

**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: 9520103

Tp. Hồ Chí Minh, tháng 06/2021

**CÔNG TRÌNH ĐƯỢC HOÀN THÀNH TẠI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH**

Người hướng dẫn khoa học 1: PGS.TS. ĐẶNG THIỆN NGÔN
(Ghi rõ họ, tên, chức danh khoa học, học vị và chữ ký)

Người hướng dẫn khoa học 2: PGS.TS. LÊ CHÍ CƯƠNG
(Ghi rõ họ, tên, chức danh khoa học, học vị và chữ ký)

Luận án tiến sĩ được bảo vệ trước
HỘI ĐỒNG CHẤM BẢO VỆ LUẬN ÁN TIẾN SĨ
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT,
Ngày tháng năm 2021

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 Oxxygen-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 được cách thức tính toán sự thay đổi của ứng suất dư và mật độ vết nứt tế vi, 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 phủ.

- Xác định được qua thực nghiệm, khi tăng chiều dày lớp mạ crôm

trên nền thép C45 thì mật độ vết nứt tăng làm cho ứng suất dư kéo giảm dần đến độ bền mỏi giảm; và khi tăng chiều dày của lớp phủ carbide vonfram WC-10Co-4Cr ứng suất dư nén sẽ tăng 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 sản xuất chi tiết mới, phục hồi chi tiết máy với các chiều dày lớp phủ 10, 30, 60 và 90 μm .

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 chiều dày hợp lý của lớp phủ để nâng cao độ bền mỏi của chi tiết máy.

4. Đối tượng, phạm vi nghiên cứu

4.1 Đối tượng nghiên cứu

- Quá trình mỏi của 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 μm đến 90 μm .
- Quy trình mạ crôm sử dụng quy trình chuẩn trong công nghiệp hiện đang được sử dụng rộng rãi trong các cơ sở, xí nghiệp mạ phủ ở Việt Nam;

qui trình phun phủ HVOF sử dụng các thông số của quá trình phủ đã được tối ưu về độ cứng, độ xốp và độ bám dính và sẽ không được nghiên cứu trong đề tài.

5. Nội dung và phương pháp nghiên cứu

5.1 Nội dung 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 mô hình toán đường cong mỗi, kết cấu, kích thước và quy trình chế tạo chi tiết mẫu. Thiết lập hàm hấp thụ tia X và cách tính sai số đo ứng suất dư.

-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. So sánh đánh giá độ bền mỏi của phương án mạ phủ crôm và carbide vonfram với các chiều dày khác nhau để xác định chiều dày lớp mạ phủ phù hợp có độ bền mỏi cao nhất tương ứng với điều kiện làm việc của chi tiết.

5.2 Phương pháp nghiên cứu nghiên cứu

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

6. 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 tia X để xác định ứng suất dư của lớp mạ phủ.

- Nghiên cứu phương pháp xử lý ảnh sử dụng phần mềm ImageJ để xác định mật độ vết nứt tế vi 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 toán, thực nghiệm và xử lý số liệu thực nghiệm để tìm ra phương trình đường cong mới cho từng phương pháp phủ ứng với các chiều dày khác nhau nhằm xác định được phương pháp phủ và chiều dày phù hợp lý.

7. Các đóng góp mới của luận án

- Đề xuất quy trình xử lý thô và làm đồng đều hạt tinh thể cho thép C45 để chế tạo chi tiết mẫu phục vụ cho quá trình thí nghiệm mới.

- Xây dựng được hàm hấp thụ tia X để hiệu chỉnh đường nhiễu xạ trong quá trình đo ứng suất dư và đề xuất được cách tính sai số ứng suất dư bằng phương pháp này.

- Đánh giá được sự biến thiên của ứng suất dư, mật độ vết nứt tế vi... theo chiều dày lớp mạ phủ. Phân tích ảnh hưởng của các yếu tố này đến độ bền mỏi của chi tiết mạ phủ.

- Thiết lập được mô hình toán và phương trình mới cho các chiều dày mạ phủ khác nhau ứng với hai phương pháp mạ phủ.

- So sánh đánh giá độ bền mỏi của chi tiết mạ crôm và phủ carbide vonfram ứng với các chiều dày phủ khác nhau. Từ đó cho phép lựa chọn phương pháp phủ và chiều dày lớp phủ để đạt được độ bền mỏi tốt nhất mà vẫn đảm bảo bài toán kinh tế.

8. Kết cấu của luận án

Kết cấu của luận án gồm các phần:

- Mở đầu
- Chương 1: Tổng quan
- Chương 2: Cơ sở lý thuyết
- Chương 3: Vật liệu-thiết bị và phương pháp thí nghiệm
- Chương 4: Kết quả nghiên cứu lý thuyết
- Chương 5: Kết quả nghiên cứu thực nghiệm và bàn luận
- Kết luận và kiến nghị

Chương 1. TỔNG QUAN

1.1 Khái quát về hiện tượng mỏi

1.2 Mạ điện

1.3 Phun phủ HVOF

1.4 Thực trạng nghiên cứu về mỏi ở Việt Nam

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

1.5.1 Các nghiên cứu của nước ngoài

Các nguyên 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 carbide 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.

1.5.2 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.

1.6 Các tồn tại và định hướng nghiên cứu

1.6.1 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.

1.6.2 Định hướng nghiên cứu

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

- Xây dựng mô hình toán đường cong mỏi uốn cho chi tiết dạng trục có mạ phủ.
- Nghiên cứu quy trình xử lý thô và tạo hạt nhỏ để tạo tính đẳng hướng trong chi tiết trục áp dụng thép C45
- Xác định 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 và dựa trên các thông số phủ đã được tối ưu hóa về độ cứng, độ bám dính và độ xốp.
- Đo lường và đánh giá sự thay đổi của ứng suất dư và mật độ tế vi khi mạ phủ với các chiều dày mạ phủ 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.

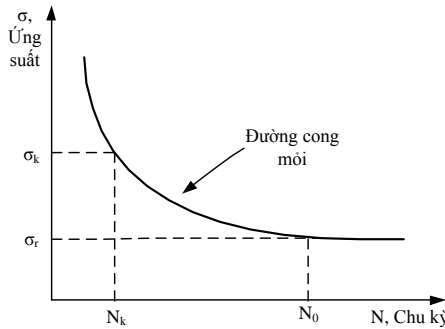
Chương 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1 Hiện tượng mỏi

Hiện tượng mỏi (hay sự mỏi) 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 mỏi, sau đó các vết nứt mỏi ấy phát triển và dẫn tới sự phá hủy vật liệu (sự phá hủy vì mỏi).

2.1.1 Đường cong mỏi

Trên cơ sở kết quả thí nghiệm mỏi, đường cong mỏi được thiết lập nhằm biểu diễn mối quan hệ giữa ứng suất σ (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 2.1. Đường cong mỏi Wöhler [1]

Số chu kỳ N được gọi là tuổi thọ tương ứng với mức ứng suất σ . Đồ thị đường cong mỏi có dạng như Hình 2.1.

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 σ_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 σ_r được gọi là giới hạn bền mỏi (dài hạn) của vật liệu.

Phương trình đường cong mỏi có thể viết dưới dạng:

$$\sigma^m \cdot N = C \quad (2.5)$$

Với C , m là hằng số và m (số mũ) được gọi là bậc của đường cong mỏi. Phương trình (2.5) biểu diễn mối quan hệ giữa ứng suất σ và tuổi thọ N trong miền ứng suất có trị số nằm ngang trong khoảng giới hạn chảy σ_{ch} và giới hạn bền mỏi σ_r của vật liệu. Từ phương trình (2.5) ta có thể xác định tuổi thọ N_k của vật liệu chịu ứng suất thay đổi σ_k ($\sigma_r < \sigma_k < \sigma_{ch}$). Ứng suất σ_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 (2.5) được biểu diễn bằng đường thẳng:

$$m \lg \sigma + \lg N = \lg C \quad (2.6)$$

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

$$N^k \cdot 10^\sigma = B \quad (2.7)$$

trong đó k và B là hằng số.

Đường biểu diễn của phương trình (2.5) 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:

$$N = \frac{B}{(\sigma - \sigma_r)^m} \quad (2.8)$$

Từ (2.8) khi $\sigma \rightarrow \sigma_r$ thì $N \rightarrow \infty$, nghĩa là đường thẳng mỗi nằm ngang cách trục hoành một khoảng σ_r . được gọi là tiệm cận của đường cong mỗi.

2.2 Độ bám dính và phương pháp đánh giá

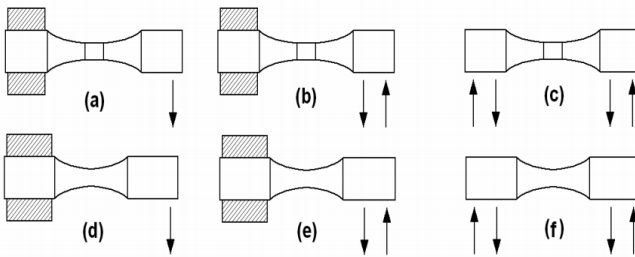
2.3 Độ bền mỗi và phương pháp đánh giá

Quá trình thực hiện thí nghiệm độ bền mỗi 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 mỗi theo mỗi uốn: phương pháp uốn 1 điểm, phương pháp uốn 2 điểm và phương pháp uốn 4 điểm.

Cả 3 phương pháp này có thể áp dụng cho 2 loại mẫu (Hình 2.11): dạng trụ (a, b, c) và dạng yên ngựa (d, e, f).

Mẫu dạng trụ 2.11c sử dụng cho phương pháp thử mỗi uốn 4 điểm được chọn thực hiện trong nghiên cứu này. Loại mẫu này thuận lợi cho quá trình đo chiều dày và nhiễu xạ tia X lớp phủ.



Hình 2.11. Các dạng mẫu thử nghiệm mỗi theo tiêu chuẩn ISO 1143-2010

2.4 Nguyên lý mạ và tính chất của lớp phủ crôm

2.5 Phun phủ HVOF

2.6 Nhiễu xạ tia X và ứng dụng đo ứng suất dư

2.6.1 Hiện tượng nhiễu xạ tia X

2.6.2 Định luật Bragg và điều kiện nhiễu xạ [76]

Khi chiếu tia X có bước sóng ($10^{-4} - 10^2 \text{Å}$) 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:

$$n\lambda = 2d_{hkl}\sin\theta \quad (2.28)$$

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

2.6.3 Các yếu tố ảnh hưởng đến cường độ nhiễu xạ LPA

2.6.4 Chiều sâu xuyên qua của tia X

2.6.5 Nguyên lý đo ứng suất dùng nhiễu xạ tia X

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:

$$\begin{aligned} \varepsilon'_{\phi, \psi} = \varepsilon_{33}^L = & \frac{1+\nu}{E} (\sigma_{11} \cos^2 \phi + \sigma_{12} \sin 2\phi + \sigma_{22} \sin^2 \phi - \sigma_{33}) \sin^2 \psi \\ & + \frac{1+\nu}{E} \sigma_{33} - \frac{\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) \\ & + \frac{1+\nu}{E} (\sigma_{13} \cos \phi + \sigma_{23} \sin \phi) \sin 2\psi \end{aligned} \quad (2.48)$$

Hoặc có thể viết (2.48) dưới dạng:

$$\varepsilon'_{\phi, \psi} = \frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{\phi} \sin^2 \psi - \frac{\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad (2.49)$$

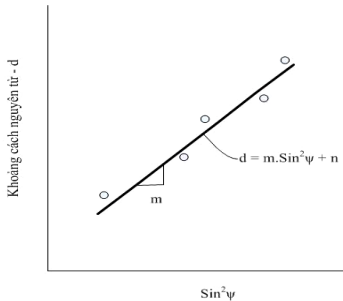
trong đó: $\sigma_{\phi} = \sigma_{11} \cos^2 \phi + \sigma_{12} \sin 2\phi + \sigma_{22} \sin^2 \phi$

Từ phương trình (2.49), khoảng cách nguyên tử $d_{\phi, \psi}$ được tính theo công thức:

$$d_{\phi\psi} = d_0 \frac{1+\nu}{E} \sigma_{\phi} \sin^2 \psi - d_0 \frac{\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22}) + d_0 \quad (2.50)$$

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

$$m = d_0 \frac{1+\nu}{E} \sigma_{\phi} \quad (2.51)$$



Hình 2.22. Đồ thị d - $\text{Sin}^2 \psi$

Từ phương trình (2.51), ứng suất dư có thể được xác định thông qua hệ số góc m là:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{m}{d_0} \left(\frac{E}{1+\nu} \right) \quad (2.52)$$

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:

$$\text{Sin}^2\psi^* = \frac{\nu}{1+\nu} \quad (2.53)$$

Chương 3. VẬT LIỆU- THIẾT BỊ VÀ PHƯƠNG PHÁP THÍ NGHIỆM

3.1 Vật liệu

- Vật liệu nền (thép C45)
- Vật liệu phủ: crôm cứng và carbide vonfram

3.2 Thiết bị phục vụ thí nghiệm

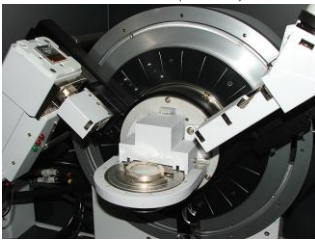
Một số thiết bị được sử dụng để đánh giá các tính chất của lớp phủ: chiều dày lớp phủ, ứng suất dư, khảo sát mặt gãy mỏi của chi tiết được giới thiệu ở Hình 3.1.



a) Lò nung Thermal Electric Furnace (Nhật)



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



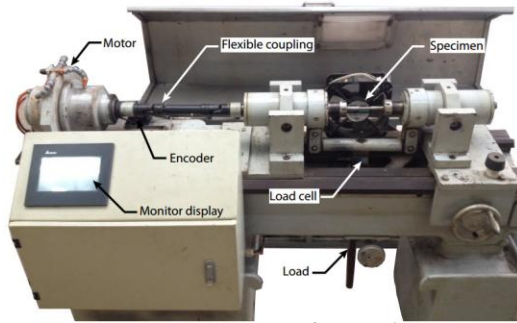
c) Máy nhiễu xạ tia X - X'Pert Pro



d) Hệ thống SEM-S4800

Hình 3.1. Một số thiết bị chính được sử dụng trong nghiên cứu

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

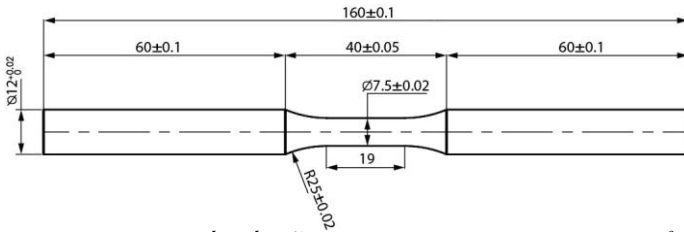


Hình 3.16. Máy thí nghiệm mỏi uốn 4 điểm MU-2016

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

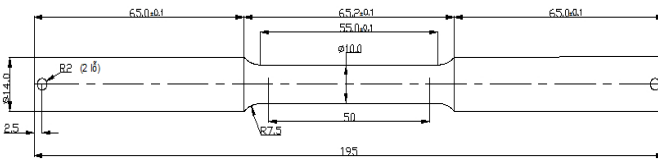
3.3.1 Kết cấu chi tiết mẫu

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 3.19.



