phủ được chú trọng nghiên cứu. Đánh giá về độ bền mỏi của lớp phủ khi sử dụng phương pháp phủ HVOF và mạ crôm cứng đã có một số nghiên cứu nhưng chỉ tập trung trên nền thép có độ bền cao như thép không gỉ. Ngoài ra, các nghiên cứu cũng chỉ được thực hiện trên một chiều dày phủ cụ thể. Do vậy, các kết quả nghiên cứu đã công bố chưa chỉ ra được sự thay đổi, ảnh hưởng đến tính chất lớp phủ và độ bền mỏi khi chiều dày phủ biến thiên. Bên cạnh đó, ảnh hưởng đến độ bền mỏi của việc áp dụng chế độ nhiệt luyện cho vật liệu nền của chi tiết cũng chưa được quan tâm nghiên cứu.

Kết quả khảo sát cũng cho thấy, chưa có nghiên cứu, đánh giá nào về tính chất của lớp phủ carbide vonfram WC-10Co-4Cr (phủ HVOF), lớp mạ

crôm lên bề mặt thép C45 đã được nhiệt luyện theo chế độ chi tiết trục với các chiều dày khác nhau ảnh hưởng độ bền mỏi. Vì vậy, việc tiến hành nghiên cứu, đánh giá độ bền mỏi của lớp phủ carbide vonfram WC-10Co-4Cr, lớp mạ crôm trên nền thép C45 (đã được nhiệt luyện theo chế độ trục) là rất cần thiết, có ý nghĩa lớn trong thực tiễn chế tạo cơ khí, phục hồi các chi tiết trục.

### **1.2.2 Định hướng nghiên cứu**

Trong nghiên cứu này, những nội dung sau được chú trọng nghiên cứu:

- Nghiên cứu quy trình xử lý thô và tạo hạt nhỏ để tạo tính đẳng hướng trong chi tiết trục áp dụng thép C45
- Nghiên cứu quy trình nhiệt luyện cho tiết trục áp dụng thép C45
- Nghiên cứu quy trình mạ crôm cứng và phủ carbide vonfram WC-10Co-4Cr lên chi tiết trục theo qui trình chuẩn công nghiệp hiện nay.
- Đánh giá sự thay đổi của ứng suất dư và mật độ tế vi khi mạ phủ với các chiều dày khác nhau.
- Đánh giá và so sánh ảnh hưởng của chiều dày lớp mạ crôm cứng và phủ carbide vonfram WC-10Co-4Cr đến độ bền mỏi của chi tiết trục C45.

## **Chương 2. NỘI DUNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU**

### **2.1 Nội dung nghiên cứu**

Các nội dung sau đây sẽ được tập trung nghiên cứu:

- *Nghiên cứu tổng quan về công nghệ, kỹ thuật chế tạo chi tiết máy dạng trục có mạ phủ*
- *Nghiên cứu đề xuất kết cấu, kích thước và quy trình chế tạo chi tiết mẫu*
- *Nghiên cứu ảnh hưởng của chiều dày lớp mạ crôm đến độ bền mỏi của chi tiết máy dạng trục*
- *Nghiên cứu, đánh giá ảnh hưởng của lớp phủ carbide vonfram (WC-10Co-4Cr) đến độ bền mỏi của chi tiết máy dạng trục*

### **2.2 Phương pháp nghiên cứu**

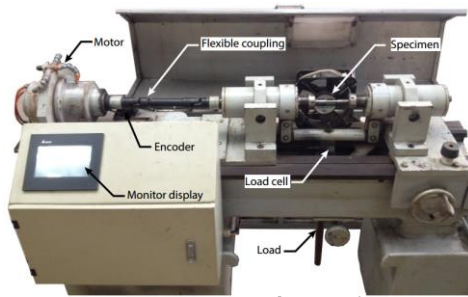
- Phương pháp kế thừa
- Phương pháp thu thập thông tin
- Phương pháp nghiên cứu thực nghiệm

#### **2.2.1 Vật liệu và thiết bị thực nghiệm**

- Vật liệu thực nghiệm:
  - + Vật liệu nền: thép C45
  - + Vật liệu phủ: crôm và carbide vonfram.

#### **2.2.2 Trang thiết bị phục vụ thực nghiệm**

Để phục vụ cho nghiên cứu thực nghiệm của luận án, thiết bị thí nghiệm mỏi uốn đa năng MU-2016 tại phòng thí nghiệm REME Lab (Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp. Hồ Chí Minh) được sử dụng.



**Hình 2.1** Máy thí nghiệm môi uốn 4 điểm MU-2016

Ngoài ra, một số thiết bị được sử dụng để đánh giá các tính chất của lớp phủ: chiều dày lớp phủ, ứng suất dư, khảo sát mặt gãy môi của chi tiết được giới thiệu ở hình 2.2.



a) Lò nung Thermal Electric Furnace (Nhật)



b) Thiết bị đo chiều dày lớp phủ MiniTest 600B-Elektrophysik



c) Máy nhiễu xạ tia X - X'Pert Pro



d) Hệ thống SEM-S4800

**Hình 2.2** Một số thiết bị chính được sử dụng trong nghiên cứu

### 2.2.3 Xử lý số liệu thực nghiệm

- Phần mềm Matlab, MicroSoft Excel
- Phần mềm nội suy đỉnh nhiễu xạ OriginPro 8.5.1

## Chương 3. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

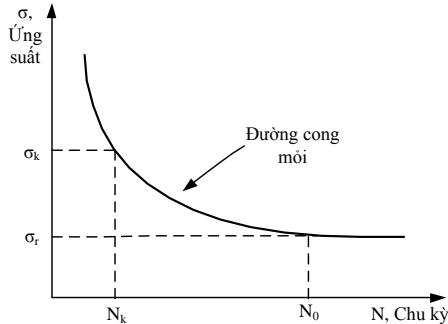
### 3.1 Hiện tượng môi

Hiện tượng môi (hay sự môi) là quá trình tích lũy dần dần sự phá hỏng trong bản thân vật liệu dưới tác động của ứng suất thay đổi theo thời gian. Ứng

suất thay đổi này làm xuất hiện các vết nứt nhỏ, sau đó các vết nứt nhỏ ấy phát triển và dẫn tới sự phá hủy vật liệu (sự phá hủy vì mỏi).

### 3.1.1 Đường cong mỏi

Trên sở kết quả thí nghiệm mỏi, đường cong mỏi được thiết lập nhằm biểu diễn mối quan hệ giữa ứng suất  $\sigma$  (ứng suất lớn nhất) với số chu kỳ thay đổi ứng suất  $N$  mà chi tiết máy (hoặc mẫu thử nghiệm) chịu được cho đến khi hỏng (hình 3.1).



**Hình 3.1** Đường cong mỏi Wöhler [1]

Số chu kỳ  $N$  được gọi là tuổi thọ tương ứng với mức ứng suất  $\sigma$ . Đồ thị đường cong mỏi có dạng như hình 3.1.

Qua đồ thị đường cong mỏi ta thấy:

- Khi ứng suất càng cao thì tuổi thọ càng giảm
- Nếu giảm ứng suất đến một giới hạn  $\sigma_r$  nào đó đối với một số loại vật liệu, tuổi thọ  $N$  có thể tăng lên khá lớn mà chi tiết không bị phá hủy. Trị số  $\sigma_r$  được gọi là giới hạn bền mỏi (dài hạn) của vật liệu.

Phương trình đường cong mỏi có thể viết dưới dạng:

$$\sigma^m \cdot N = C \quad (3.1)$$

Với  $C$ ,  $m$  là hằng số và  $m$  (số mũ) được gọi là bậc của đường cong mỏi. Phương trình (3.1) biểu diễn mối quan hệ giữa ứng suất  $\sigma$  và tuổi thọ  $N$  trong miền ứng suất có trị số nằm ngang trong khoảng giới hạn chảy  $\sigma_{ch}$  và giới hạn bền mỏi  $\sigma_r$  của vật liệu. Từ phương trình (3.1) ta có thể xác định tuổi thọ  $N_k$  của vật liệu chịu ứng suất thay đổi  $\sigma_k$  ( $\sigma_r < \sigma_k < \sigma_{ch}$ ). Ứng suất  $\sigma_r$  gọi là giới hạn mỏi ngắn hạn tương ứng với tuổi thọ  $N_k$  của vật liệu. Trong hệ tọa độ logarit  $\lg\sigma - \lg N$ , phương trình (3.1) được biểu diễn bằng đường thẳng:

$$m \lg \sigma + \lg N = \lg C \quad (3.2)$$

Đồ thị đường cong mỏi trong hệ tọa độ bán  $\lg\sigma - \lg N$  có nhánh riêng là đường thẳng có phương trình:

$$N^k \cdot 10^\sigma = B \quad (3.3)$$

trong đó  $k$  và  $B$  là hằng số.

Phương trình đường cong S-N được thể hiện bằng quan hệ sau đây được Basquin đề xuất và được gọi là phương trình Basquin [46]:

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (3.4)$$

trong đó

$\sigma_a$  - biên độ ứng suất

$\sigma'_f$  - hệ số độ bền mỏi

$2N_f$  - số chu kỳ phá hủy

$b$  - hệ số mũ Basquin,  $b = -0,05$  đến  $-0,12$

Đường biểu diễn của phương trình (3.1) sẽ có tiệm cận là trục hoành N. Điều này không đúng với vật liệu gang hoặc thép vì đường cong mỏi của chúng sẽ có có đường tiệm cận song song với trục hoành và cách trục hoành một khoảng bằng trị số giới hạn bền mỏi dài hạn của vật liệu. Vì vậy, trên cơ sở của phân tích theo toán học thống kê các số liệu thí nghiệm, Weibull biểu thị đường cong mỏi bằng phương trình:

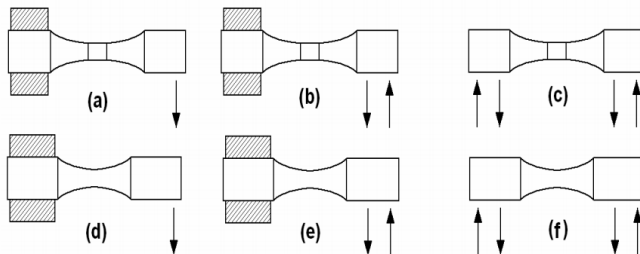
$$N = \frac{B}{(\sigma - \sigma_r)^m} \quad (3.5)$$

Từ (3.5) khi  $\sigma \rightarrow \sigma_r$  thì  $N \rightarrow \infty$ , nghĩa là đường thẳng mỏi nằm ngang cách trục hoành một khoảng  $\sigma_r$ . được gọi là tiệm cận của đường cong mỏi.