Hình 3.19. Bản vẽ thiết kế mẫu thí nghiệm mỏi theo tiêu chuẩn ISO 1143:2010

Khi tiến hành thí nghiệm để xác định độ bền mỏi cần phải dự đoán mức ứng suất ban đầu để có thể phân bố các mức ứng suất chạy mỏi trên máy thí nghiệm mỏi. Dựa vào tiêu chuẩn ISO 6892-1(2009) mẫu chi tiết thí nghiệm kiểm tra độ bền kéo chế tạo từ thép C45 được đề xuất như ở Hình 3.20.

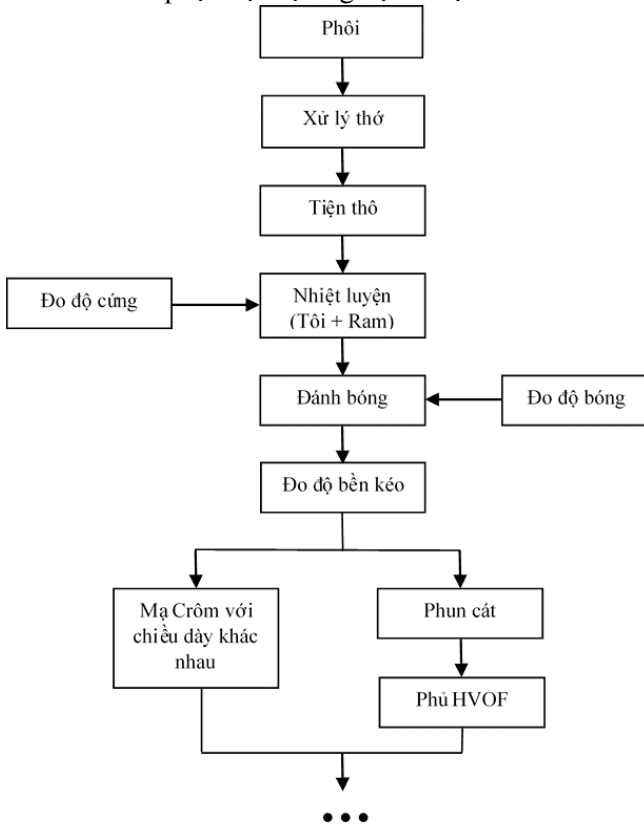


Hình 3.20. Bản vẽ thiết kế mẫu thử độ bền kéo

3.3.2 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 nhất, 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 3.21.



Hình 3.21. Quy trình chế tạo chi tiết mẫu phục vụ thực nghiệm

3.4 Thiết kế thí nghiệm theo phương pháp quy hoạch thực nghiệm

3.4.1 Lựa chọn số lần thí nghiệm

Để xây dựng đường phương trình mô hình ứng với các chiều dày khác nhau, cần tiến hành nghiên cứu ảnh hưởng của thông số đầu vào là ứng suất áp tải σ_a và thông số đầu ra là số chu kỳ N_f tương ứng. Với một thông số đầu vào, theo phương pháp quy hoạch thực nghiệm, ta có số thí nghiệm là [79]:

$$N=2^k + 2.k + n_0 \quad (3.1)$$

Trong đó: k là số yếu tố ảnh hưởng; n_0 số thí nghiệm ở tâm phương án
 Như vậy chỉ với một yếu tố ảnh hưởng là ứng suất áp tải ($k=1$) và chọn số thí nghiệm tâm phương án $n_0=1$, ta có số thí nghiệm là:

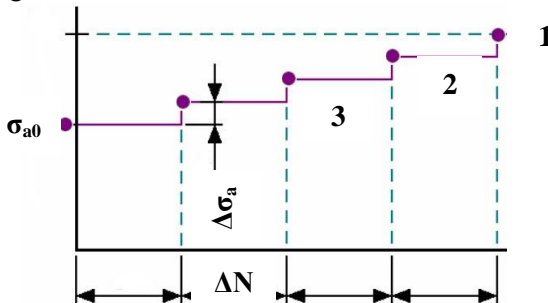
$$N=2^1 + 2.1 + 1 = 5$$

Để đáp ứng số liệu có độ tin cậy cao và mang ý nghĩa thống kê, số lần lặp lại của mỗi thí nghiệm là 3 lần [79-81]

3.4.2 Quá trình thí nghiệm mỏi

Để xây dựng phương trình mỏi cho một loạt mẫu với số liệu thực nghiệm đạt độ tin cậy cao nghĩa là phải thực hiện thí nghiệm mỏi ít nhất tại 5 mức ứng suất và mỗi mức ứng suất lặp lại 3 lần [80, 81]. Dựa vào đường cong mỏi chuẩn của vật liệu C45 và giới hạn chảy σ_c có được từ thực nghiệm ta có thể đề xuất mức ứng suất cơ sở để tiến hành thí nghiệm mỏi.

Mức ứng suất cơ sở được lựa chọn sơ bộ dựa vào 3 giá trị đầu tiên là $(66\%, 59\%, 56\%)\sigma_c$ [46]. Các giá trị sơ bộ σ_f và b trên mô hình toán đường cong mỏi được tính toán qua các số liệu thực nghiệm ứng với giới hạn chảy σ_c trên. Từ các giá trị σ_f và b sơ bộ có được, đường cong mỏi sơ bộ được thành lập để làm cơ sở cho việc lựa chọn các mức ứng suất tiếp theo cho hai điểm ứng suất còn lại. Để xác định giới hạn mỏi, từ giá trị ứng suất ứng với 10^7 chu kỳ được xác định qua đường cong mỏi sơ bộ, ta tiến hành thí nghiệm mỏi để xác định số chu kỳ thực nghiệm tương ứng. Sau khi xác định cặp giá trị ứng suất - chu kỳ này, ta thêm hoặc bớt 1 lượng $\Delta\sigma_a$ cho đến khi đạt được số chu kỳ là 10^7 (giới hạn mỏi) ứng với mức ứng suất σ_{a0} . Cách bố trí thí nghiệm được thể hiện trên Hình 3.23.



Hình 3.23. Các bước lựa chọn ứng suất thí nghiệm [81]

Khi đạt được toàn bộ dữ liệu thực nghiệm, phương pháp bình phương tối thiểu được sử dụng để xác định chính xác hệ số σ_f và b.

3.5 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 mỏi 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 crom 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. Qua quá trình khảo sát, phân tích tài liệu nghiên cứu ảnh hưởng của lớp tăng bền bề mặt đến độ bền mỏi của chi tiết máy, đặc biệt là các công trình

nghiên cứu của Sirina và Genel [83, 84], đã sử dụng tỷ lệ chiều dày phủ/đường kính trục (t/d) được sử dụng để nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của chiều dày lớp mạ crôm và lớp phủ HVOF.

Từ kết quả khảo sát thực tế, các công trình nghiên cứu về chiều dày lớp mạ phủ [20-22, 64, 78, 85-91], đề xuất chi tiết mẫu có vùng kích thước Ø7.5 mm được mạ phủ với chiều dày nhỏ nhất để nghiên cứu là 10 µm và chiều dày tối đa là 90 µm. 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 [80,81]. Vậy, số lượng mẫu có thể chia như sau:

- + 15 mẫu mạ với chiều dày nhỏ nhất, dày 10 µm;
- + 15 mẫu mạ với chiều dày thông thường, dày 30 µm;
- + 15 mẫu mạ với chiều dày thông thường, dày 60 µm;
- + 15 mẫu mạ với chiều dày tối đa, dày 90 µm.

Trong công nghệ phủ HVOF, ta không thể phủ lớp quá mỏng vì yếu tố kỹ thuật như phải phun hạt Al₂O₃ 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 3 chiều dày 30 µm, 60 µm, 90 µm với số lượng mẫu như sau:

- +15 mẫu phủ dày 30(µm): chiều dày nhỏ nhất
- +15 mẫu phủ dày 60(µm): chiều dày thông thường
- +15 mẫu phủ dày 90 (µm): chiều dày tối đa

3.6 Quy trình mạ crôm và phủ carbide vonfram

3.6.1. Quy trình mạ crôm

Quá trình thực hiện mạ được thực hiện tại công ty Cơ khí Minh Phương (Linh Trung - Thủ Đức, Tp. HCM). Mạ crôm được thực hiện theo quy trình chuẩn và sử dụng dung dịch mạ chi ra ở Bảng 3.6 với các thông số mạ được áp dụng trong công nghiệp hiện nay.

Bảng 3.6. Dung dịch mạ và chế độ mạ [64]

Thành phần dung dịch và chế độ mạ	Hàm lượng (g/l)
CrO ₃	250
H ₂ SO ₄	2.0
Nồng độ Cr ³⁺	3 - 6
Nhiệt độ, °C	55
i _a (A/dm ²)	30
(%)	1
Tỉ lệ CrO ₃ /H ₂ SO ₄	100/1
Tỉ lệ diện tích các cực S _a /S _c	1/1 - 2 1
Tốc độ mạ, µm/ph	0.15 - 0.60



Hình 3.26. Chi tiết mẫu sau khi mạ crôm

3.6.2 Quy trình phủ HVOF

Quá trình phun phủ lớp phủ bột WC-10Co-4Cr trên nền trục thép C45 bằng công nghệ phun nhiệt HVOF được thực hiện tại công ty TNHH Phun phủ An Bình (Tp. Hồ Chí Minh).

Trước khi tiến hành phun phủ, mẫu được tạo nhám bằng cách phun cát Al_2O_3 với các thông số như ở Bảng 3.7. Sau quá trình phun cát tạo nhám bề mặt, chi tiết mẫu được phủ trên hệ thống phun phủ Jet-Kote theo các thông số như ở Bảng 3.8. Thông số của quá trình phủ được lựa chọn dựa trên sự tối ưu về độ cứng, độ xốp và độ bám dính của lớp phủ thông qua luận án Tiến sĩ của tác giả Nguyễn Thanh Phú [60].

Bảng 3.7. Thông số quá trình phun cát tạo nhám

Áp suất	4 bar
Khoảng cách	150 mm
Góc phun	60~90°
Loại cát: Al_2O_3	0,443mm ~ 0,686mm
Độ nhám bề mặt	Ra = 4,3 μ m

Bảng 3.8. Thông số quá trình phủ HVOF

Áp suất oxy	150 psi
Lưu lượng khí oxy	200 l/min
Áp suất khí cháy (LPG)	50 psi
Lưu lượng khí cháy (LPG)	40 l/min
Áp suất khí cho máy cấp bột	80~100 psi
Lưu lượng khí cấp bột	10 l/min
Khoảng cách phun	250 mm
Tốc độ quay	240 rpm
Góc phun	80~90°
Tốc độ tịnh tiến	600 mm/min



a) Quá trình phủ carbide



b) Sau khi phủ xong

Hình 3.28. Quá trình phủ HVOF



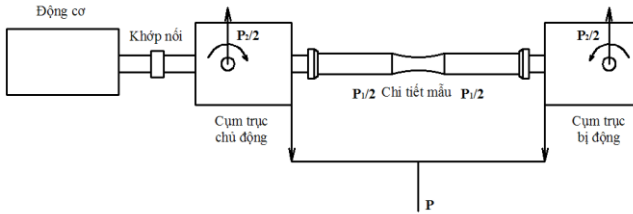
Hình 3.29. Chi tiết mẫu sau khi phủ HVOF

Chương 4. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU LÝ THUYẾT

4.1 Mô hình toán đường cong môi cho chi tiết dạng trục

4.1.1 Sơ đồ mô hình thí nghiệm mỏi

Sơ đồ nguyên lý tạo môi uốn quay 4 điểm trên máy thí nghiệm mỏi cho chi tiết dạng trục được trình bày trong Hình 4.1.

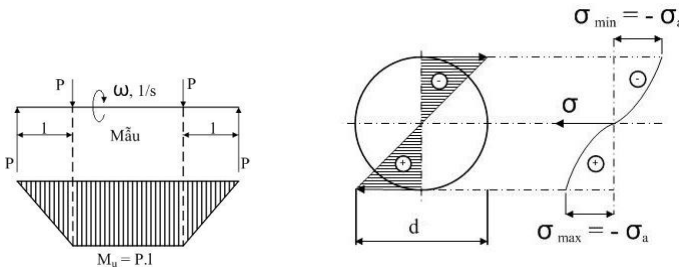


Hình 4.1. Sơ đồ nguyên lý tạo môi uốn quay 4 điểm

Động cơ truyền chuyển động quay cho cụm trục chủ động và trục bị động thông qua khớp nối mềm và chi tiết mẫu. Lực tác dụng tác động lên hai đầu của chi tiết mẫu theo phương thẳng đứng để tạo mỏi. Giá trị lực tác dụng sẽ được đo bằng cảm biến lực (loadcell). Số chu kỳ gây mỏi được đo bằng bộ mã hoá vòng quay (Encoder). Các thông số về lực tác dụng và số chu kỳ sẽ được hiển thị trên màn hình

Đường cong mỏi (S-N) được xây dựng trên cơ sở giá trị ứng suất σ_a và số chu kỳ phá hủy N . Tuy nhiên, khi thực hiện thí nghiệm mỏi, tải tác dụng lên chi tiết mẫu là lực P (Hình 4.2) nên giá trị ứng suất được tính thông qua lực tác dụng này.

Dựa vào tải tác dụng lên chi tiết mẫu ta có sơ đồ chịu lực sau:



Hình 4.2. Sơ đồ các lực tác dụng lên chi tiết mẫu

- Mômen uốn của chi tiết mẫu được tính theo công thức:

$$M_u = P.l \text{ (Nmm)} \quad (4.1)$$

- Ứng suất uốn tác dụng lên chi tiết mẫu:

$$\sigma_u = \frac{M_u}{W_u} = \frac{P.l}{W_u} = \frac{32P.l}{\pi.d^3} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (4.2)$$

Trong đó: + P (N) là lực tác dụng

+ l (mm) là khoảng cách từ vị trí đặt lực đến tâm cụm lắc

+ W_u (mm³) là mômen chống uốn

+ d (mm) là đường kính chi tiết mẫu

4.1.2 Mô hình toán đường cong mỏi cho chi tiết dạng trục

Xây dựng mô hình toán của đường cong mỏi là thiết lập được phương trình đường cong mỏi với mối quan hệ ứng suất áp tải σ_a và số chu kỳ đạt được N_f . Khi đánh giá độ bền mỏi với tiêu chí là ứng suất-biến dạng, có ba mô hình được sử dụng rộng rãi nhất là mô hình Stussi, Weibull và Basquin.

4.1.2.1 Mô hình Stussi

Đường cong mỏi theo mô hình Stussi được xác định qua ứng suất ứng với chu kỳ mỏi N [1]:

$$\sigma_E = \frac{\sigma_T + CN^p \cdot \sigma_F}{1 + CN^p} \quad (4.3)$$

Trong đó : σ_E : Ứng suất ứng với chu kỳ mỏi N ; σ_F : Giới hạn mỏi
 σ_T : giới hạn bền kéo ; C, p : hệ số chống mỏi

Để xác định các hằng số C và p , người ta dùng phương pháp Thử và Sai (the Trail-and-Error) để tìm trị số σ_F .

4.1.2.2 Mô hình Weibull

Mô hình toán phương trình đường cong mỏi Weibull[1] được xử lý trong hệ trục tọa độ $\lg\sigma - \lg N$:

$$\lg N = \lg k - m \lg(\sigma_E - \sigma_F) \quad (4.4)$$

Trong đó: N : số chu kỳ; σ_E : Ứng suất
 σ_F : Giới hạn mỏi; k, m : hằng số của vật liệu

Giá trị σ_F cũng được xác định theo phương pháp Thử-Và-Sai. Mô hình này thường được sử dụng khi đánh giá xác suất phá hủy mỏi của mẫu.

4.1.2.3 Mô hình Basquin:

Để xây dựng đường cong mỏi với mối quan hệ ứng suất và chu kỳ, Basquin đã đề xuất mô hình toán [92]

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \quad (4.5)$$

Trong đó: σ_a : biên độ ứng suất; σ'_f : hệ số độ bền mỏi
 $2N_f$: số chu kỳ phá hủy; b : hệ số mũ Basquin

Mô hình toán với phương trình mũ này được đánh giá là tương thích với phương trình mỏi Wöhler và được sử dụng nhiều trong nghiên cứu mỏi hiện nay [93 - 97], đặc biệt là trong đánh giá ảnh hưởng của xử lý bề mặt [98] cũng như phủ bề mặt đến độ bền mỏi của chi tiết nền [99 - 101].

Qua quá trình tham khảo, phân tích các công trình nghiên cứu ảnh hưởng của lớp phủ bề mặt đến độ bền mỏi của chi tiết đã cho thấy, mô hình Basquin (4.5) là phù hợp để đánh giá ảnh hưởng của lớp mạ crôm và lớp phủ HVOF. Tuy nhiên, đây là mô hình tổng quát dùng trong nghiên cứu về độ bền mỏi nói chung. Để có thể áp dụng vào nghiên cứu trong bài toán mỏi uốn xoay ứng với chi tiết trục, cần xây dựng mô hình toán với các hệ số σ'_f (hệ số độ bền mỏi) và b (hệ số mũ) tương ứng dựa trên mô hình toán này.

Từ mô hình thí nghiệm mỗi uốn quay 4 điểm cho chi tiết dạng trục, σ_a (biên độ ứng suất) chính là ứng suất uốn σ_u được tính trên công thức 4.2 và $2N_f$ là số chu kỳ có từ thực nghiệm. Các hệ số σ'_f và b được xác định thông qua các thông số này.

Với các cặp giá trị $(\sigma_{u1}, 2N_{f1})$, $(\sigma_{u2}, 2N_{f2}) \dots (\sigma_{un}, 2N_{fn})$ nhận được từ thí nghiệm chỉ là những giá trị gần đúng nên chúng không hoàn toàn là nghiệm đúng của phương trình $\sigma_u = \sigma'_f (2N_f)^b$. Vì vậy sai lệch so với phương trình chuẩn là:

$$\begin{aligned}\sigma_{u1} - \sigma'_f (2N_{f1})^b &= v_1 \\ \sigma_{u2} - \sigma'_f (2N_{f2})^b &= v_2 \\ \sigma_{u3} - \sigma'_f (2N_{f3})^b &= v_3 \\ &\dots \\ \sigma_{un} - \sigma'_f (2N_{fn})^b &= v_n\end{aligned}$$

với v_i là các sai số.

Ở đây, phương pháp bình phương tối thiểu được sử dụng nên tổng sai phân S được xác định là:

$$S = \sum_{j=1}^n v_j^2 = (\sigma'_f (2N_{fn})^b - \sigma_{un})^2 \rightarrow \min \quad (4.6)$$

Vậy σ'_f và b phải thỏa các phương trình:

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial \sigma'_f} = \sum_{j=1}^n (2N_{fn})^b (\sigma'_f (2N_{fn})^b - \sigma_{un}) = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial b} = \sum_{j=1}^n \sigma'_f \cdot b \cdot (2N_{fn})^{b-1} (\sigma'_f (2N_{fn})^b - \sigma_{un}) = 0 \end{cases} \quad (4.7)$$

Giải phương trình trên ta được:

$$\sigma'_f = \frac{\sum_{j=1}^n (\ln \sigma_u) - b \sum_{j=1}^n (\ln 2N_f)}{n} \quad (4.8)$$

$$b = \frac{n \sum_{j=1}^n (\ln \sigma_u \cdot \ln 2N_f) - \sum_{j=1}^n (\ln \sigma_u) \sum_{j=1}^n (\ln 2N_f)}{n \sum_{j=1}^n (\ln \sigma_u)^2 - (\sum_{j=1}^n \ln \sigma_u)^2}$$

Với phương sai và hệ số xác định được tính như sau:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{j=1}^n (\sigma_{uj} - \sigma'_f (2N_f)^b)$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum \ln 2N_f \cdot \ln \sigma_u - \frac{1}{n} \sum \ln 2N_f \sum \ln \sigma_u \right]^2}{\left[\sum (\ln 2N_f)^2 - \frac{(\sum \ln \sigma_u)^2}{n} \right] \left[\sum (\ln \sigma_u)^2 - \frac{(\sum \ln 2N_f)^2}{n} \right]} \quad (4.9)$$

Từ các tính toán, phân tích trên, mô hình toán đường cong mỗi uốn cho chi tiết dạng trục sẽ là:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_u = \sigma'_f (2N_f)^b \\ \sigma_u = \frac{32Pl}{\pi \cdot d^3} \\ \sigma'_f = \frac{\sum_{j=1}^n (\ln \sigma_u) - b \sum_{j=1}^n (\ln 2N_f)}{n} \\ b = \frac{n \sum_{j=1}^n (\ln \sigma_u \cdot \ln 2N_f) - \sum_{j=1}^n (\ln \sigma_u) \sum_{j=1}^n (\ln 2N_f)}{n \sum_{j=1}^n (\ln \sigma_u)^2 - (\sum_{j=1}^n \ln \sigma_u)^2} \end{array} \right.$$

4.2 Hàm hấp thụ tia X trong quá trình đo ứng suất

4.2.1 Giới thiệu về hàm hấp thụ tia X

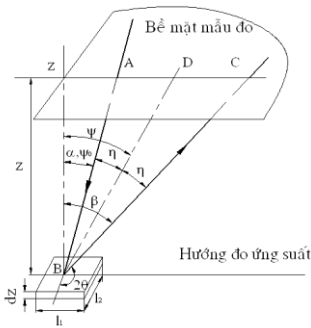
Như đã trình bày trong chương 2, ứng suất được tính thông qua vị trí của đỉnh nhiễu xạ tia X. Tuy nhiên, việc xác định chính xác vị trí đỉnh của đường nhiễu xạ thì phải được hiệu chỉnh bởi hệ số phân cực và hàm hấp thụ LPA (*Lorentz-Polarization and Absorption*). Trong đó hàm hấp thụ A là quang trọng nhất bởi vì nó ảnh hưởng lớn nhất kết quả đo ứng suất. Do vậy, tác giả nghiên cứu thiết lập hàm hấp thụ tia X để hiệu chỉnh đường nhiễu xạ trong quá trình đo ứng suất. Từ đó, kết quả đo ứng suất sẽ có độ chính xác cao hơn.

4.2.2 Phương pháp đo kiểu Ω và kiểu Ψ

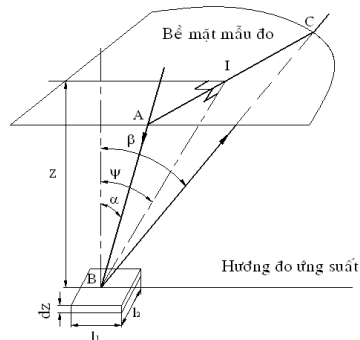
Phương pháp đo Ω (*Iso-Inclination method*) là phương pháp đo mà tia tới AB và tia nhiễu xạ BC đều nằm trong mặt phẳng đo ứng suất (Hình 4.4). Tia tới AB có cường độ nhiễu xạ là I_0 ứng với diện tích mặt cắt ngang là 1×1 (mm). Tia nhiễu xạ BC có cường độ là I thu được trên một thể tích tinh thể được nhiễu xạ được tính qua diện tích nhiễu xạ là S tương ứng

chiều dài l_1 và chiều rộng l_2 với chiều cao là dz . Tia AB và BC tạo một góc α và β với phương pháp tuyến BZ của bề mặt đo. Có hai cách đo trong phương pháp đo Ω là cố góc ψ và ψ_0 . Đối với phương pháp đo Ω cố định góc ψ_0 , tia tới AB được cố định và tia BC thay đổi (tương ứng với thay đổi góc nhiễu xạ 2θ). Trong khi phương pháp đo Ω cố định góc ψ , tia phân giác BD của tia tới AB và tia nhiễu xạ BC được cố định, tia tới AB và tia nhiễu xạ BC thay đổi (tương ứng với thay đổi góc nhiễu xạ 2θ)

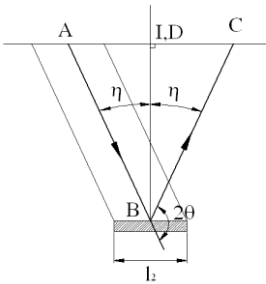
Đối với phương pháp đo Ψ (*Side-Inclination method*), tia tới AB và tia nhiễu xạ BC nằm trong mặt phẳng vuông góc với mặt phẳng đo ứng suất (Hình 4.5a)



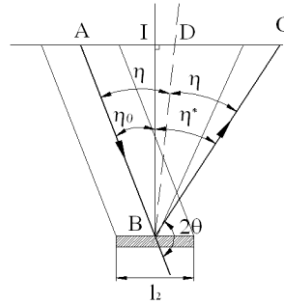
Hình 4.4. Phương pháp đo Ω



Hình 4.5a. Phương pháp đo Ψ



Hình 4.5b. Cố định η



Hình 4.5c. Cố định η_0

Tương tự phương pháp đo Ω , phương pháp đo Ψ cũng có hai cách đo là cố định góc η và cố định góc η_0 . Đối với phương pháp đo Ψ cố định góc η_0 (Hình 4.5b), tia tới AB được cố định với đường vuông góc với bề mặt mẫu đo BI một góc η_0 và tia nhiễu xạ BC thay đổi ứng với góc 2θ . Trong khi phương pháp đo Ψ cố định góc η (Hình 4.5c), tia phân giác BD của góc hợp bởi tia tới AB và tia nhiễu xạ BC được cố định vuông góc với bề mặt mẫu đo.