### 3.2 Tiêu chuẩn ISO 1143-2010

Quá trình thực hiện thí nghiệm độ bền mỏi cho vật liệu kim loại có thể dựa vào các tiêu chuẩn quốc tế như JSME S002, ASTM E739 và ISO 1143-2010. Trong đó tiêu chuẩn ISO 1143-2010 được sử dụng nhiều hơn cả và tương thích với tiêu chuẩn Việt Nam (TCVN).

Trong tiêu chuẩn ISO 1143-2010 trình bày cụ thể các phương pháp đánh giá mỏi theo môi uốn: phương pháp uốn 1 điểm, phương pháp uốn 2 điểm và phương pháp uốn 4 điểm.



**Hình 3.2** Các dạng mẫu thử nghiệm mỏi theo tiêu chuẩn ISO 1143-2010

Cả 3 phương pháp này có thể áp dụng cho 2 loại mẫu: dạng trụ (a, b, c) và dạng yên ngựa (d, e, f).

Mẫu dạng trụ 3.2c sử dụng cho phương pháp thử mỏi uốn 4 điểm được chọn thực hiện trong nghiên cứu này. Loại mẫu này thuận lợi cho quá trình đo chiều dài và nhiễu xạ tia X lớp phủ.

### 3.3 Nhiễu xạ X-quang và ứng dụng đo ứng suất dư

#### 3.3.1 Định luật Bragg và điều kiện nhiễu xạ [59]

Khi chiếu tia X có bước sóng ( $10^{-4} - 10^2 \text{ \AA}$ ) tương ứng với khoảng cách giữa các mặt phẳng nguyên tử vào vật rắn tinh thể sẽ xuất hiện các tia nhiễu xạ với cường độ và các phương khác nhau, các phương nhiễu xạ phụ thuộc vào bước sóng của bức xạ tới và bản chất của mẫu tinh thể. Định luật Bragg thiết lập mối quan hệ giữa bước sóng tia X và khoảng cách giữa các mặt nguyên tử:

$$n\lambda = 2d_{hkl}\sin\theta \quad (3.6)$$

trong đó  $n = 1, 2, 3, \dots$  được gọi là bậc phản xạ.

#### 3.3.2 Nguyên lý đo ứng suất dùng nhiễu xạ X quang

Ứng suất dư được xác định từ vị trí đỉnh của hình nhiễu xạ, khi xuất hiện ứng suất trong lớp bề mặt thì khoảng cách  $d_{hkl}$  giữa các mặt nguyên tử sẽ thay đổi. Từ việc tính toán vị trí đỉnh nhiễu xạ ta có thể tính toán ứng suất thông qua biến dạng.

Theo định luật Hooke, biến dạng đàn hồi đẳng hướng qua biến đổi có thể xác định thông qua công thức sau [59]:

$$\begin{aligned} \varepsilon'_{\varphi,\psi} = \varepsilon_{33}^L = & \frac{1+\nu}{E} (\sigma_{11} \cos^2 \varphi + \sigma_{12} \sin 2\varphi + \sigma_{22} \sin^2 \varphi - \sigma_{33}) \sin^2 \psi \\ & + \frac{1+\nu}{E} \sigma_{33} - \frac{\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) \\ & + \frac{1+\nu}{E} (\sigma_{13} \cos \varphi + \sigma_{23} \sin \varphi) \sin 2\psi \end{aligned} \quad (3.7)$$

Hoặc có thể viết (3.7) dưới dạng:

$$\varepsilon'_{\varphi,\psi} = \frac{d_{\varphi\psi} - d_0}{d_0} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{\varphi} \sin^2 \psi - \frac{\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad (3.8)$$

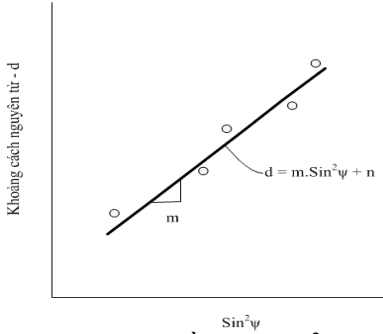
trong đó:  $\sigma_{\varphi} = \sigma_{11} \cos^2 \varphi + \sigma_{12} \sin 2\varphi + \sigma_{22} \sin^2 \varphi$

Từ phương trình (3.8), khoảng cách nguyên tử  $d_{\varphi,\psi}$  được tính theo công thức:

$$d_{\varphi\psi} = d_0 \frac{1+\nu}{E} \sigma_{\varphi} \sin^2 \psi - d_0 \frac{\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22}) + d_0 \quad (3.9)$$

Đây là phương trình thể hiện mối quan hệ  $d_{\varphi,\psi} - \sin^2 \psi$  có hệ số góc  $m$  là:

$$m = d_0 \frac{1+\nu}{E} \sigma_{\varphi} \quad (3.10)$$



**Hình 3.3** Đồ thị  $d\text{-Sin}^2\psi$

Từ phương trình (3.10), ứng suất dư có thể được xác định thông qua hệ số góc  $m$  là:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{m}{d_0} \left( \frac{E}{1+\nu} \right) \quad (3.11)$$

Với  $d_0$  là khoảng cách mặt tinh thể ở trạng thái không ứng suất được tính trên đồ thị  $d\text{-Sin}^2\psi$  ứng với giá trị:

$$\text{Sin}^2\psi^* = \frac{\nu}{1+\nu} \quad (3.12)$$

### 3.3 Tính sai số cho ứng suất

Vì các cặp số  $(\text{sin}^2\psi_1, d_1)$ ,  $(\text{sin}^2\psi_2, d_2)$ , ...,  $(\text{sin}^2\psi_n, d_n)$  nhận được từ thí nghiệm chỉ là những giá trị gần đúng của  $\text{sin}^2\psi, d$  nên chúng không hoàn toàn nghiệm đúng phương trình  $d = m.\text{sin}^2\psi + n$ . Vì vậy, ta phải xác định sai số trong quá trình tính toán ứng suất dư, nghĩa là:

$$\begin{aligned} d_1 - m \text{sin}^2\psi_1 - n &= v_1 \\ d_2 - m \text{sin}^2\psi_2 - n &= v_2 \\ &\dots\dots\dots \\ d_n - m \text{sin}^2\psi_n - n &= v_n \end{aligned}$$

trong đó các  $v_i$  là các sai số.

Trong luận án, phương pháp bình phương tối thiểu được sử dụng để xác định tổng sai phân  $S$ :

$$S = \sum_{j=1}^n v_j^2 = (m.\text{sin}^2\psi_j + n - d_j) \rightarrow \min \quad (3.13)$$

Vậy  $m, n$  phải thoả phương trình:

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial m} = \sum_{j=1}^n \text{sin}^2\psi_j (d_j - m.\text{sin}^2\psi_j - n) = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial n} = \sum_{j=1}^n (d_j - m.\text{sin}^2\psi_j - n) = 0 \end{cases} \quad (3.14)$$

Giải phương trình trên ta được:

$$m = \frac{\sum_{j=1}^n (n \cdot \sin^2 \psi_j - \sum_{j=1}^n \sin^2 \psi_j) d_j}{n \sum_{j=1}^n \sin^2 \psi_j - (\sum_{j=1}^n \sin^2 \psi_j)^2}$$

$$n = \frac{\sum_{j=1}^n (1 - A_j \sum_{j=1}^n \sin^2 \psi_j) d_j}{n}$$

Với 
$$A_j = \frac{n \cdot \sin^2 \psi_j - \sum_{j=1}^n \sin^2 \psi_j}{n \sum_{j=1}^n \sin^2 \psi_j - (\sum_{j=1}^n \sin^2 \psi_j)^2} \quad (3.15)$$

Từ công thức (3.11) ta có ứng suất viết lại theo tính toán đỉnh nhiễu xạ:

$$\sigma_\phi = K \cdot m = K \cdot \sum_{j=1}^n A_j p_j$$

Với  $K = \frac{-E}{2(1+\nu) \tan \theta_0} \cdot \frac{\pi}{180}$  là hệ số ứng suất.

Sai số ứng suất:

$$\sigma_s^2 = \sum_{j=1}^n \left( \frac{\partial \sigma_\phi}{\partial p_j} \right)^2 \cdot \sigma_{p_j}^2 = K^2 \cdot \sum_{j=1}^n A_j^2 \sigma_{p_j}^2 \quad (3.16)$$

trong đó:  $\sigma_{p_j}$  là sai số đỉnh nhiễu xạ.

Vậy sai số của ứng suất:

$$\sigma_s = K \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^n A_j^2 \sigma_{p_j}^2} \quad (3.17)$$

Từ đó 95% tin cậy của giá trị ứng suất được tính toán là:

$$\Delta \sigma_\phi = \pm 1.96 \sigma_s \quad (3.18)$$

## Chương 4. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

### 4.1 Nghiên cứu đề xuất kết cấu và quy trình chế tạo chi tiết mẫu

#### 4.1.1 Vật liệu nền

Nguồn thép C45 sử dụng trong nghiên cứu được sản xuất ở Nhật. Để xác định các thành phần hoá học của nguồn thép C45 này, các mẫu kiểm tra thành phần hoá học và cho kết quả như ở bảng 4.1.