4.2.3 Hàm hấp thu tia x của phương pháp đo Ω và Ψ

Để lập hàm hấp thu tia X, cường độ nhiễu xạ I và cường độ tia tới I_0 phải được xác định. Sự hấp thu tia X là sự chênh lệch giữa hai cường độ tia X này. Cường độ nhiễu xạ áp dụng cho vật liệu được tính theo công thức [104,105]:

$$dI = aI_0 \exp[-\mu(F_{ij}^{AB} \cdot AB + F_{ij}^{BC} \cdot BC)]Sdz \quad (4.10)$$

Trong đó F_{ij} là thông số hướng của vật liệu, đối với vật liệu dị hướng nó là ma trận của các cosin chỉ hướng. Đối với vật liệu đẳng hướng, thông số hướng bằng nhau theo mọi phương và là hằng số nên công thức trên được viết lại [105]: $dI = aI_0 \exp[-\mu(AB + BC)]Sdz$

$$\text{Với } AB = \frac{z}{\cos \alpha}, BC = \frac{z}{\cos \beta}$$

$$\begin{aligned} I &= \int_0^{\infty} I_0 a \exp\left[-\mu\left(\frac{z}{\cos \alpha} + \frac{z}{\cos \beta}\right)\right] l_1 l_2 dz \\ &= \frac{I_0 a}{\mu} l_1 l_2 \frac{\cos \alpha \cdot \cos \beta}{\cos \beta + \cos \alpha} \exp\left[-\mu z \left(\frac{1}{\cos \alpha} + \frac{1}{\cos \beta}\right)\right] \Bigg|_0^{\infty} \\ &= \frac{I_0 a}{\mu} l_1 l_2 \frac{\cos \alpha \cdot \cos \beta}{\cos \beta + \cos \alpha} \end{aligned}$$

Hàm hấp thu tổng quát được tính:

$$A = \frac{I}{I_0} = l_1 l_2 \frac{\cos \alpha \cdot \cos \beta}{\cos \alpha + \cos \beta} \quad (4.12)$$

Đây là công thức tính hàm hấp thu tổng quát đối với hai phương pháp đo Ω và Ψ .

4.2.3.1 Trường hợp không giới hạn diện tích nhiễu xạ

Trong trường hợp đo ứng suất không giới hạn diện tích nhiễu xạ (Hình 4.4), chiều dài l_1 và chiều rộng l_2 được xác định: $l_1 = \frac{1}{\cos \alpha}, l_2 = 1$

Đối với phương pháp đo Ω cố định góc ψ_0 , ta có: $\alpha = \psi_0$ và $\beta = \psi_0 + 2\eta$

Suy ra: $\cos \alpha = \cos \psi_0$

$$\cos \beta = \cos(\psi_0 + 2\eta) = -\cos(\psi_0 - 2\theta) \quad (4.13)$$

Với $\eta = 90^\circ - \theta$

Thay công thức (4.13) vào công thức (4.12), ta có hàm hấp thu A cho phương pháp đo Ω cố định góc ψ_0 :

$$A = \frac{-\cos(\psi_0 - 2\theta)}{\cos\psi_0 - \cos(\psi_0 - 2\theta)} \quad (4.14)$$

Đối với phương pháp đo Ω cố định góc ψ , ta có: $\psi_0 = \psi - \eta$ và $\eta = 90^\circ - \theta$

$$\cos\alpha = \cos\psi_0 = \sin(\psi + \theta)$$

Suy ra
$$\cos\beta = \cos(\psi + \eta) = \cos(\psi + 90^\circ - \theta) = -\sin(\psi - \theta) \quad (4.15)$$

Thay vào công thức (4.12), ta được phương trình tính hàm hấp thu cho phương pháp Ω cố định góc ψ :

$$A = \frac{-\sin(\psi - \theta)}{\sin(\psi + \theta) - \sin(\psi - \theta)} \quad (4.16)$$

Công thức (4.16) tính hàm hấp thu tia X cho phương pháp đo Ω cố định góc ψ được thiết lập bởi Koistinen [102].

Đối với phương pháp đo Ψ , chiều dài l_1 và chiều rộng l_2 được xác định :

$$l_1 = \frac{1}{\cos\psi}, l_2 = \frac{1}{\cos\eta} \quad (4.17)$$

Từ phương pháp đo Ψ cố định η_0 , ta có: $\cos\alpha = \cos\psi\cos\eta_0$ và $\cos\beta = \cos\psi\cos\eta^*$, thay $\eta_0 = 90^\circ - \theta_0$, $\eta^* = 180^\circ - 2\theta - \eta_0$

Suy ra
$$\cos\alpha = \cos\psi\cos\eta_0 = \cos\psi\sin\theta_0$$

$$\cos\beta = \cos\psi\cos\eta^* = \cos\psi\cos(180^\circ - 2\theta - \eta_0) \quad (4.18)$$

$$= \cos\psi\cos(90^\circ - (2\theta - \theta_0)) = \cos\psi\sin(2\theta - \theta_0)$$

Thay vào (4.17) và (4.12) ta được, phương trình tính hàm hấp thu cho phương pháp Ψ cố định góc η_0 :

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{\cos\psi\cos\eta_0} \frac{\cos\psi\cos\eta_0\cos\psi\sin(2\theta - \theta_0)}{\cos\psi\cos\eta_0\cos\psi\sin\theta_0 + \cos\psi\sin(2\theta - \theta_0)} \\ &= \frac{\sin(2\theta - \theta_0)}{\sin\theta_0 + \sin(2\theta - \theta_0)} \end{aligned} \quad (4.19)$$

Đối với phương pháp Ψ cố định góc η , thay góc $\theta = \theta_0$ vào công thức (4.19) ta có hàm hấp thu:

$$A = \frac{1}{2} \quad (4.20)$$

4.2.3.2 Trường hợp giới hạn diện tích nhiễu xạ

Trong trường hợp giới hạn diện tích nhiễu xạ, chiều dài l_1 và chiều rộng l_2 được xác định $l_1 = 1, l_2 = 1$

Thay vào công thức (4.12), ta có công thức hàm hấp thu tổng quát cho phương pháp đo Ω và Ψ trong trường hợp giới hạn diện tích nhiễu xạ :

$$A = \frac{I}{I_0} = \frac{\cos \alpha \cdot \cos \beta}{\cos \alpha + \cos \beta} \quad (4.21)$$

Với phương pháp đo Ω cố định góc ψ_0 , ta thay (4.13) vào (4.21), ta có:

$$A = \frac{-\cos \psi_0 \cdot \cos(\psi_0 - 2\theta)}{\cos \psi_0 - \cos(\psi_0 - 2\theta)} \quad (4.22)$$

Trong tự, ta thay (4.15) vào (4.21) đối với phương pháp đo Ω cố định góc ψ , ta có:

$$A = \frac{-\sin(\psi + \theta) \cdot \sin(\psi - \theta)}{\sin(\psi + \theta) - \sin(\psi - \theta)} = \frac{\cos 2\psi - \cos 2\theta}{4 \cdot \sin \theta \cdot \cos \psi} \quad (4.23)$$

Với phương pháp đo Ψ cố định góc η_0 , ta thay (4.18) vào (4.21) ta được phương trình tính hàm hấp thu cho phương pháp Ψ cố định góc η_0 :

$$A = \frac{\cos \psi \cos \eta_0 \cos \psi \sin(2\theta - \theta_0)}{\cos \psi \sin \theta_0 + \cos \psi \sin(2\theta - \theta_0)} = \frac{\cos \psi \cdot \sin \theta_0 \cdot \sin(2\theta - \theta_0)}{\sin \theta_0 + \sin(2\theta - \theta_0)} \quad (4.24)$$

Đối với phương pháp đo Ψ cố định góc η , ta thay góc $\theta = \theta_0$ vào (4.24) ta có:

$$A = \frac{1}{2} \cos \psi \sin \theta \quad (4.25)$$

Vậy công thức tính hàm hấp thu X cho cả 2 phương pháp đo Ω và Ψ được tổng hợp trên Bảng 4.1

Bảng 4.1. Hàm hấp thu tia X cho phương pháp đo Ω và Ψ

Phương pháp đo	Góc cố định	Không giới hạn diện tích nhiễu xạ	Giới hạn diện tích nhiễu xạ
Iso(Ω)	ψ_0	$\frac{-\cos(\psi_0 - 2\theta)}{\cos \psi_0 - \cos(\psi_0 - 2\theta)}$	$\frac{-\cos \psi_0 \cdot \cos(\psi_0 - 2\theta)}{\cos \psi_0 - \cos(\psi_0 - 2\theta)}$
	ψ	$\frac{-\sin(\psi - \theta)}{\sin(\psi + \theta) - \sin(\psi - \theta)}$	$\frac{\cos 2\psi - \cos 2\theta}{4 \cdot \sin \theta \cdot \cos \psi}$
Side(Ψ)	η_0	$\frac{\sin(2\theta - \theta_0)}{\sin \theta_0 + \sin(2\theta - \theta_0)}$	$\frac{\cos \psi \cdot \sin \theta_0 \cdot \sin(2\theta - \theta_0)}{\sin \theta_0 + \sin(2\theta - \theta_0)}$
	η	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2} \cos \psi \sin \theta$

4.3 Tính sai số cho ứng suất

Sau khi có dữ liệu nhiễu xạ, có nhiều phương pháp để xấp xỉ đường nhiễu xạ để tìm ra đỉnh nhiễu xạ từ đó tính được khoảng cách các mặt nguyên tử d . Một số phương pháp xấp xỉ có thể dùng: dùng hàm Parabolic, C.o.G, Lorentzian, Gauss... [106]. Trong đó, xấp xỉ đường nhiễu xạ với hàm Gauss cho độ chính xác và sai số thấp nhất vì hàm Gauss mang tính thông kê và có độ tin cậy cao. Do vậy, trong luận án sẽ thành lập công thức tính toán sai số khi tính toán ứng suất dư từ giá trị nhiễu xạ khi áp dụng hàm Gauss. Phương pháp bình phương tối thiểu được sử dụng để xác định sai số ứng suất dư.

Kết quả sai số của ứng suất được tính theo công thức:

$$\sigma_s = K \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^n A_j^2 \sigma_{pi}^2} \quad (4.30)$$

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

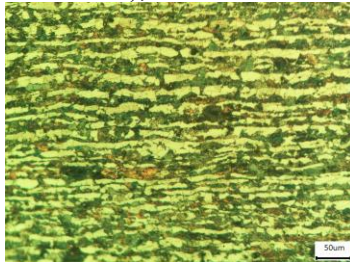
$$\Delta\sigma_\varphi = \pm 1.96\sigma_s \quad (4.31)$$

Chương 5. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM VÀ BÀN LUẬN

5.1 Nghiên cứu đề xuất quy trình xử nhiệt chi tiết mẫu

5.1.1 Xử lý thớ

Mục đích của quá trình này là làm mất tổ chức thớ (texture) của phôi do quá trình kéo/cán gây ra, đồng thời làm nhỏ hạt và tạo tính đẳng hướng trong mẫu. Phôi thép được sử dụng trong nghiên cứu này là thép cán đường kính nhỏ ($\phi 14$ mm) nên sau khi kéo/cán có cấu trúc hạt bị kéo dài theo phương cán (rolling direction-RD), hình thành cấu trúc thớ.

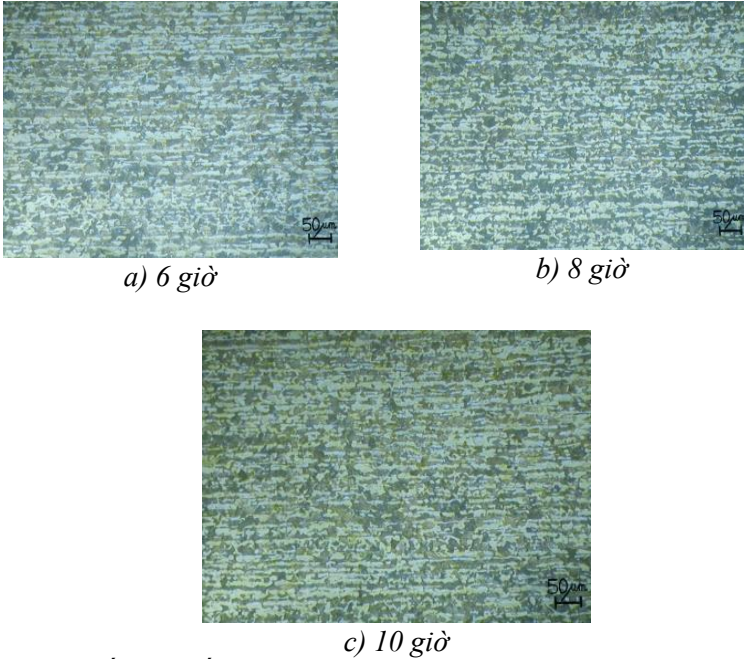


Hình 5.1. Mẫu trước khi xử lý thớ phương cán

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 thớ rất mạnh (Hình 5.1, ảnh chụp theo phương RD). 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 thớ. Ngoài ra, nhiều công trình nghiên cứu cũng cho thấy sự ảnh hưởng của cấu

trúc thớ đến cơ tính, khả năng cắt gọt của phôi thép và chi tiết máy [107-110]. Do vậy, một số quy trình xử lý nhiệt loại bỏ cấu trúc thớ nhằm cải thiện cơ tính của thép đã được Schindler và Abrão nghiên cứu [110, 111].