**Bảng 4.1:** Các thành phần nguyên tố của thép C45 (Nhật)

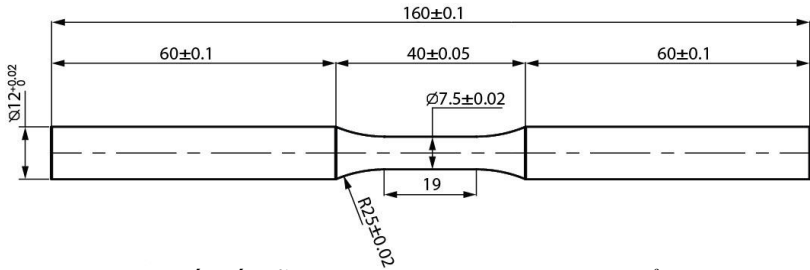
Nguyên tố	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu
Thành phần (%)	0,46	0,21	0,64	0,021	0,007	0,04	0,09	0,16



## 4.1.2 Kết cấu chi tiết mẫu

### 4.1.2.1 Đề xuất chi tiết mẫu thí nghiệm mỏi

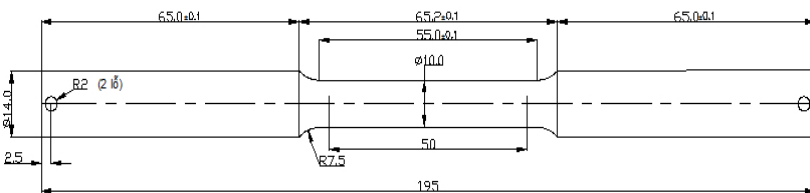
Dựa vào tiêu chuẩn ISO 1143:2010 và điều kiện thực tế của máy thí nghiệm mỏi, mẫu chi tiết thí nghiệm kiểm tra độ bền mỏi chế tạo từ thép C45 được đề xuất như ở hình 4.1.



**Hình 4.1** Bản vẽ thiết kế mẫu thí nghiệm mỏi theo tiêu chuẩn ISO 1143:2010

### 4.1.2.2 Đề xuất chi tiết mẫu thí nghiệm kéo nén

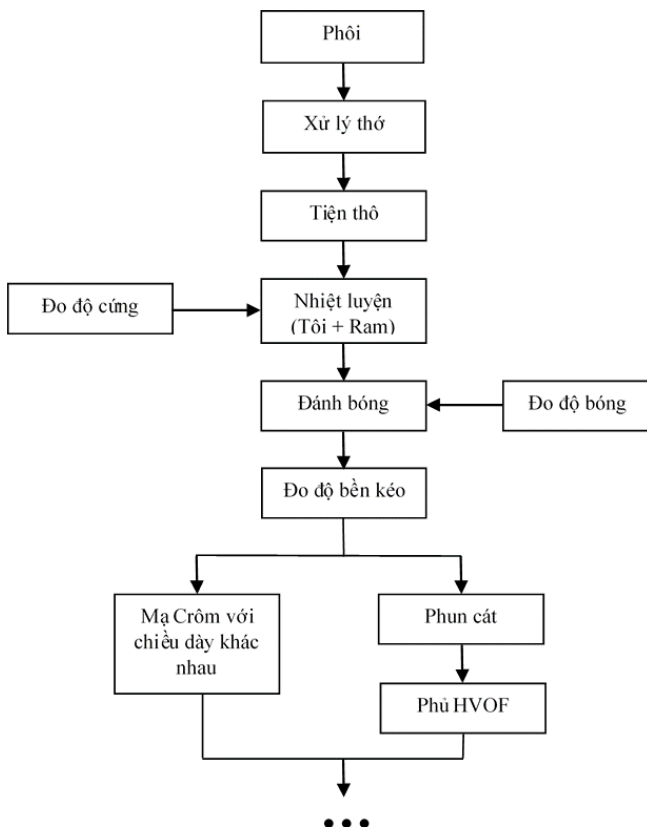
Dựa vào tiêu chuẩn ISO 6892-1(2009) và thông số kỹ thuật của máy kiểm tra độ bền kéo, mẫu chi tiết thí nghiệm kiểm tra độ bền kéo chế tạo từ thép C45 được đề xuất như ở hình 4.2.



**Hình 4.2** Bản vẽ thiết kế mẫu thử độ bền kéo

## 4.1.3 Quy trình chế tạo chi tiết mẫu

Theo tiêu chuẩn ISO 1143:2010, tiêu chuẩn về thí nghiệm mỏi uốn quay bốn điểm, để có thể có được kết quả thí nghiệm với độ tin cậy cao thì chi tiết mẫu thí nghiệm yêu cầu phải đạt được tính đồng hướng, đồng nhất. Điều này có nghĩa là chi tiết mẫu phải được xử lý nhiệt (xử lý thô và làm hạt nhỏ lại, đồng đều) trước khi đưa vào gia công cơ khí. Một quy trình chế tạo các chi tiết mẫu phục vụ thực nghiệm được đề xuất như ở hình 4.3.

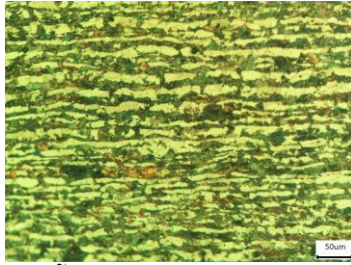


**Hình 4.3** Quy trình chế tạo chi tiết mẫu phục vụ thực nghiệm

#### 4.1.3.1 Xử lý thô

Mục đích của quá trình này là làm mất tổ chức thô của phôi do quá trình cán nóng gây ra, đồng thời làm nhỏ hạt và tạo tính đẳng hướng trong mẫu

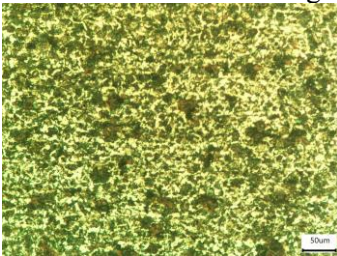
Kết quả chụp tổ chức tế vi trên máy hiển vi quang học cho thấy tổ chức tế vi của mẫu (phôi) không đồng đều và bị thô rất nhiều (Hình 4.4, ảnh chụp theo phương RD). Nguyên nhân là phôi được chế tạo bằng phương pháp cán nóng nên sẽ hình thành tổ chức thô phân bố theo phương cán. Chính điều này làm mất tính đẳng hướng của mẫu và sẽ ảnh hưởng không tốt đến kết quả thí nghiệm nếu không thực hiện xử lý thô.



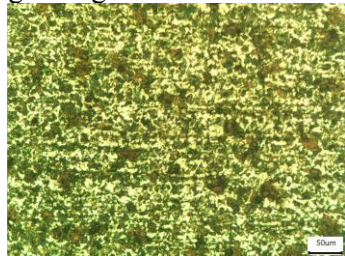
**Hình 4.4** Mẫu trước khi xử lý thớ phương cán

Để thực hiện xử lý thớ ta áp dụng quy trình xử lý thớ theo tiêu chuẩn ASM [61]. Ở đây phôi được thường hóa tại nhiệt độ  $920^{\circ}\text{C}$  trong 15 phút để làm mất tổ chức thớ. Để làm nhỏ hạt và tạo tính đẳng hướng trong mẫu, phôi sau khi xử lý thớ được thường hóa tại  $840^{\circ}\text{C}$  và  $760^{\circ}\text{C}$ . Mỗi công đoạn được giữ nhiệt trong 15 phút.

Sau khi áp dụng thường hóa, tổ chức tế vi trong mẫu không còn thớ, kích thước hạt nhỏ dưới  $20\ \mu\text{m}$  và đồng đều (Hình 4.5). Kết quả này cho thấy có thể xem là mẫu có tính đồng nhất và đẳng hướng.



a) Theo hướng vuông góc phương cán



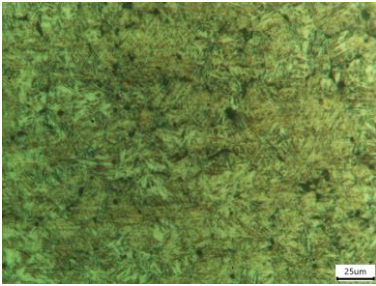
b) Theo hướng dọc theo phương cán

**Hình 4.5** Cấu trúc tế vi của mẫu khi xử lý nhiệt tạo hạt nhỏ và làm đồng đều hạt

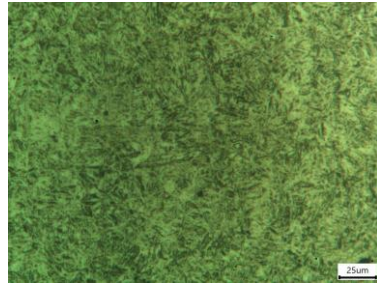
#### 4.1.3.2 Tôi và ram

Quy trình tôi và ram được thực hiện theo tiêu chuẩn ASM [61]. Mẫu được tôi trong môi trường nước với nhiệt độ nung  $850^{\circ}\text{C}$  để đạt độ cứng 56-59 HRC. Sau đó mẫu được ram tại nhiệt độ  $600^{\circ}\text{C}$  trong 30 phút để đạt tổ chức cơ tính tổng hợp cao nhất và xả hết ứng suất dư do quá trình gia công và nhiệt luyện gây ra.

Tổ chức tế vi của mẫu sau khi tôi và ram được thể hiện trên hình 4.6.



a) Sau khi tôi



b) Sau khi ram

**Hình 4.6** Ảnh chụp cấu trúc tế vi của mẫu sau tôi và ram

#### 4.1.3.3 Kiểm tra độ bền kéo của mẫu

**Bảng 4.2:** Bảng giá trị thực nghiệm độ bền kéo

Mẫu	Giới hạn chảy $\sigma_c$ (MPa)	Giới hạn bền $\sigma_b$ (MPa)	Độ dẫn dài tương đối (%)
1	1.067	1.124	14,925
2	1.090	1.135	14,766
3	1.091	1.168	13,433
Trung bình	1.083	1.143	14,374

Qua kết quả thử nghiệm độ bền kéo, chọn mức ứng suất thí nghiệm mỗi tối đa ứng với ứng suất lớn nhất  $\sigma_{max} = 70\% \sigma_c$ . Sự chọn lựa này phù hợp với miền ứng suất làm việc của chi tiết trục nằm trong giới hạn đàn hồi của thép C45.

#### 4.1.3.4 Kiểm tra độ nhám và độ cứng

Kết quả đo được thể hiện ở các bảng 4.3, 4.4 và 4.5.

**Bảng 4.3:** Kết quả đo độ nhám mẫu Ra ( $\mu m$ )

Mẫu thí nghiệm	1	2	3	Trung bình
Độ nhám	0,84	0,84	0,87	0,85

Sai số của máy đo:  $\pm 0,05 \mu m$

**Bảng 4.4:** Kết quả đo độ cứng của mẫu sau tôi

Mẫu thí nghiệm	1	2	3	Trung bình
Độ cứng (HRC)	56,1	58,9	57,9	57,6 $\pm$ 2,5

**Bảng 4.5:** Kết quả đo độ cứng của mẫu sau ram

Mẫu thí nghiệm	1	2	3	Trung bình
Độ cứng (HRC)	31,7	30,2	30,8	30,9 $\pm$ 2

## 4.2 Ảnh hưởng của chiều dày lớp mạ crôm đến độ bền mỏi

### 4.2.1 Vật liệu crôm và thông số của lớp mạ

#### 4.2.1.1 Phân tích, xác định chiều dày mạ phủ

Chiều dày mạ phủ là một thông số rất quan trọng đối với chi tiết được phủ. Nó ảnh hưởng lớn đến cơ tính chi tiết sau khi mạ phủ. Việc lựa chọn chiều dày mạ phủ thuộc vào yêu cầu làm việc và kích thước của từng chi tiết cụ thể. Trong luận án, chi tiết mẫu thí nghiệm mỗi được thiết kế theo tiêu chuẩn ISO 1143:2010 có đường kính phần mạ phủ là  $\varnothing 7.5$  mm nên chiều dày

lớp mạ phủ crôm không thể quá lớn. Trong thực tế, kích thước của các trục lớn hơn nhiều nên lớp phủ sẽ có phạm vi biến động lớn hơn (dày hơn), do vậy cần xác định chiều dày lớp phủ trên chi tiết mẫu một cách phù hợp. Để đảm bảo tính đồng dạng về chiều dày lớp mạ phủ, tỷ lệ chiều dày phủ/đường kính trục (t/d) đã được xem xét. Từ tỉ lệ này, ta có thể tính chiều dày mạ phủ tương ứng với kích thước trên một trục thực tế. Tỷ lệ này cũng đã được S. Y. Sirina [63] sử dụng để xác định chiều dày của lớp thấm nito khi đánh giá độ bền mỏi của chi tiết máy dạng trục.

**Bảng 4.6:** Tỷ lệ chiều dày phủ/ đường kính mẫu (t/d) [63]

Mẫu phủ		Tỷ lệ t/d
Chiều dày	10 $\mu\text{m}$	0,0013
	30 $\mu\text{m}$	0,004
	60 $\mu\text{m}$	0,008
	90 $\mu\text{m}$	0,012

Theo nghiên cứu của J. Tuominen, các trục thường được mạ crôm cứng với chiều dày từ 20-100  $\mu\text{m}$  để tăng độ cứng và chống mài mòn [64]. Nghiên cứu về phá hủy mỏi của Ortiz-Mancilla [65] cũng chỉ thực hiện trên chiều dày lớp phủ 7  $\mu\text{m}$ . J. Pina nghiên cứu ứng suất dư của lớp mạ crôm cho các chiều dày 10, 50 và 100  $\mu\text{m}$  [66]. Các công trình nghiên cứu của A. L. M. Carvalho [14], H. J. C. Voorwald [15] về mỏi của lớp mạ crôm cũng chỉ thực hiện cho lớp mạ phủ có chiều dày đến 100  $\mu\text{m}$ .

Ngoài ra, kỹ thuật mạ crôm ngày nay cũng chỉ có thể mạ phủ đến chiều dày 500  $\mu\text{m}$  [48, 62] và với chiều dày mạ phủ từ 100  $\mu\text{m}$  trở lên sẽ được áp dụng cho chi tiết cần mài lại sau phủ.

Như vậy, từ kết quả khảo sát thực tế, các công trình nghiên cứu về chiều dày lớp mạ phủ [14, 15, 48, 64, 65, 66], đề xuất chi tiết mẫu có vùng kích thước  $\varnothing 7.5$  mm được mạ phủ với chiều dày nhỏ nhất để nghiên cứu là 10  $\mu\text{m}$  và chiều dày tối đa là 90  $\mu\text{m}$ .

Để xây dựng đường cong mỏi cho mỗi chiều dày, ta cần thực hiện thí nghiệm tại 5 điểm lực khác nhau và mỗi điểm lực lặp lại 3 lần [67,68]. Vậy, số lượng mẫu có thể chia như sau:

- + 15 mẫu mạ với chiều dày nhỏ nhất, dày 10  $\mu\text{m}$ ;
- + 15 mẫu mạ với chiều dày thông thường, dày 30  $\mu\text{m}$ ;
- + 15 mẫu mạ với chiều dày thông thường, dày 60  $\mu\text{m}$ ;
- + 15 mẫu mạ với chiều dày tối đa, dày 90  $\mu\text{m}$ .

#### 4.2.1.2 Kiểm tra chiều dày mạ và độ nhám

Kết quả đo chiều dày lớp mạ phủ crôm là giá trị trung bình sau 5 lần đo và được trình bày trong bảng 4.7.

**Bảng 4.7:** Bảng giá trị trung bình chiều dày mạ phủ

Nhóm mẫu	Chiều dày lớp mạ ( $\mu\text{m}$ )
1 (10 $\mu\text{m}$ )	$9 \pm 2$
2 (30 $\mu\text{m}$ )	$30 \pm 5$
3 (60 $\mu\text{m}$ )	$61 \pm 7$
4 (90 $\mu\text{m}$ )	$93 \pm 10$

**Bảng 4.8:** Kết quả đo độ nhám mẫu Ra ( $\mu\text{m}$ )

Mẫu đo	1	2	3	Trung bình
Độ nhám	0,75	0,77	0,82	0,78

Sai số của máy đo:  $\pm 0,05 \mu\text{m}$

#### 4.2.2 Ứng suất dư của lớp mạ crôm

Nhiều xạ X-quang áp dụng phương pháp  $d\text{-Sin}^2\psi$  được sử dụng để tiến hành phân tích ứng suất dư trên các mẫu sau khi mạ phủ. Để khảo sát sự biến thiên của ứng suất dư trong lớp mạ, các chi tiết mẫu được xả crôm bằng dung dịch axit clohydric 30% theo quy trình của tác giả B. Eigenmann [69]. Vật liệu crôm có mô đun đàn hồi là  $E = 271 \text{ GPa}$  và hệ số Poisson  $\nu = 0,23$  [69], còn đối với thép C45 lần lượt là  $E = 200 \text{ GPa}$  và  $\nu = 0,3$  [70] được sử dụng để tính ứng suất dư ứng dụng kỹ thuật nhiễu xạ X-quang.

Từ kết quả đo đạc trên máy nhiễu xạ X-quang, phần mềm OriginPro 8.5.1 được sử dụng để nội suy đường nhiễu xạ theo phương trình Gauss. Từ đó, khoảng cách mặt tinh thể trong các lớp phủ crôm được tính trong qua công thức Bragg.

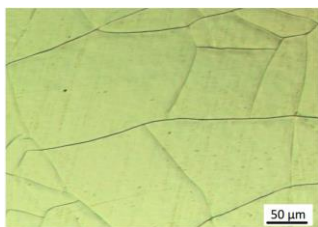
Từ phương trình  $d\text{-Sin}^2\psi$ , ứng suất dư được tính toán theo công thức 3.46 và kết quả thể hiện tại bảng 4.9.

**Bảng 4.9:** Bảng tổng hợp giá trị ứng suất dư các mẫu

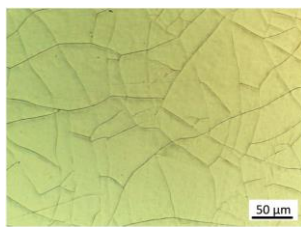
STT	Chiều dày lớp phủ ( $\mu\text{m}$ )	Ứng suất bề mặt lớp crôm $\sigma_{\text{Cr}}$ (MPa)	Ứng suất chi tiết nền thép $\sigma_{\text{Fe}}$ (MPa)
1	10	$620 \pm 25$	$-66 \pm 15$
2	30	$431 \pm 29$	$-84 \pm 31$
3	60	$319 \pm 35$	$-68 \pm 32$
4	90	$228 \pm 47$	$-72 \pm 30$

#### Nhận xét:

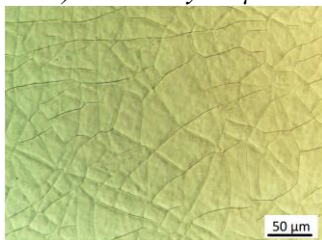
Kết quả đo ứng suất cho thấy, trong mạ crôm luôn tồn tại ứng suất dư kéo và vết nứt tế vi. Điều này được chứng minh là do quá trình phân hủy crôm hydrua trong quá trình tủa crôm gây co rút thể tích làm phát sinh ứng suất kéo và các vết nứt tế vi.