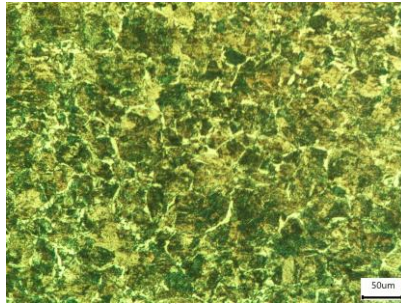
Một quy trình ủ kết tinh lại thường được sử dụng cho thép C45 đã tiến hành thực nghiệm cho phôi thép kéo/cán đường kính $\phi 14$ mm ở nhiệt độ ở 500°C , thời gian giữ nhiệt lần lượt là 6, 8 và 10 giờ [112]. Kết quả cho thấy cấu trúc thớ có cải thiện nhưng vẫn còn hiện diện khá đáng kể, thể hiện trong Hình 5.2



Hình 5.2. Cấu trúc tế vi của thép C45 theo phương cán sau qui trình ủ kết tinh lại thông dụng ở nhiệt độ 500°C . (Dung dịch tẩm thực: 4% Nital)

Trên cơ sở đó, một quy trình nhằm loại bỏ một cách triệt để cấu trúc thớ, làm cho hình dạng hạt đồng nhất cả phương theo chiều cán và phương vuông góc chiều cán đã được đề xuất. Quy trình xử lý nhiệt này giúp nâng cao tính cắt gọt, tạo cấu trúc hạt nhỏ nhằm nâng cao độ bền mỏi cho mẫu thép C45. Kết quả nghiên cứu này đã được công bố trong công trình khoa học [113, 114].

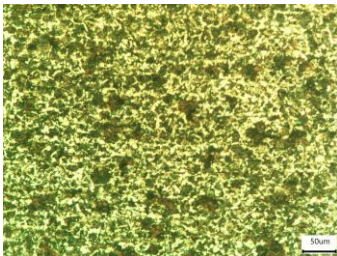
Kết quả nghiên cứu cho thấy, tất cả các quy trình đều làm mất tổ chức thớ [113]. Tuy nhiên, phôi được thường hóa theo quy trình đề xuất tại nhiệt độ 920°C trong 15 phút làm mất tổ chức thớ triệt để nhất và quy trình này được áp dụng để phục vụ các bước chế tạo mẫu tiếp theo.



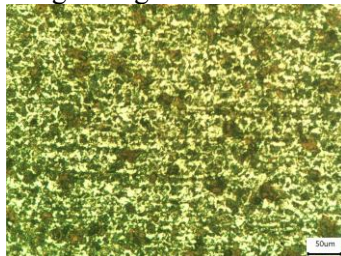
Hình 5.4. Mẫu sau khi xử lý thớ

Hình 5.4 trình bày kết quả xử lý thớ khi xem xét tổ chức tế vi dưới kính hiển vi quang học sau khi xử lý thớ. Ở đây ta thấy tổ chức thớ trong mẫu đã biến mất (ảnh chụp theo phương RD). Tuy nhiên, kích thước hạt còn lớn khoảng 15 – 50 μm và không đều.

Để làm nhỏ hạt và tạo tính đẳng hướng, một quy trình mới được đề xuất để làm nhỏ hạt được trình bày [114]. Phôi sau khi xử lý thớ được thường hóa tại 840°C và sau đó gia nhiệt lần hai tại 760°C. Mỗi công đoạn được giữ nhiệt trong 15 phút. Kết quả tổ chức tế vi trên Hình 5.6 cho thấy cấu trúc hạt tương đối đồng đều ở cả phương theo chiều cán & phương vuông góc chiều cán, có kích thước khoảng 5 – 10 μm , một vài chỗ có kích thước khoảng 15 – 20 μm , nhỏ hơn nhiều so với Hình 5.4. Điều này có thể xem là mẫu hoàn toàn có tính đồng nhất và đẳng hướng.



a) Theo hướng vuông góc phương cán

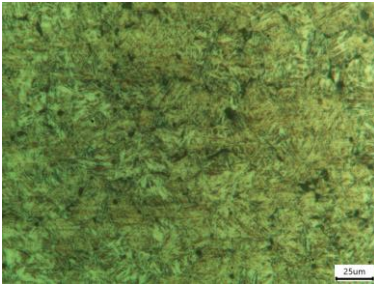


b) Theo hướng dọc theo phương cán

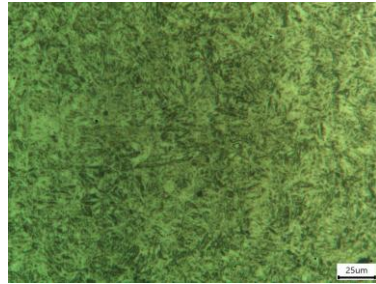
Hình 5.6. Cấu trúc tế vi của mẫu khi xử lý nhiệt tạo hạt nhỏ và làm đồng đều hạt

5.1.2 Tôi và ram

Quy trình tôi mẫu ở nhiệt độ 850°C, giữ nhiệt 15 phút và làm nguội nhanh trong môi trường nước 20-30°C [112] nhằm đạt độ cứng trong khoảng 56 – 59 HRC. Sau khi tôi, mẫu thép được tiến hành ram ở nhiệt độ 600°C, thời gian giữ nhiệt 30 phút, làm nguội trong môi trường không khí tĩnh. Tổ chức tế vi của mẫu sau khi tôi và ram được thể hiện trên Hình 5.7.



a) Sau khi tôi



b) Sau khi ram

Hình 5.7. Ảnh chụp cấu trúc tế vi của mẫu sau tôi và ram

5.1.3 Kết quả đo các thông số của mẫu

5.1.3.1 Độ bền kéo của mẫu

Bảng 5.3. Bảng giá trị thực nghiệm độ bền kéo

Mẫu	Giới hạn chảy σ_c (MPa)	Giới hạn bền σ_b (MPa)	Độ giãn 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±16	1.143 ±25	14,374±0,941

Qua kết quả thử nghiệm độ bền kéo, chọn mức ứng suất thí nghiệm mỗi tôi 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.

5.1.3.2 Độ nhám và độ cứng

Kết quả đo được thể hiện ở các Bảng 5.4, 5.5 và 5.6.

Bảng 5.4. Kết quả đo độ nhám mẫu Ra (μm)

Mẫu thí nghiệm	1	2	3	Trung bình
Độ nhám	0,84	0,84	0,87	0,85±0,02

Sai số của máy đo: $\pm 0,05 \mu m$

Bảng 5.5. 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±2,5

Bảng 5.6. 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±2

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

5.2.1 Kiểm tra thông số của lớp mạ crôm

5.2.1.1 Chiều dày lớp crôm.

Kết quả đo chiều dày lớp mạ phủ crôm là giá trị trung bình sau 5 lần đo và được trình bày trong Bảng 5.7.

Bảng 5.7. Bảng giá trị trung bình chiều dày mạ phủ

Nhóm mẫu	Chiều dày lớp mạ (μm)
1 (10 μm)	9 \pm 2
2 (30 μm)	30 \pm 5
3 (60 μm)	61 \pm 7
4 (90 μm)	93 \pm 10

5.2.1.2 Độ nhám lớp crôm

Bảng 5.8. Kết quả đo độ nhám mẫu Ra (μm)

Mẫu đo	1	2	3	Trung bình
Độ nhám	0,75	0,77	0,82	0,78 \pm 0,05

5.2.1.3 Độ cứng lớp crôm

Bảng 5.9. Kết quả đo độ cứng lớp crôm (HV)

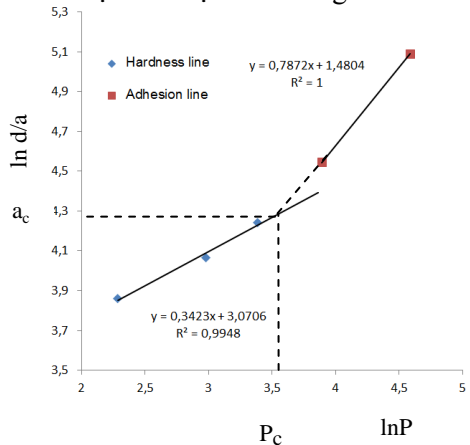
Mẫu đo	1	2	3	Trung bình
Độ cứng HV	802	832	821	817 \pm 15

5.2.1.4 Tính toán độ bám dính lớp crôm

Để đo độ bám dính của lớp mạ crôm, ta dùng phương pháp mũi đo độ cứng Vicker theo tiêu chuẩn ISO 19207-2016. Trước tiên, mũi đâm được đặt tại đường tiếp giáp lớp phủ/nền. Sau đó, tác dụng với các mức lực thay đổi từ 1-10 kg. Kết quả trung bình 3 lần đo được thể hiện trên Bảng 5.10.

Bảng 5.10. Kết quả đo độ bám dính

Mức lực tác dụng (kgf)	Lực tác dụng P (N)	Kích thước vết lõm mũi đâm d (μm)	Kích thước vết nứt a (μm)
1	9,807	47,5	
2	19,61	58,3	
3	29,42	69,6	
5	49,03		94,1
10	98,07		162,4



Hình 5.9. Giao điểm (P_c, a_c) giữa đường thẳng $\ln P$ - $\ln d$ và $\ln P$ - $\ln a$

Để tính toán độ bám dính của lớp phủ, ta phải xác định được điểm giới hạn bắt đầu xuất hiện vết nứt. Giá trị điểm tới hạn (P_c, a_c) là giao điểm giữa đường thẳng độ cứng ($\ln P$ - $\ln d$) và đường bám dính ($\ln P$ - $\ln a$) được thể hiện trên Hình 5.9. Từ giá trị đo ta xác định được giao điểm của đường thẳng $\ln P$ - $\ln d$ và $\ln P$ - $\ln a$ là (35,6646; 73,2572).

Độ bền bám dính của lớp mạ crôm K_{ca} (MPa.m^{1/2}) được tính qua công thức [62]:

$$K_{ca} = 0,015 \frac{P_c}{a_c^{3/2}} \left(\frac{E}{H} \right)^{1/2} = 0,015 \frac{35,6646}{(73,2572)^{3/2}} 7,22979 = 0,00617 = 6,17 (\text{Mpa.m}^{1/2})$$

Trong đó: $E_c = 271$ GPa [104], $H_C = 817$ HV ~ 8,012 GPa

$E_s = 200$ GPa [105], $H_s = 30,9$ HRC ~ 3,047 GPa

5.2.2 Ứng suất dư của lớp mạ crôm

Nhiều xạ tia X áp dụng phương pháp d-Sin²ψ được sử dụng để tiến hành phân tích ứng suất dư trên các mẫu sau khi mạ phủ. Phương pháp đo Ψ cố định góc η được ứng dụng để đo ứng suất. Để khảo sát sự biến thiên của ứng suất dư trong lớp mạ, các chi tiết mẫu được xử crôm bằng dung dịch axit clohydric 30% theo quy trình của tác giả B. Eigenmann [115]. Vật liệu crôm có mô đun đàn hồi là $E = 271$ GPa và hệ số Poisson $\nu = 0,23$ [115], còn đối với thép C45 lần lượt là $E = 200$ GPa và $\nu = 0,3$ [116] được sử dụng để tính ứng suất dư ứng dụng kỹ thuật nhiễu xạ tia X.

Từ kết quả đo đạc trên máy nhiễu xạ tia X sau khi được hiệu chỉnh bằng hàm LPA (được trình bày ở chương 4), 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.

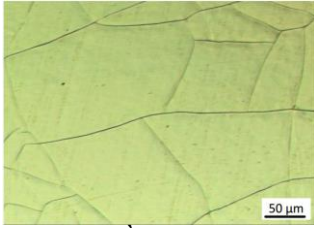
Từ phương trình d-Sin²ψ, ứng suất dư được tính toán theo công thức 2.52 và sai số được tính theo công thức 4.31 được đề xuất ở chương 4. Kết quả thể hiện tại Bảng 5.14.

Bảng 5.14. Bảng tổng hợp giá trị ứng suất dư các mẫu

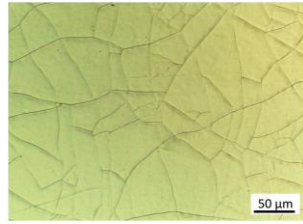
STT	Chiều dày lớp phủ (μm)	Ứng suất bề mặt lớp crôm σ_{Cr} (MPa)	Ứng suất chi tiết nền thép σ_{Fe} (MPa)
1	10	620±25	-66±15
2	30	431±29	-84±31
3	60	319±35	-68±32
4	90	228±47	-72±30

Nhận xét:

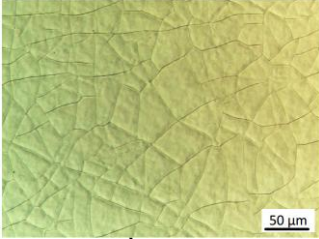
Kết quả đo ứng suất cho thấy, trong mạ crôm luôn tồn tại ứng suất dư kéo và vết nứt tế vi. Điều này được chứng minh là do quá trình phân hủy crôm hydrua trong quá trình kết tủa crôm gây co rút thể tích làm phát sinh ứng suất kéo và các vết nứt tế vi.



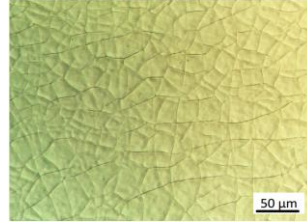
a) Chiều dày 10 μm



b) Chiều dày 30 μm



c) Chiều dày 60 μm



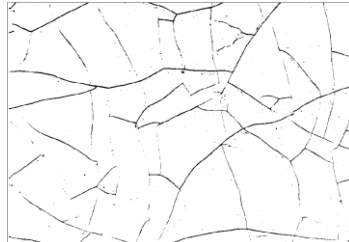
d) Chiều dày 90 μm

Hình 5.15. Mật độ vết nứt tế vi ứng với các chiều dày lớp crôm

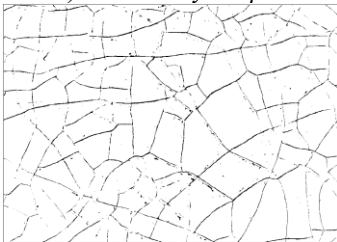
Để đánh giá định lượng mật độ vết nứt tế vi của lớp mạ crôm, phương pháp xử lý ảnh dựa trên đề xuất của tác giả M. Vidal và các cộng sự [16] đã được ứng dụng. Trước khi tính toán mật độ vết nứt tế vi của lớp crôm, các ảnh chụp vết nứt với kính hiển vi quang học được chuyển thành ảnh trắng đen 8 bit. Quá trình xử lý ảnh được thực hiện bằng phần mềm ImageJ, để tính tổng số điểm ảnh (pixel) màu đen tương ứng với vết nứt và tổng số điểm ảnh (pixel) màu đen và trắng của diện tích khảo sát.



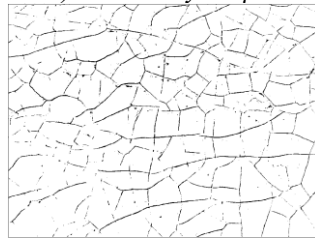
a) Chiều dày 10 μm



b) Chiều dày 30 μm



c) Chiều dày 60 μm



d) Chiều dày 90 μm

Hình 5.16. Mật độ vết nứt tế vi ứng với các chiều dày lớp crôm

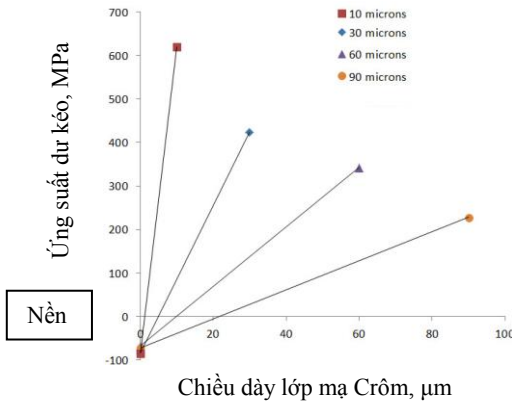
Mật độ vết nứt tế vi được tính thông qua công thức[16]:

$$\text{Mật độ vết nứt(\%)} = \frac{\text{Số điểm ảnh màu đen}}{\text{Tổng số điểm ảnh}} \times 100$$

Kết quả ảnh sau khi xử lý được thể hiện trên Hình 5.16 và mật độ vết nứt tế vi được thể hiện trên Bảng 5.15

Bảng 5.15. Mật độ vết nứt tế vi các mẫu.

STT	Chiều dày lớp phủ (μm)	Tổng số điểm ảnh đen-vết nứt(pixel)	Tổng số điểm ảnh diện tích khảo sát(pixel)	Mật độ vết nứt tế vi(%)
1	10	14490	713838	2,03
2	30	18555	715624	2,6
3	60	26286	712460	3,69
4	90	38428	712712	5,4



Hình 5.17. Trường ứng suất dư ứng với các chiều dày lớp mạ crôm

Trên Hình 5.16-5.17 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 [64,78]. Cụ thể, đối với chiều dày 10 μm có ứng suất kéo là 620 MPa, ứng suất kéo giảm đến 431 MPa đối với chiều dày 30 μm, 319 MPa ứng với 60 μm và sẽ là 228 MPa cho chiều dày 90 μm. Tuy nhiên mật độ vết nứt tế vi lại tăng dần từ 2,03% đến 5,4% ứng với chiều dày 10 μm đến 90 μm. Kết quả mật độ vết nứt tế vi của lớp crôm là phù hợp với nghiên cứu [16] khi đánh giá mật độ vết nứt tế vi trung bình của lớp mạ crôm là 3,4%. Tuy nhiên, chiều dày lớp mạ không được thể hiện trong nghiên cứu này mà tác giả chỉ nêu các thông số của quá trình mạ. Cũng trên Hình 5.17 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 gần như hoàn toàn ứng suất do gia công cắt gọt và quá trình tôi gây ra.

5.2.3 Ảnh hưởng của lớp mạ crôm đến độ bền mỏi

5.2.3.1 Tiêu chí đánh giá

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

5.2.3.2 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.

5.2.3.3 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 được xây dựng nhờ sự hỗ trợ của phần mềm Matlab và mô hình toán đã trình bày ở chương 4.

Từ bảng số liệu có được từ thực nghiệm, phương trình đường cong mỏi được thành lập cho vật liệu nền C45 và các chiều dày mạ crôm khác nhau dựa vào mô hình toán và các số liệu thực nghiệm:

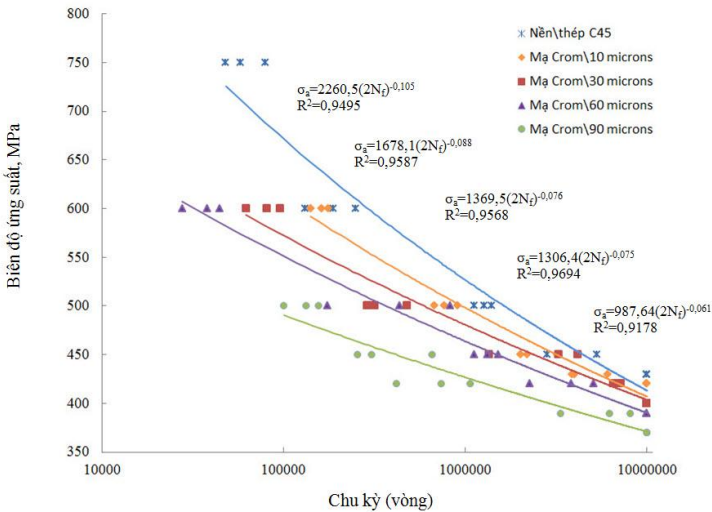
- + Vật liệu nền C45: $\sigma_u = 2260,5(2N_f)^{-0,105}$
- + Mạ crôm -10 μ m: $\sigma_u = 1678,1(2N_f)^{-0,088}$
- + Mạ crôm -30 μ m: $\sigma_u = 1369,5(2N_f)^{-0,076}$
- + Mạ crôm -60 μ m: $\sigma_u = 1306,4(2N_f)^{-0,075}$
- + Mạ crôm -90 μ m: $\sigma_u = 987,64(2N_f)^{-0,061}$

Bảng 5.17. Thông số phương trình mỏi cho nền và mạ crôm

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

Khi khảo sát ảnh hưởng của lớp mạ phủ đến độ bền mỏi của chi tiết, các công trình nghiên cứu chỉ đánh giá qua đồ thị (ứng suất-chu kỳ) một cách cảm quan mà không đưa ra phương trình toán học cho đường cong mỏi [19-22], [27], [40-43]. Trong luận án, phương trình toán của đường cong mỏi ứng với mỗi chiều dày mạ phủ được xác định. Từ phương trình này, số chu kỳ ứng với một giá trị áp tải (ứng suất chịu tải) bất kỳ được xác định dễ dàng. Điều này tạo điều kiện thuận lợi trong việc nghiên cứu cũng như ứng dụng vào trong thực tiễn.

Với hệ số xác định R^2 thể hiện trên Bảng 5.17 đều có giá trị ~ 1 chứng tỏ rằng phương trình mỏi ứng với mô hình toán lựa chọn là rất phù hợp.

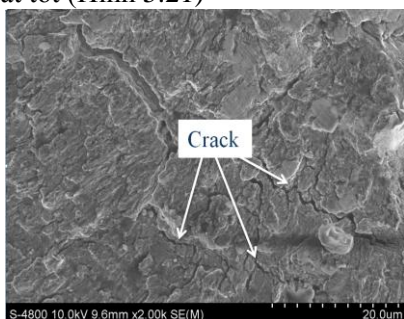


Hình 5.18. Biểu đồ đường cong mỏi cho các chiều dày mạ crom

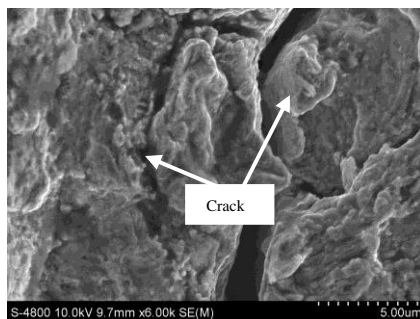
Từ đồ thị đường cong mỏi của hai loại mẫu mạ crom và nền C45 trên Hình 5.18 cho thấy độ bền mỏi của các chi tiết khi mạ crom giảm rất lớn so với chi tiết nền. Độ bền mỏi của chi tiết mạ crom có xu hướng giảm khi chiều dày lớp mạ tăng. Nguyên nhân là trong lớp mạ crom luôn tồn tại ứng suất dư kéo và vết 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 crom 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 crom, 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 (σ_{-1}) tại số chu kỳ 10^7 cho thấy, giới hạn mỏi của lớp phủ $10\ \mu\text{m}$ là $\sigma_{-1} = 420\ \text{MPa}$, giảm 2,3% so với chi tiết nền, trong khi đối với chiều dày mạ $30\ \mu\text{m}$ là $\sigma_{-1} = 400\ \text{MPa}$, giảm 6,97% so với chi tiết nền. Đối với chiều dày 60 và $90\ \mu\text{m}$, giới hạn mỏi lần lượt là $\sigma_{-1} = 390\ \text{MPa}$ và $370\ \text{MPa}$ nghĩa là giảm 9,3 % và 11,62 % so với chi tiết nền. Nguyên nhân là do khi lớp mạ crôm tăng chiều dày từ $10\ \mu\text{m}$, $30\ \mu\text{m}$, $60\ \mu\text{m}$ và $90\ \mu\text{m}$ thì mật độ vết nứt tăng tương ứng là 2,03%; 2,6%; 3,69% và 5,4%. Mật độ vết nứt tét vi càng cao làm giảm liên kết trong mạng tinh thể crôm và vết nứt phát triển sớm hơn khi chịu tải trọng theo chu kỳ. Điều này làm giảm độ bền mỏi trên chi tiết mạ crôm đối với các chiều dày mạ tương ứng. Kết quả gây giảm độ bền mỏi khi mạ crôm cứng là phù hợp với các nghiên cứu [19, 20] khi đánh giá trên một chiều dày mạ. Tuy nhiên, nghiên cứu của tác giả Voorwald [27] lại cho thấy độ bền mỏi giảm khoảng 35% và không có sự khác biệt lớn giữa hai lớp mạ crôm có chiều dày $45\ \mu\text{m}$ và $120\ \mu\text{m}$ khi đánh giá ảnh hưởng của lớp crôm đến độ bền mỏi trên nền thép có độ bền cao AISI 4340. Trong khi kết quả nghiên cứu cho thấy độ bền mỏi giảm từ 2,03% đến 5,4% ứng với chiều dày từ $10\ \mu\text{m}$ đến $90\ \mu\text{m}$ trên nền thép C45 (đã được nhiệt luyện). Điều này chứng tỏ ảnh hưởng của lớp mạ crôm đến độ bền mỏi trên vật liệu nền khác nhau sẽ cho kết quả khác nhau.

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 5.20 thể hiện vết nứt ban đầu luôn tồn tại trong mạng tinh thể lớp mạ crôm cứng. Hình ảnh SEM cũng cho thấy độ bám dính của lớp mạ crôm và lớp nền là rất tốt (Hình 5.21)

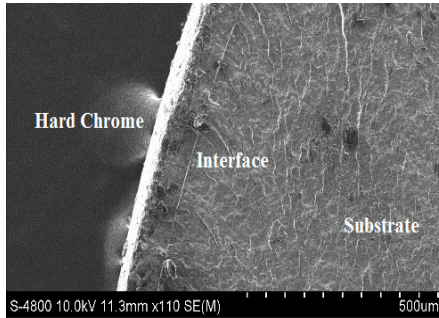


a) Vết nứt tét vi trong lớp crôm



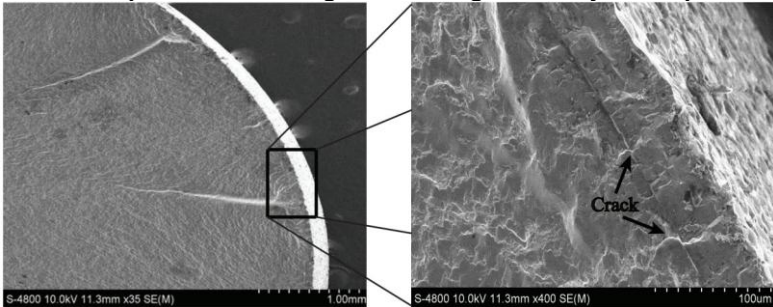
b) Vết nứt tét vi trong lớp crôm

Hình 5.20. Vết nứt tét vi trong lớp mạ crôm



Hình 5.21. Ảnh chụp SEM của lớp mạ crôm

Khảo sát bề mặt gãy do mỏi (Hình 5.22) 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. Khi mật độ vết nứt tế vi tăng lên, điều này có nghĩa là số lượng vết nứt tế vi/điện tích lớp phủ tăng dẫn đến làm suy yếu liên kết trong lớp mạ và vết nứt mỏi phát triển càng sớm. Kết quả là độ bền mỏi giảm khi tăng chiều dày của lớp mạ crôm.