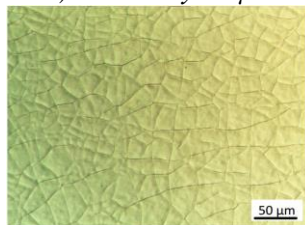
a) Chiều dày 10  $\mu\text{m}$



b) Chiều dày 30  $\mu\text{m}$



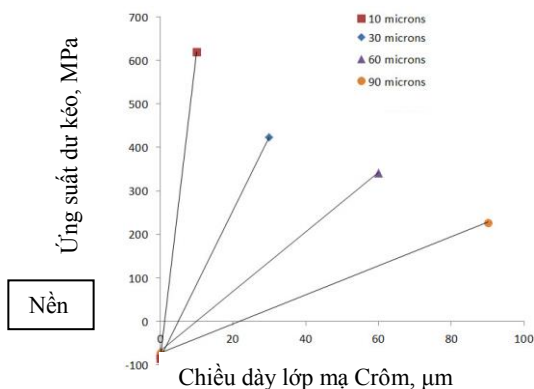
c) Chiều dày 60  $\mu\text{m}$



d) Chiều dày 90  $\mu\text{m}$

**Hình 4.7** Mật độ vết nứt tế vi ứng với các chiều dày lớp crôm

Trên hình 4.7 cho thấy, khi tăng chiều dày lớp mạ crôm, ứng suất kéo có xu hướng giảm và mật độ vết nứt tế vi có xu hướng tăng. Nguyên nhân là do khi chiều dày tăng, sự co rút tinh thể crôm càng lớn dẫn đến ứng suất dư kéo tăng và khi đạt đến một giá trị tới hạn sẽ gây ra các vết nứt tế vi và do sự xuất hiện của các vết nứt tế vi này nên ứng suất dư kéo lại giảm [48,62]. Cụ thể, đối với chiều dày 10  $\mu\text{m}$  có ứng suất kéo là 620 MPa, ứng suất kéo giảm đến 431 MPa đối với chiều dày 30  $\mu\text{m}$ , 319 MPa ứng với 60  $\mu\text{m}$  và sẽ là 228 MPa cho chiều dày 90  $\mu\text{m}$ . Tuy nhiên mật độ vết nứt tế vi lại tăng dần từ chiều dày 30  $\mu\text{m}$  đến 90  $\mu\text{m}$ .



**Hình 4.8** Trường ứng suất dư ứng với các chiều dày lớp mạ crôm

Trên hình 4.8 thể hiện sự biến thiên ứng suất dư của lớp mạ crôm ứng với các chiều dày mạ khác nhau.

Ứng suất tại lớp nền trong khoảng -66 MPa đến -84 MPa. Điều này cho thấy, chi tiết nền có ứng suất rất nhỏ sau quá trình tôi và tiếp sau là ram cao. Quá trình ram đã xả gân như hoàn toàn ứng suất do gia công cắt gọt và quá trình tôi gây ra.

### 4.2.3 Ảnh hưởng của lớp mạ crôm đến độ bền mỏi

#### 4.2.3.1 Tiêu chí đánh giá

- Dựa vào số liệu *ứng suất - chu kỳ*
- Dựa vào độ bền lâu và giới hạn mỏi (*fatigue limit*)

#### 4.2.3.2 Phân tích – Đánh giá

Mục đích của thí nghiệm là đánh giá độ bền mỏi trên nền thép trục C45 với các chiều dày lớp mạ phủ khác nhau khi phủ carbide vonfram sử dụng phương pháp phủ hiện đại HVOF và mạ crôm cứng. Từ đó, so sánh đánh giá độ bền mỏi của lớp phủ carbide vonfram sử dụng phương pháp HVOF và mạ crôm cứng. Bên cạnh đó, kết quả nghiên cứu sẽ đưa ra các đánh giá cho việc lựa chọn phương pháp phủ và chiều dày thích hợp cho chi tiết trục.

#### 4.2.3.3 Kết quả thí nghiệm

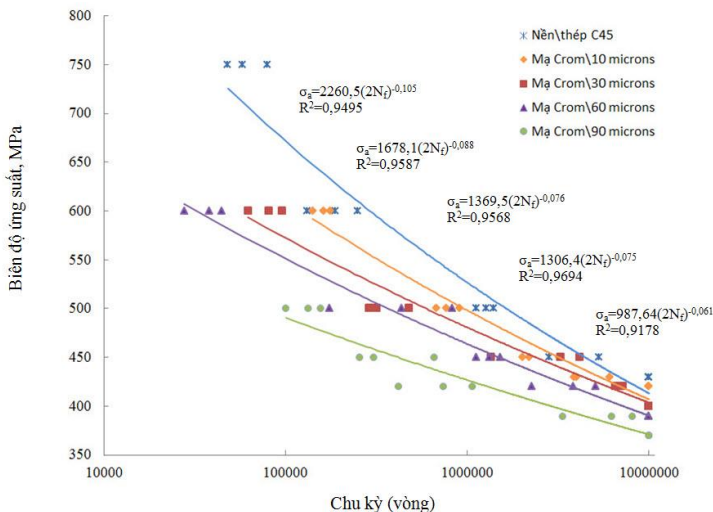
Như đã trình bày ở phần trước, để đánh giá ảnh hưởng của từng chiều dày với các phương pháp phủ, các thí nghiệm cần thiết được thực hiện tại năm điểm lực trên cùng một chiều dày và tại một điểm lực thí nghiệm được lặp lại 3 lần (3 mẫu). Từ dữ liệu kết quả thí nghiệm, đường cong mỏi theo phương trình Basquin được xây dựng nhờ sự hỗ trợ của phần mềm.

Từ bảng số liệu có được từ thực nghiệm, đường cong mỏi của vật liệu nền C45 mạ lớp crôm với các chiều dày 10  $\mu\text{m}$ , 30  $\mu\text{m}$ , 60  $\mu\text{m}$ , 90  $\mu\text{m}$  được xây dựng với sự hỗ trợ của phần mềm Excel và Matlab. Hình 4.9 thể hiện đường cong mỏi của chi tiết mẫu được mạ phủ crôm với các chiều dày khác nhau.

Phương trình đường cong mỏi Basquin được thành lập cho vật liệu nền C45 và các chiều dày mạ crôm khác nhau dựa vào các số liệu thực nghiệm:

- + Vật liệu nền C45:  $\sigma_a = 2260,5(2N_f)^{-0,105}$
- + Mạ crôm -10 $\mu\text{m}$ :  $\sigma_a = 1678,1(2N_f)^{-0,088}$
- + Mạ crôm -30 $\mu\text{m}$ :  $\sigma_a = 1369,5(2N_f)^{-0,076}$
- + Mạ crôm -60 $\mu\text{m}$ :  $\sigma_a = 1306,4(2N_f)^{-0,075}$
- + Mạ crôm -90 $\mu\text{m}$ :  $\sigma_a = 987,64(2N_f)^{-0,061}$





**Hình 4.9** Biểu đồ đường cong mỏi cho các chiều dày mạ crôm  
**Bảng 4.10:** Thông số phương trình mỏi Basquin cho nền và mạ crôm

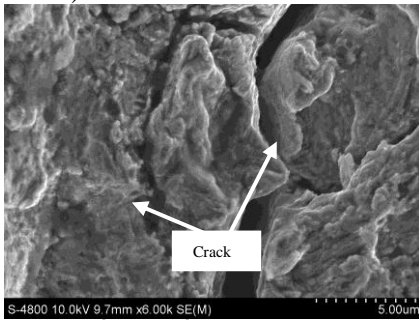
Mẫu	Tỷ lệ (t/d)	$\sigma'_f$ (MPa)	b
Nền C45		2260,5	-0,105
Mạ Crôm\10 $\mu\text{m}$	0,0013	1678,1	-0,088
Mạ Crôm\30 $\mu\text{m}$	0,004	1369,5	-0,076
Mạ Crôm\60 $\mu\text{m}$	0,008	1306,4	-0,075
Mạ Crôm\90 $\mu\text{m}$	0,012	987,64	-0,061

Từ đồ thị đường cong mỏi của hai loại mẫu mạ crôm và nền C45 cho thấy độ bền mỏi của các chi tiết khi mạ crôm giảm rất lớn so với chi tiết nền. Độ bền mỏi của chi tiết mạ crôm có xu hướng giảm khi chiều dày lớp mạ tăng. Nguyên nhân là trong lớp mạ crôm luôn tồn tại ứng suất dư kéo và vết nứt tế vi, điều này ảnh hưởng xấu đến độ bền mỏi (gây giảm độ bền mỏi). Như đã đề cập ở phần trước, ứng suất dư kéo trong lớp mạ crôm cứng có xu hướng giảm khi tăng chiều dày lớp mạ. Về mặt lý thuyết, điều này sẽ làm cho độ bền mỏi sẽ tăng trở lại khi tăng chiều dày. Tuy nhiên, kết quả thực tế không phải vậy do khi tăng chiều dày lớp mạ crôm ứng suất dư kéo có xu hướng giảm nhưng mật độ vết nứt tế vi lại tăng và mật độ vết nứt cao này là nguyên nhân làm cho vết nứt phát triển sớm và phá hủy chi tiết khi chịu ứng suất thay đổi theo chu kỳ.