Hình 5.22. Sự phát triển vết nứt mỏi của lớp mạ crôm

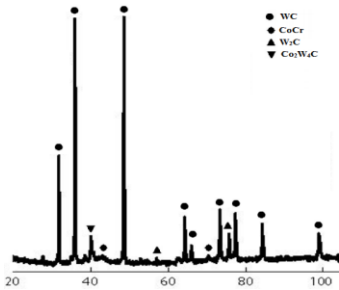
5.3 Ảnh hưởng của lớp phủ carbide vonfram đến độ bền mỏi

5.3.1 Kết quả đo thông số lớp phủ carbide vonfram

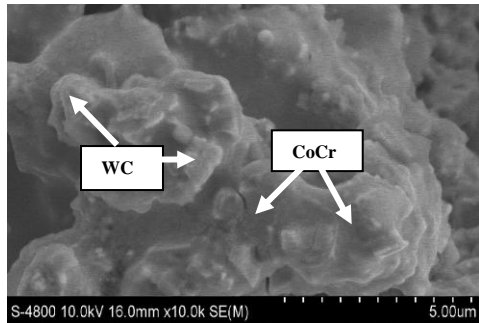
5.3.1.1 Cấu trúc tế vi của lớp phủ

Hình 5.23 thể hiện đường nhiễu xạ của lớp phủ WC-10Co-4Cr, kết quả cho thấy pha WC chiếm phần lớn và là pha chính. Ngoài đỉnh nhiễu xạ thể hiện pha WC, các pha W_2C cũng được phát hiện trong lớp phủ. Đây là kết quả của quá trình khử cacbon ở nhiệt độ cao trong quá trình phủ. Điều này phù hợp với kết luận của nghiên cứu [36]. Ngoài ra, pha liên kết CoCr cũng được xác định thông qua phương pháp phân tích này.

Trên Hình 5.24, ta có thể thấy pha cứng WC liên kết với nhau thông qua pha nền CoCr (được xác định qua phân tích bằng nhiễu xạ tia X)



Hình 5.23. Đường nhiễu xạ của lớp phủ WC-10Co-4Cr



Hình 5.24. Cấu trúc tế vi của lớp phủ

5.3.1.2 Chiều dày lớp phủ.

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

Bảng 5.18. Bảng giá trị trung bình chiều dày mạ phủ

Mẫu	Phủ HVOF (μm)
1	31±5
2	63±7
3	92±10

5.3.1.3 Độ nhám

Độ nhám và độ cứng của mẫu được đo trên máy SJ-301. Kết quả đo được thể hiện trên Bảng 5.19

Bảng 5.19. Kết quả đo độ nhám mẫu Ra(μm)

Mẫu thí nghiệm	1	2	3	Trung bình
Độ nhám	6,31	6,52	6,46	6,43±0,12

Sai số của máy đo: ± 0,05 μm

5.3.1.4 Độ cứng và độ bám dính lớp phủ.

Bảng 5.20. Kết quả đo độ cứng lớp phủ carbide vonfram (HV)

Mẫu thí nghiệm	1	2	3	Trung bình
Độ cứng HV	1230	1056	1020	1102±128

Tương tự như đo độ bám dính của lớp mạ crôm, phương pháp mũi đâm Vicker theo tiêu chuẩn ISO 19207-2016 được sử dụng. Kết quả đo được thể hiện trên Bảng 5.21.

Giá trị điểm tới hạn ($P_{c,ac}$) xuất hiện vết nứt là giao điểm giữa đường thẳng lnP-lnd và lnP-lna được thể hiện trên Hình 5.25.

Từ giá trị đo ta xác định được giao điểm của đường thẳng lnP-ln và lnP-lna là (47,3738; 72,1279).

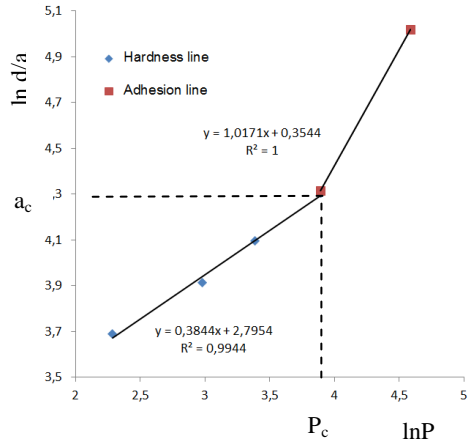
Độ bền bám dính của lớp phủ K_{ca} (MPa.m^{1/2}) được tính qua công thức:

$$K_{ca} = 0,015 \frac{P_c}{a_c^{3/2}} \left(\frac{E}{H} \right)^{1/2} = 0,015 \frac{47,3738}{(72,1279)^{3/2}} 7,16711 = 0,00831 = 8,31 (\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$$

Trong đó: $E_c = 316 \text{ GPa}$ [37], $H_c = 1102 \text{ HV} \sim 10,81 \text{ GPa}$
 $E_s = 200 \text{ GPa}$ [105], $H_s = 30,9 \text{ HRC} \sim 3,047 \text{ GPa}$

Bảng 5.21. Kết quả đo độ bám dính

Mức lực tác dụng (kgf)	Lực tác dụng P (N)	Kích thước vết lõm mũi đâm d (μm)	Kích thước vết nứt a (μm)
1	9,807	39,2	
2	19,61	51,1	
3	29,42	59,8	
5	49,03		74,7
10	98,07		151,2



Hình 5.25. Giao điểm (P_c, a_c) giữa đường thẳng $\ln P - \ln d$ và $\ln P - \ln a$

5.3.2 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 $\nu = 0,22$ [37]. Qua kết quả nhiễu xạ tia X và đồ thị $d \cdot \sin^2 \psi$, ta tính được giá trị ứng suất dư tương ứng cho lớp tiếp giáp nền/phủ ứng với các chiều dày phủ. Kết quả thể hiện tại Bảng 5.24.

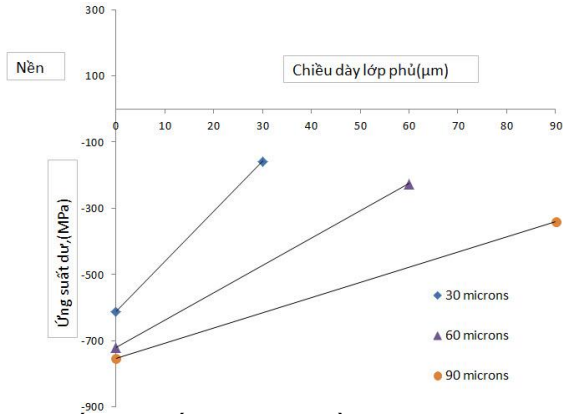
Bảng 5.24. Bảng tổng hợp đo ứng suất các mẫu.

STT	Chiều dày lớp phủ (μm)	Ứng suất dư bề mặt lớp phủ (MPa)	Ứng suất dư lớp tiếp giáp (MPa)
1	30	-158 ± 22	-613 ± 29
2	60	-226 ± 28	-721 ± 17
3	90	-341 ± 24	-754 ± 28

Nhận xét:

Trong lớp phủ carbide vonfram luôn tồn tại ứng suất dư nén. Nguyên nhân là trong vật liệu bột WC-10Co-4Cr, các hạt WC là pha rất cứng và không bị nóng chảy dưới nhiệt độ khi phun phủ HVOF. Vì vậy, sự va chạm (động năng) 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 quá trình nguội sau 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 giãn nở nhiệt của thép AISI 1045 là $11,52 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ trong khi hệ số giãn nở nhiệt của lớp phủ WC-10Co-4Cr là $5,5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ [36]. Như vậy, khi phủ WC-10Co-4Cr lên nền thép AISI 1045 sẽ gây ra ứng suất nén. Điều này cũng phù hợp với kết quả công bố của nghiên cứu [37, 38] khi đánh giá ứng suất dư của lớp carbide vonfram trên nền thép cacbon ứng với một chiều dày phủ.



Hình 5.31. Phân bố ứng suất dư theo chiều dày lớp phủ carbide vonfram

Kết quả tính toán cũng cho thấy 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 μm tồn tại ứng suất dư -158 MPa trong khi đó là -226 MPa đối với chiều dày 60 μm và -341 MPa đối với chiều dày 90 μm. Trong quy trình phủ HVOF, chiều dày lớp phủ tăng lên bằng cách tăng số lần phủ (pass phủ) vì mỗi lần phủ không thể điều chỉnh lượng bột phun quá lớn để đạt được chiều dày mong muốn. Trong luận án này, chiều dày phủ 30 μm, 60 μm, 90 μm tương ứng lần lượt là 2/4/6 pass phủ. Điều này có nghĩa là khi chiều dày tăng lên thời gian va chạm của hạt WC với lớp phủ trước đó càng lớn dẫn đến biến dạng dẻo càng lớn và ứng suất nén càng cao. Hơn nữa, khi tăng chiều dày lớp phủ tương ứng với thời gian phủ càng tăng, tức thời gian gia nhiệt càng tăng và chi tiết nền có nhiệt độ càng cao. Điều này cũng là một trong những nguyên nhân gây tăng ứng suất dư nén (theo công thức 2.27). Ảnh hưởng của yếu tố nhiệt độ này đến ứng suất dư nén là phù hợp với công bố [119].

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

Al₂O₃ 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 lớn và tạo ứng suất dư nén. Giá trị ứng suất dư nén cũng tăng lên theo chiều dày lớp phủ từ 613 MPa đến 754 MPa tương ứng với chiều dày lớp phủ là 30 μm đến 90 μm. Nguyên nhân là tại bề mặt chi tiết nền, ngoài biến dạng dẻo do phun hạt Al₂O₃ còn do biến dạng dẻo trong quá trình phun phủ (động năng hạt WC) và biến dạng dẻo này càng tăng khi tăng chiều dày lớp phủ

5.3.3 Ảnh hưởng của lớp phủ carbide vonfram đến độ bền mỏi

Phương trình đường cong mỏi được thành lập cho chi tiết phủ carbide vonfram trên nền thép C45 ứng với các chiều dày phủ khác nhau dựa vào số liệu thực nghiệm và mô hình toán với sự trợ giúp của phần mềm Matlab:

$$+ \text{Phủ WC-10Co-4Cr-30 } \mu\text{m: } \sigma_u = 1191,7(2N_f)^{-0,062}$$

$$+ \text{Phủ WC-10Co-4Cr-60 } \mu\text{m: } \sigma_u = 1379,2(2N_f)^{-0,071}$$

$$+ \text{Phủ WC-10Co-4Cr-90 } \mu\text{m: } \sigma_u = 1517,9(2N_f)^{-0,073}$$

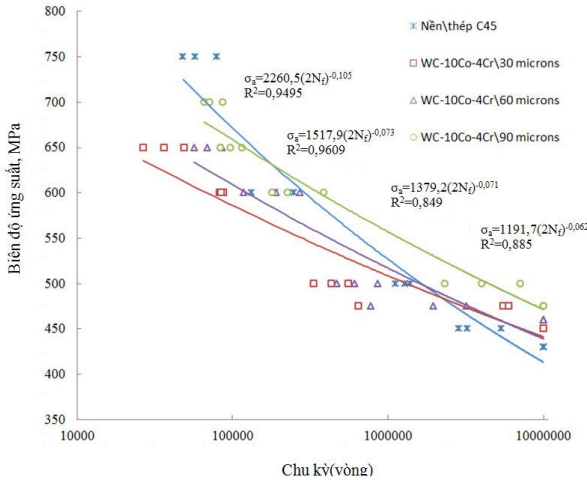
Bảng 5.26. Thông số phương trình mỏi cho lớp phủ carbide vonfram

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

Để xác định sự phù hợp của mô hình toán của phương trình mỏi với các kết quả thực nghiệm, hệ số xác định R² được trình bày trong Bảng 5.26 và đều có giá trị lớn hơn 0,7 chứng tỏ sự phù hợp của mô hình toán

Kết quả 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 μm là 1.444.648 chu kỳ; đối với lớp phủ có chiều dày 60 μm là 1.949.652 chu kỳ; trong khi đối với chiều dày 90 μm là không gãy (run out-10⁷ 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 μm là σ_{-1} = 450 MPa (tăng 4,65% so với nền); và đối giới hạn mỏi lớp phủ 60 μm là σ_{-1} = 460 MPa (tăng 6,97% so với nền); trong khi đối giới hạn mỏi lớp phủ 90 μm là σ_{-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. Kết quả lớp phủ carbide vonfram tạo ứng suất dư nén và làm tăng độ bền mỏi là phù hợp với nghiên cứu [40, 45]. Tuy nhiên, khi so sánh kết quả nghiên cứu với các công bố này cũng cho thấy ảnh hưởng của lớp phủ đến độ bền mỏi trên vật liệu thép C45 (đã được nhiệt luyện) là khác với các vật

liệu nền khác. Theo công trình [40], độ bền mỏi tăng tới 540%-4300% khi phủ lớp WC-10Co-4Cr trên hợp kim nhôm AA6063-T6 ứng với chiều dày phủ/đường kính mẫu chi tiết là 250 μm /12,5 mm. Trong khi phủ lớp carbide vonfram này lên vật liệu thép có độ bền cao AISI 4340 lại gây ra giảm độ bền mỏi tới 21,4 % ứng với chiều dày phủ/đường kính mẫu chi tiết là 200 μm /6,35 mm [46]. Tương tự, lớp phủ này cũng gây giảm độ bền mỏi tới 28,9% trên nền thép 15-5PH (ASTM A 564) theo nghiên cứu [48]. Bên cạnh đó, một số nghiên cứu cũng cho thấy lớp phủ có mô đun đàn hồi cao hơn chi tiết nền sẽ làm tăng độ bền mỏi và ngược lại [45]. Ở đây, mô đun đàn hồi của thép C45 và lớp phủ WC-10Co-4Cr lần lượt là $E = 200 \text{ GPa}$ và 316 GPa [37,116]. 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 Al_2O_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.