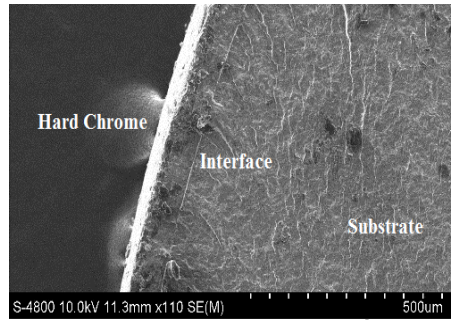
Đánh giá về giới hạn mỏi ( $\sigma_{-1}$ ) tại số chu kỳ  $10^7$  cho thấy, giới hạn mỏi của lớp phủ 10  $\mu\text{m}$  là  $\sigma_{-1} = 420$  MPa, giảm 2,3% so với chi tiết nền, trong khi đối với chiều dày mạ 30  $\mu\text{m}$  là  $\sigma_{-1} = 400$  MPa, giảm 6,97% so với chi tiết nền. Đối với chiều dày 60 và 90  $\mu\text{m}$ , giới hạn mỏi lần lượt là  $\sigma_{-1} = 390$  MPa và 370

MPa nghĩa là giảm 9,3 % và 11,62 % so với chi tiết nền. Tuy nhiên, với các mức ứng suất chịu tải lớn ta có thể thấy độ bền mỏi giảm nhiều hơn so với khi so sánh tại giới hạn mỏi. Cụ thể tại ứng suất  $\sigma = 500$  MPa, chi tiết nền C45 có số chu kỳ:  $1,264178 \cdot 10^6$  (chu kỳ), trong khi lớp mạ dày 10 và 30  $\mu\text{m}$  là  $7,85515 \cdot 10^5$  (chu kỳ) và  $3,61007 \cdot 10^5$  (chu kỳ) tương ứng với giảm 37,86% và 71,44%. Đối với chiều dày 60 và 90  $\mu\text{m}$  là  $4,78611 \cdot 10^5$  (chu kỳ) và  $1,29571 \cdot 10^5$  (chu kỳ) tương ứng giảm 62,14 % và 89,75%. Có thể giải thích cho điều này là dưới ứng suất tải tác dụng càng lớn, sự phát triển của vết nứt càng nhanh kéo theo chi tiết càng bị phá hủy sớm.

Để đánh giá quá trình phát triển vết nứt mỏi và cấu trúc lớp mạ crôm, mẫu được khảo sát bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM). Trên hình 4.10a thể hiện vết nứt ban đầu luôn tồn tại trong mạng tinh thể lớp crôm cứng. Hình ảnh SEM cũng cho thấy độ bám dính của lớp mạ crôm và lớp nền là rất tốt (Hình 4.10b)



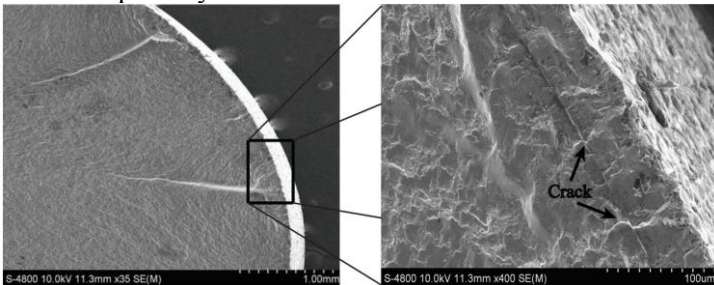
a) Vết nứt tế vi trong lớp crôm



b) Bám dính lớp crôm/nền

**Hình 4.10** Ảnh chụp SEM của lớp mạ crôm

Khảo sát bề mặt gãy do mỏi cho thấy cho thấy các vết nứt mỏi phát triển từ các vết nứt ban đầu tồn tại trong lớp phủ crôm. Dưới tác dụng của tải trọng có chu kỳ, các vết nứt trên bề mặt lớp phủ phát triển theo hướng đi vào tâm của chi tiết và làm phá hủy mẫu.



**Hình 4.11** Sự phát triển vết nứt mỏi của lớp mạ crôm

### 4.3 Ảnh hưởng của lớp phủ carbide vonfram (WC-10Co-4Cr) đến độ bền mỏi của chi tiết máy dạng trục

### 4.3.1 Vật liệu và thông số lớp phủ

#### 4.3.1.1 Vật liệu Carbide vonfram WC-10Co-4Cr

Đây là một loại bột phun phủ được sử dụng phổ biến trên thế giới với nhiều hãng sản xuất như Praxair (Mỹ), Orelikon Metco (Thụy Sĩ), MEC (Ấn Độ). Tùy thuộc vào mục đích sử dụng như chế tạo mới hay phục hồi bề mặt chi tiết máy mà có thể sử dụng các phương pháp phun phủ và chọn loại bột cho thích hợp. Từ kết quả của các công trình đã nghiên cứu và tài liệu của hãng Orelikon Metco [45] cho thấy chất phủ bột carbide WC-10Co-4Cr (Woka 3652) có cơ tính rất tốt và được sử dụng rộng rãi nhờ pha carbide vonfram WC có độ cứng rất cao và chất kết dính coban có thêm crôm giúp giảm sự mài mòn và chống ăn mòn rất tốt.

#### 4.3.1.2 Phân tích, xác định chiều dày phủ Carbide

Trong công nghệ phủ HVOF, ta không thể phủ lớp quá mỏng vì yếu tố kỹ thuật như phải phun hạt  $Al_2O_3$  tạo nhám trước khi phủ, quá trình phủ không thể điều chỉnh lượng cấp bột nhỏ quá ít trong một lần phủ. Vì vậy, đối với phương pháp phủ HVOF, tác giả phủ với ba chiều dày 30  $\mu m$ , 60  $\mu m$ , 90  $\mu m$  với số lượng mẫu như sau:

- +15 mẫu phủ dày 30( $\mu m$ ): chiều dày thông thường
- +15 mẫu phủ dày 60( $\mu m$ ): chiều dày thông thường
- +15 mẫu phủ dày 90 ( $\mu m$ ): chiều dày tối đa

#### 4.3.1.3 Thực nghiệm kiểm tra chiều dày lớp phủ.

Kết quả đo là giá trị trung bình sau 5 lần đo

**Bảng 4.10:** Bảng giá trị trung bình chiều dày mạ phủ

Mẫu	Phủ HVOF ( $\mu m$ )
1	31 $\pm$ 5
2	63 $\pm$ 7
3	92 $\pm$ 10

#### 4.3.1.4 Thực nghiệm kiểm tra độ nhám

Độ nhám và độ cứng của mẫu được đo trên máy SJ-301. Kết quả đo được thể hiện trên bảng 4.11

**Bảng 4.11:** Kết quả đo độ nhám mẫu Ra( $\mu m$ )

Mẫu thí nghiệm	1	2	3	Trung bình
Độ nhám	6,31	6,52	6,46	6,43

Sai số của máy đo:  $\pm 0,05 \mu m$

### 4.3.2 Tính toán ứng suất dư của lớp phủ Carbide

Trong vật liệu carbide vonfram WC-10Co-4Cr luôn tồn tại nhiều pha. Tuy nhiên pha WC là pha chính và chiếm tỉ lệ cao nhất(86%) nên ứng suất dư trên vật liệu carbide vonfram chỉ tính cho pha carbide này. Vật liệu WC-10Co-4Cr có mô đun đàn hồi là:  $E = 316 \text{ GPa}$ , và hệ số Poisson  $\nu = 0,22$  [25]. Qua kết quả nhiễu xạ X-quang và đồ thị  $d \cdot \sin^2 \psi$ , ta tính được giá trị ứng suất

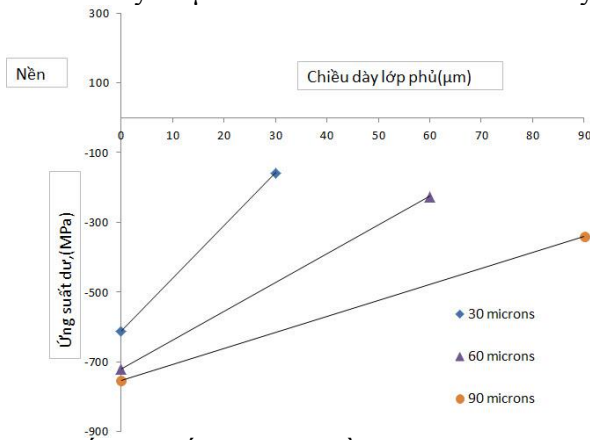
đư tương ứng cho lớp tiếp giáp nền/phủ ứng với các chiều dày phủ. Kết quả thể hiện tại Bảng 4.12.

**Bảng 4.12:** Bảng tổng hợp đo ứng suất các mẫu.

STT	Chiều dày lớp phủ ( $\mu\text{m}$ )	Ứng suất dư bề mặt lớp phủ (MPa)	Ứng suất dư lớp tiếp giáp (MPa)
1	30	-158 $\pm$ 22	-613 $\pm$ 29
2	60	-226 $\pm$ 28	-721 $\pm$ 17
3	90	-341 $\pm$ 24	-754 $\pm$ 28

Nhận xét:

Trong lớp phủ Carbide Vonfram luôn tồn tại ứng suất dư nén. Giá trị ứng suất dư nén tăng theo chiều dày lớp phủ. Kết quả đo ứng suất dư cho thấy rằng chiều dày lớp phủ 30  $\mu\text{m}$  tồn tại ứng suất dư -158 MPa trong khi đó là -226 MPa đối với chiều dày 60  $\mu\text{m}$  và -341MPa đối với chiều dày 90  $\mu\text{m}$ .



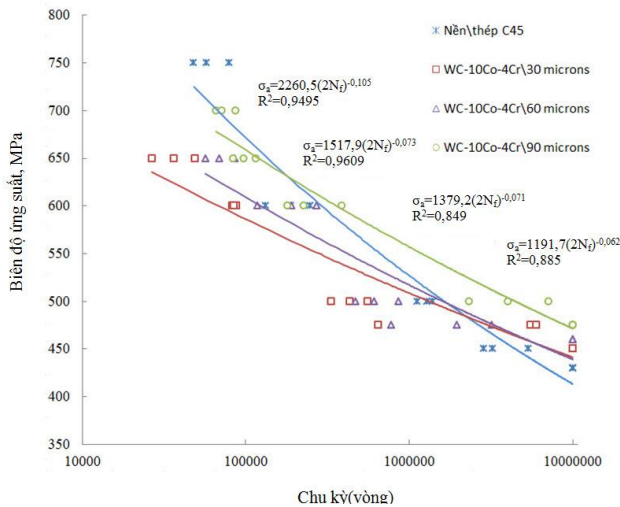
**Hình 4.12** Phân bố ứng suất dư theo chiều dày lớp phủ carbide vonfram

Điều này được chứng minh qua nhiều nghiên cứu. Trong vật liệu bột WC-10Co-4Cr, các hạt WC là pha rất cứng và không bị nóng chảy dưới nhiệt độ của HVOF. Vì vậy, sự va chạm của các hạt cứng này với nền thép và lớp phủ trước đó ở tốc độ cao gây ra biến dạng dẻo và gây ra ứng suất nén, tức là động năng của các hạt WC gây ra ứng suất nén. Một yếu tố khác ảnh hưởng đến ứng suất dư nén của lớp phủ là do làm nguội sau quá trình phủ, hệ số giãn nở nhiệt (thermal expansion coefficient) của lớp phủ nhỏ hơn hệ số giãn nở nhiệt của vật liệu nền sẽ tạo ra ứng suất nén và ngược lại. Trong nghiên cứu này, hệ số dẫn nở nhiệt của thép AISI 1045 là  $11,52 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$  trong khi hệ số dẫn nở nhiệt của lớp phủ WC-10Co-4Cr là  $5.5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$  [24]. Như vậy, khi phủ WC-10Co-4Cr lên nền thép AISI 1045 sẽ gây ra ứng suất nén. Ứng suất dư nén có chiều hướng tăng theo chiều dày lớp phủ cũng đã được chứng minh [25].

Khảo sát ứng suất dư tại lớp tiếp giáp lớp phủ/nền cho thấy, giá trị ứng suất dư nén tồn tại lớn trong lớp tiếp giáp đối với cả 3 chiều dày lớp phủ. Nguyên nhân là do trước khi phủ carbide, mẫu nền được phun hạt  $Al_2O_3$  để tạo nhám bề mặt nhằm tăng cường độ bám dính lớp phủ. Cũng chính điều này làm cho bề mặt nền bị biến dạng dẻo và tạo ứng suất dư nén.

### 4.3.3 Ảnh hưởng của lớp phủ Carbide Vonfram (WC-10Co-4Cr) đến độ bền mỏi của chi tiết máy dạng trục

Đồ thị đường cong mỏi và phương trình Basquin cho chi tiết phủ carbide vonfram với các chiều dày 30  $\mu m$ , 60  $\mu m$ , 90  $\mu m$  được thể hiện trên hình 4.13 và bảng 4.13



**Hình 4.13** Biểu đồ đường cong mỏi cho các chiều dày phủ Carbide Vonfram

Phương trình đường cong mỏi Basquin được thành lập cho vật liệu nền C45 và các chiều dày phủ carbide vonfram khác nhau dựa vào số liệu thực nghiệm:

- + Phủ WC-10Co-4Cr-30  $\mu m$ :  $\sigma_a = 1191,7(2N_f)^{-0,062}$
- + Phủ WC-10Co-4Cr-60  $\mu m$ :  $\sigma_a = 1379,2(2N_f)^{-0,071}$
- + Phủ WC-10Co-4Cr-90  $\mu m$ :  $\sigma_a = 1517,9(2N_f)^{-0,073}$

**Bảng 4.13:** Thông số phương trình mỏi Basquin cho lớp phủ Carbide Vonfram

Mẫu Phủ	Tỷ lệ (t/d)	$\sigma'_r$ (MPa)	b
WC-10Co-4Cr 30 $\mu m$	0,004	1191,7	-0,062
WC-10Co-4Cr 60 $\mu m$	0,008	1379,2	-0,071
WC-10Co-4Cr 90 $\mu m$	0,012	1517,9	-0,073

Khảo sát độ bền mỏi trong lớp phủ carbide vonfram cho thấy, độ bền mỏi có xu hướng tăng theo chiều dày lớp phủ. Cụ thể, tại ứng suất 475 MPa,

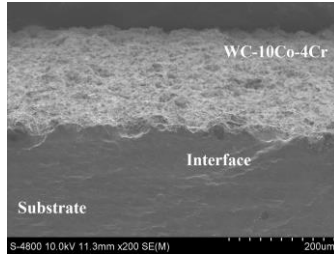
độ bền mỏi của lớp phủ có chiều dày 30  $\mu\text{m}$  là 1.444.648 chu kỳ, đối với lớp phủ có chiều dày 60  $\mu\text{m}$  là 1.949.652 chu kỳ trong khi đối với chiều dày 90  $\mu\text{m}$  là không gãy (run out- $10^7$  chu kỳ). So sánh về giới hạn mỏi với chi tiết nền cho thấy giới hạn mỏi khi áp dụng lớp phủ carbide vonfram là cao hơn chi tiết nền và tăng theo chiều dày lớp phủ. Giới hạn mỏi lớp phủ 30  $\mu\text{m}$  là  $\sigma_{-1} = 450$  MPa (tăng 4,65% so với nền) và đối giới hạn mỏi lớp phủ 60  $\mu\text{m}$  là  $\sigma_{-1} = 460$  MPa (tăng 6,97% so với nền) trong khi đối giới hạn mỏi lớp phủ 90  $\mu\text{m}$  là  $\sigma_{-1} = 475$  MPa (tăng 10,46% so với nền). Nguyên nhân là trong lớp phủ luôn tồn tại ứng suất dư nén và tăng theo chiều dày lớp phủ. Chính điều này làm tăng độ bền mỏi của chi tiết. Bên cạnh đó, theo nhiều nghiên cứu cho thấy lớp phủ có mô đun đàn hồi cao hơn chi tiết nền sẽ làm tăng độ bền mỏi và ngược lại [29]. Trong luận án này, mô đun đàn hồi của thép AISI 1045 và lớp phủ WC-10Co-4Cr lần lượt là  $E = 200$  GPa và 316 GPa [25, 70].

Một yếu tố khác ảnh hưởng đến độ bền mỏi của lớp phủ là ứng suất dư nén của lớp nền trước khi phủ. Lớp nền được phun hạt  $\text{Al}_2\text{O}_3$  tạo độ nhám để tăng độ bám dính của lớp phủ. Tuy nhiên, cũng chính yếu tố này làm cho lớp nền bị biến dạng dẻo và sinh ra ứng suất dư nén rất lớn. Điều này góp phần làm tăng độ bền mỏi của chi tiết phủ.

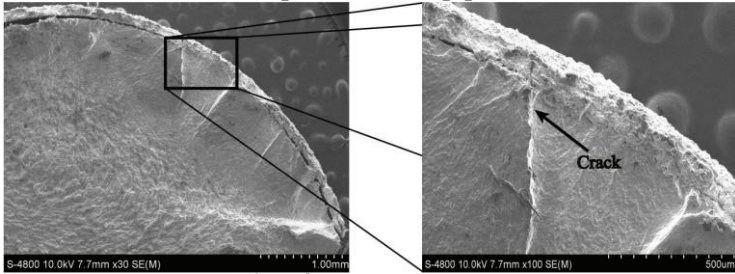
Trên đây là những nguyên nhân chính làm cho độ bền mỏi của lớp phủ cao hơn chi tiết nền và tăng theo chiều dày lớp phủ. Tuy nhiên, khi xem xét đối với chiều dày lớp phủ thấp (30, 60  $\mu\text{m}$ ) cho thấy: khi chịu mức ứng suất tải cao, độ bền mỏi của mẫu phủ nhỏ hơn nền là do độ nhám của bề mặt trước khi phủ được phun nhám tạo bề mặt nhấp nhô để tăng độ bám dính lớp phủ, nhưng chính điều này lại gây nguy cơ phát triển vết nứt mỏi sớm. Độ bền mỏi được cải thiện khi tăng chiều dày lớp phủ tăng lên 90  $\mu\text{m}$ , kết quả cho thấy độ bền mỏi điều cao hơn chi tiết nền ở tất cả các mức ứng suất do ảnh hưởng của trọng số ứng suất nén lớn hơn ảnh hưởng của độ nhám nhô bề mặt nền.

Phân tích bằng máy kính hiển vi điện tử quét (SEM) cho thấy cả lớp phủ carbide vonfram cũng có độ bám dính rất tốt và không bị tách lớp khi tác dụng tải trọng. Đối với lớp phủ carbide vonfram cho thấy bề mặt nền có độ nhám cao khi áp dụng phương pháp phun hạt  $\text{Al}_2\text{O}_3$  tạo nhám trước khi phủ để tăng độ bám dính.

Bề mặt gãy do phá hủy mỏi của mẫu phủ được thể hiện trên hình 4.15. Đây là kết quả của vết nứt mỏi phát triển khi đặt ứng suất tại phần giảm tiết diện trên mẫu ( $\varnothing 7.5$ ). Khi áp tải trọng thay đổi theo chu kỳ hiện tượng tách lớp lại xảy ra. Khảo sát ứng suất dư mẫu phủ cho thấy: lớp nền có ứng suất dư nén rất lớn. Vì vậy, vết nứt bên bề mặt lớp phủ (nếu có) không thể phát triển đi sâu vào bên trong. Nó có vai trò như một lớp cản trở sự phát triển của vết nứt từ bên ngoài. Khi tải tác dụng đủ lớn, các vết nứt mới xuất phát từ ranh giới tiếp giáp giữa lớp phủ và bề mặt nền sẽ xuất hiện. Đó là nơi có bề mặt nhấp nhô lớn (interface) và vết nứt phát triển sâu vào bên trong chi tiết gây phá hủy mỏi.



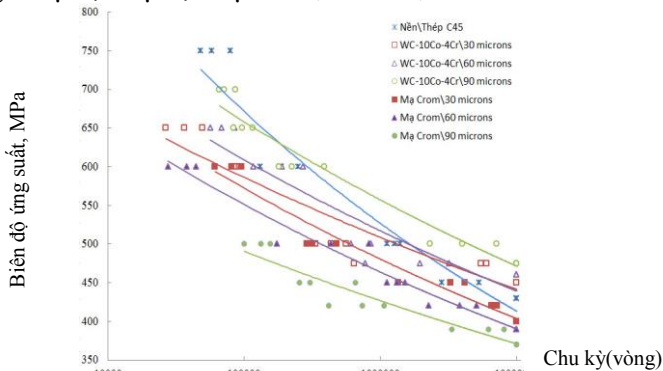
**Hình 4.14** Ảnh chụp SEM của lớp phủ WC-10Co-4Cr



**Hình 4.15** Sự phát triển vết nứt mỏi của lớp phủ WC-10Co-4Cr

#### 4.3.4 So sánh ảnh hưởng của lớp mạ crom và lớp phủ Carbide Vonfram (WC-10Co-4Cr) đến độ bền mỏi của chi tiết máy dạng trục

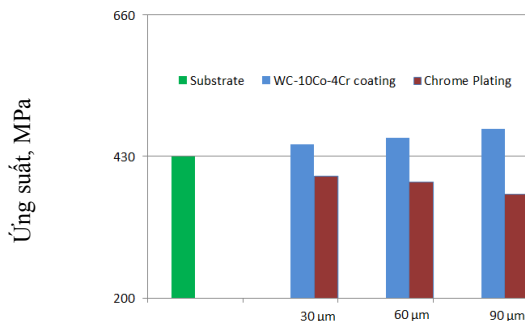
Đánh giá độ bền mỏi của của mạ crom cứng và phủ carbide vonfram cho chiều dày 30  $\mu\text{m}$ , 60  $\mu\text{m}$ , 90  $\mu\text{m}$  được thể hiện trên hình 4.16.



**Hình 4.16** Biểu đồ đường cong mỏi cho phương pháp mạ crom và phủ HVOF

Nhìn vào đồ thị đường cong mỏi cho hai phương pháp phủ, độ bền mỏi của lớp phủ carbide vonfram luôn cao hơn so với mạ crom khi xét trên cùng một chiều dày. Mặc dù độ nhám của lớp phủ carbide vonfram luôn lớn hơn mạ crom.

Khi so sánh về ảnh hưởng của chiều dày lớp phủ đối với độ bền mỏi, ta thấy luôn có hai xu hướng trái ngược nhau. Độ bền mỏi có xu hướng tăng theo chiều dày lớp phủ carbide và ngược lại với lớp mạ crom cứng.



**Hình 4.17** Giới hạn mỏi của phương pháp mạ crôm và phủ Carbide Vonfram

Trên hình 4.17 cho thấy giới hạn mỏi của lớp mạ crôm ứng với chiều dày 30 μm là  $\sigma_{-1} = 400$  MPa trong khi giới hạn mỏi của lớp phủ là  $\sigma_{-1} = 450$  MPa (tăng 12,5 % so với mạ crôm). Đối với chiều dày 60 μm, giới hạn mỏi của lớp mạ crôm ứng  $\sigma_{-1} = 390$  MPa trong khi giới hạn mỏi của lớp phủ là  $\sigma_{-1} = 460$  MPa (tăng 17,9 % so với mạ crôm). Tỷ lệ này tăng lên khi tăng chiều dày lớp phủ lên 90 μm, giới hạn mỏi của lớp mạ crôm ứng  $\sigma_{-1} = 370$  MPa trong khi giới hạn mỏi của lớp phủ là  $\sigma_{-1} = 475$  MPa (tăng 28,3 % so với mạ crôm).

## KẾT LUẬN - KIẾN NGHỊ

### 1. Kết luận

Đề tài “*Nghiên cứu ảnh hưởng của lớp phủ bề mặt đến độ bền mỏi của chi tiết máy dạng trục*” đã được triển khai thực hiện trong thời gian 2014 đến 2020. Để đánh giá độ bền mỏi của chi tiết trục chế tạo từ thép C45 được phủ bề mặt, chi tiết mẫu phục vụ cho thí nghiệm mỏi dựa theo tiêu chuẩn ISO 1143: 2010 đã được nghiên cứu đề xuất. Các chi tiết mẫu đã được chế tạo, xử lý thớ, làm đều hạt, xử lý bề mặt và tiến hành mạ crôm cứng, phủ carbide wolfram với nhiều chiều dày khác nhau để triển khai thực hiện thí nghiệm mỏi để có được dữ liệu giúp phân tích, đánh giá độ bền mỏi. Các nội dung nghiên cứu chính đã thực hiện và hoàn thành như sau:

- Nghiên cứu tổng quan về công nghệ, kỹ thuật chế tạo chi tiết máy dạng trục có mạ phủ;
- Nghiên cứu quy trình xử lý nhiệt để xử lý thớ, làm đồng đều hạt, nhiệt luyện cho phôi thép C45 dạng thanh cũng như quy trình công nghệ chế tạo chi tiết mẫu mỏi theo tiêu chuẩn ISO 1143: 2010 phục vụ cho thí nghiệm mỏi.
- Ứng dụng các kỹ thuật mạ phủ crôm cứng, kim tương bề mặt để đánh giá chất lượng bề mặt lớp mạ crôm; đo nhiễu xạ X-quang để tính toán ứng suất dư cho lớp mạ crôm và chi tiết nền cũng như tiến hành thí nghiệm mỏi để có được số liệu phục vụ nghiên cứu phân tích và đánh giá ảnh hưởng của chiều



dày lớp mạ crôm đến độ bền mỏi của chi tiết máy dạng trục được chế tạo từ thép C45.

- Nghiên cứu, đánh giá ảnh hưởng của các chiều dày lớp phủ carbide vonfram (WC-10Co-4Cr) đến độ bền mỏi của chi tiết máy dạng trục. Triển khai thí nghiệm mỏi để lấy số liệu, đánh giá bề mặt gãy mỏi của lớp phủ carbide vonfram bằng kính hiển vi điện tử quét và so sánh kết quả độ bền mỏi với phương án mạ phủ crôm.

Kết quả nghiên cứu và thực nghiệm đã chỉ ra:

- Đối với lớp mạ crôm, ứng suất kéo giảm dần và mật độ vết nứt tế vi tăng dần khi tăng chiều dày lớp mạ. Ngược lại, trong lớp phủ carbide vonfram luôn tồn tại ứng suất dư nén và tăng theo chiều dày lớp phủ.

- Độ bền mỏi của chi tiết được mạ crôm càng giảm khi lớp mạ càng dày tương ứng với lớp mạ dày 10, 30, 60 và 90  $\mu\text{m}$  là 2,3%; 6,97% ; 9,3 % và 11,62 % so với chi tiết nền.

- Độ bền mỏi của chi tiết được phủ carbide vonfram càng tăng khi tăng chiều dày lớp phủ tương ứng với lớp phủ dày 30, 60 và 90  $\mu\text{m}$  là 4,65%; 6,97%; và 10,46% so với chi tiết nền.

- Thiết lập được phương trình mỏi theo mô hình Basquin cho các chiều dày mạ phủ khác nhau cho hai phương pháp phủ.

- Lớp phủ carbide vonfram có độ bền mỏi cao hơn hẳn lớp mạ crôm cứng và là một phương án có thể thay thế tốt cho mạ crôm với giá trị độ bền mỏi tăng tương ứng với chiều dày 30, 60 và 90  $\mu\text{m}$  là 12,5 %; 17,9 % và 28,3 %. Ngoài ra tỷ lệ chiều dày/đường kính chi tiết phủ(t/d) cũng được tính đến trong luận án để làm cơ sở lựa chọn chiều dày/đường kính trục được áp dụng ngoài thực tiễn để đạt được độ bền mỏi tốt nhất mà vẫn đảm bảo bài toán kinh tế.

## 2. Kiến nghị

Những kết quả nghiên cứu mà đề tài đạt được có thể được xem như một số đóng góp trong lĩnh vực phun phủ bề mặt. Để hướng nghiên cứu được hoàn thiện và đưa vào ứng dụng rộng rãi trong thực tiễn, một số kiến nghị về hướng phát triển của nghiên cứu được đề xuất như sau:

- Đề tài này chỉ xét sự ảnh hưởng của lớp mạ crôm và lớp phủ cacbit vonfram ở chiều dày micro. Vì vậy để khảo sát toàn diện hơn cần đánh giá ở mức chiều dày lớp phủ mỏng hơn ở dạng nano.

- Quy trình mạ crôm và và phun phủ cacbit vonfram được ứng dụng trong nghiên cứu này là quy trình chuẩn được ứng dụng trong công nghiệp hiện nay. Vì vậy cần xem xét đánh giá các thông số trong quá trình mạ và phủ ảnh hưởng đến độ bền mỏi như thế nào để có đánh giá tổng quát hơn.

- Nghiên cứu chỉ thực hiện trên nền thép C45, vì vậy cần thực hiện nghiên cứu với những vật liệu khác tạo bộ dữ liệu đưa kết quả nghiên cứu áp dụng vào sản xuất.