Hình 5.32. Biểu đồ đường cong mỏi cho các chiều dày phủ Carbide Vonfram

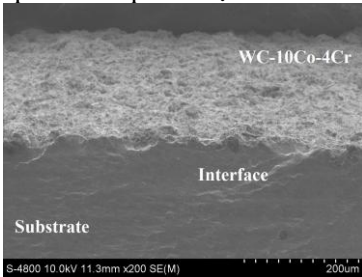
Phân tích bằng máy kính hiển vi điện tử quét (SEM) cho thấy cả lớp phủ carbide vonfram cũng có độ bám dính rất tốt và không bị tách lớp khi tác dụng tải trọng. Đối với lớp phủ carbide vonfram cho thấy bề mặt nền có độ nhám cao khi áp dụng phương pháp phun hạt Al_2O_3 tạo nhám trước khi phủ để tăng độ bám dính (Hình 5.34)

Bề mặt gãy do phá hủy mỏi của mẫu phủ được thể hiện trên Hình 5.36. Đây là kết quả của vết nứt mỏi phát triển khi đặt ứng suất tại phần giảm tiết diện trên mẫu ($\text{Ø}7.5$). Khi áp tải trọng thay đổi theo chu kỳ vết nứt xuất phát từ bên ngoài bề mặt lớp phủ hoặc từ lỗ xóp (nếu có) sẽ phát

triển vào trong vật liệu nền (Hình 5.35). Điều này là phù hợp với phân tích của các nghiên cứu [18, 41]. Bên cạnh đó, như đã phân tích ở mục cấu trúc tế vi của lớp phủ cho thấy pha cứng WC chiếm đa số và được liên kết bởi pha CoCr. Từ Hình 5.35 cho thấy vết nứt lan truyền xuyên qua các hạt WC và tốc độ lan truyền vết nứt tăng lên khi gặp các lỗ xốp trong lớp phủ. Kết quả này là phù hợp với công bố [120]. Tuy nhiên, trong lớp phủ tồn tại ứng suất nén nên sẽ làm chậm sự phát triển vết nứt này.

Khi khảo sát ứng suất dư mẫu phủ cho thấy lớp nền có ứng suất dư nén rất lớn. Vì vậy, vết nứt trên bề mặt lớp phủ không thể phát triển đi sâu vào bên trong chi tiết nền. 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 tiếp tục phát triển theo ranh giới tiếp giáp giữa lớp phủ và bề mặt nền và hiện tượng tách lớp lại xảy ra. Quá trình phát triển vết nứt này sẽ dừng lại tại nơi bề mặt nền có độ nhấp nhô lớn (do quá trình tạo nhám) và là vị trí tập trung ứng suất lớn nhất. Cuối cùng, vết nứt phát triển sâu vào bên trong chi tiết gây phá hủy mỏi.

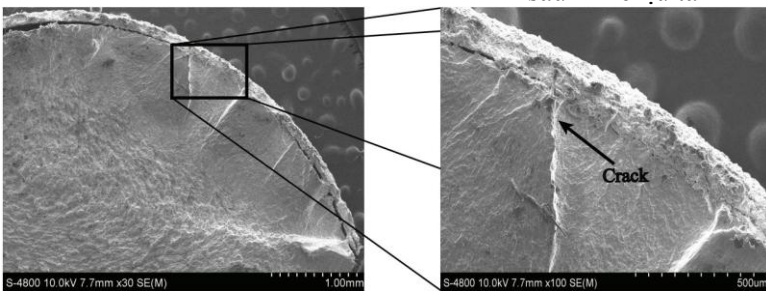
Khi tăng chiều dày lớp phủ, cho thấy ứng suất dư nén tăng. Chính điều này sẽ ngăn cản sự xuất hiện và phát triển của vết nứt ban đầu trong lớp phủ. Kết quả là độ bền mỏi tăng khi tăng chiều dày lớp phủ.



Hình 5.34. Ảnh chụp SEM của lớp phủ WC-10Co-4Cr khi chưa chịu tải



Hình 5.35. Ảnh chụp SEM của vết nứt trong lớp phủ WC-10Co-4Cr tải sau khi chịu tải



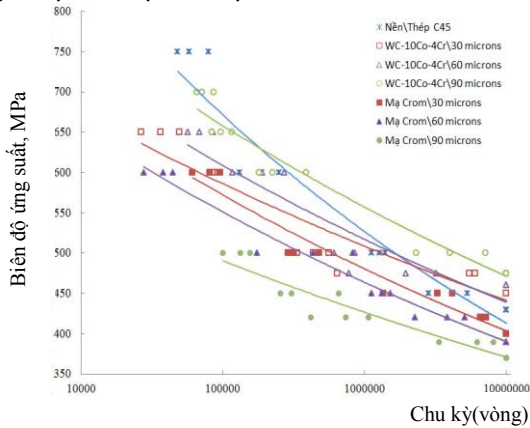
Hình 5.36. Sự phát triển vết nứt mỏi của lớp phủ WC-10Co-4Cr

5.4 Đánh giá ảnh hưởng của lớp mạ crom và lớp phủ carbide vonfram

đến độ bền mỏi và khả năng ứng dụng

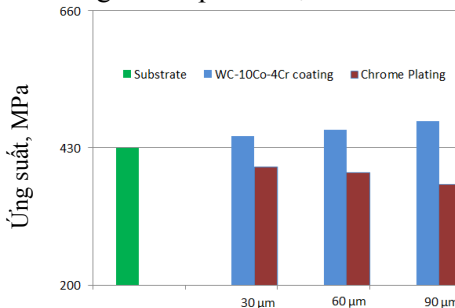
5.4.1 So sánh ảnh hưởng của lớp mạ crôm và lớp phủ carbide vonfram đến độ bền mỏi

Đánh giá độ bền mỏi của của mạ crôm cứng và phủ carbide vonfram cho chiều dày 30 μm , 60 μm , 90 μm được thể hiện trên Hình 5.37.



Hình 5.37. Biểu đồ đường cong mỏi cho phương pháp mạ crôm và phủ HVOF

Nhìn vào đồ thị đường cong mỏi cho hai phương pháp phủ trên Hình 5.37 cho thấy độ bền mỏi của lớp phủ carbide vonfram luôn cao hơn so với mạ crôm khi xét trên cùng một chiều dày. Mặc dù độ nhám bề mặt của lớp phủ carbide vonfram luôn lớn hơn mạ crôm. Điều này là phù hợp với nghiên cứu [47] khi đánh giá ảnh hưởng của hai phương pháp phủ này đến độ bền mỏi trên nền thép không gỉ 316 ứng với chiều dày phủ là 100 μm . Trong khi nghiên cứu [46] cho thấy cả hai phương pháp đều gây giảm độ bền mỏi khi phủ trên nền thép có độ bền cao AISI 4340 nhưng độ bền mỏi của lớp phủ WC-Co-Cr giảm thấp hơn mạ crôm.



Hình 5.38. Giới hạn mỏi của mạ crôm và phủ Carbide Vonfram

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 crôm cứng.

Đây là kết quả trong lớp mạ crôm luôn tồn tại vết nứt tế vi gây giảm độ bền mỏi trong khi lớp carbide luôn tồn tại ứng suất dư nén làm tăng độ bền mỏi.

Trên Hình 5.38 cho thấy giới hạn mỏi của lớp mạ crôm ứng với chiều dày 30 μm là $\sigma_{-1} = 400 \text{ MPa}$, trong khi giới hạn mỏi của lớp phủ là $\sigma_{-1} = 450 \text{ MPa}$ (tăng 12,5 % so với mạ crôm). Đối với chiều dày 60 μm giới hạn mỏi của lớp mạ crôm ứng $\sigma_{-1} = 390 \text{ MPa}$, trong khi giới hạn mỏi của lớp phủ là $\sigma_{-1} = 460 \text{ MPa}$ (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 $\sigma_{-1} = 370 \text{ MPa}$, trong khi giới hạn mỏi của lớp phủ là $\sigma_{-1} = 475 \text{ MPa}$ (tăng 28,3% so với mạ crôm).

5.4.2 Khả năng ứng dụng của lớp mạ crôm và lớp phủ carbide vonfram

Từ kết quả nghiên cứu cho thấy độ bền mỏi của lớp phủ carbide luôn cao hơn lớp mạ crôm. Trong giới hạn của đề tài khảo sát chiều dày mạ phủ từ 10 - 90 μm trên đường kính chi mẫu ($\varnothing 7.5$), chiều dày lớp mạ crôm càng tăng độ bền mỏi còn giảm và càng tăng khi lớp carbide vonfram càng dày. Tuy nhiên, độ bền mỏi chỉ là một chỉ tiêu về độ bền của chi tiết máy. Tùy thuộc vào mức chịu tải và điều kiện làm việc của chi tiết thực tế mà có thể lựa chọn phương pháp và chiều dày mạ phủ một cách hợp lý. Bên cạnh nhược điểm là làm giảm độ bền mỏi và gây ô nhiễm môi trường, lớp mạ crôm cũng có nhiều ưu điểm như: hệ số ma sát thấp, độ cứng khá cao, độ bám dính tương đối tốt... và đặc biệt là giá thành mạ rẻ, trong khi lớp phủ carbide vonfram có độ cứng cao hơn, độ chống mài mòn và bám dính tốt hơn nhưng giá thành quá cao đây là nhược điểm chính của phương pháp này.

Khi xem xét về độ bền mỏi, từ kết quả nghiên cứu cho thấy lớp phủ carbide vonfram có thể hoàn toàn thay thế cho lớp mạ crôm. Tuy nhiên, kết quả luận án cũng cho thấy tùy điều kiện làm việc cụ thể mà có thể sử dụng phương pháp mạ phủ ứng với chiều dày tương ứng một cách hợp lý. Đối với những chi tiết chịu tải thấp hơn giới hạn mỏi (tại 10^7 chu kỳ) tương ứng của lớp mạ crôm ứng với chiều dày 10/30/60/90 μm là 420/400/390/370 MPa thì phương pháp mạ crôm được xem là phương pháp đáp ứng cả về chỉ tiêu độ bền mỏi và kinh tế. Đối với những chi tiết chịu tải cao hơn ta nên xem xét sử dụng lớp phủ carbide vonfram có giới hạn độ bền mỏi là 450/460/475 MPa tương ứng với chiều dày cụ thể 30 μm /60 μm /90 μm . Cũng cần nhấn mạnh rằng, kết quả nghiên cứu trên chỉ áp dụng với thép C45 (đã qua nhiệt luyện theo chi tiết trục) vì ảnh hưởng của lớp mạ phủ này đến độ bền mỏi là khác nhau đối với vật liệu nền khác nhau.

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. Đề đánh giá độ bền mỏi của chi tiết trục chế tạo từ thép C45 được phủ bề mặt bằng crôm và carbide vonfram. 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 đề xuất 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 vonfram 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.

- 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 tia X 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 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 μm 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 μm là 4,65%; 6,97% và 10,46% so với chi tiết nền.

- Thiết lập được phương trình mỏi cho các chiều dày mạ phủ khác nhau ứng với 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 μm 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. Đề 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 carbide 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.

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

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

1. **Vinh Phoi Nguyen**, Thien Ngon Dang, Chi Cuong Le and Dung-An Wang. *Effect of coating thickness on fatigue behavior of AISI 1045 steel with HVOF thermal spray and hard chrome electroplating*. Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 29, pp. 1968–1981, 2020. (**SCI, Q1, IF=2.59, H index = 80, SJR= 0.71**)
2. **Nguyen Vinh Phoi**, Dang Thien Ngon, Le Chi Cuong. *Effect of Residual Stress and Microcracks in Chrome Plating Layer to Fatigue Strength of Axle-Shaped Machine Parts*. Applied Mechanics and Materials, Vol. 889, pp.10-16, 2019. (**Q4, H index = 28, SJR= 0.11**)
3. **Nguyen Vinh Phoi**, Nguyen Nhut Phi Long, Dang Thien Ngon. *Improvement for Microstructure of Severely Deformed JIS S45C Steel After Rolling Process*. Applied Mechanics and Materials, Vol. 889, pp.148-154, 2019. (**Q4, H index = 28, SJR= 0.11**)
4. **Phoi Nguyen Vinh**, Ngon Dang Thien and Cuong Le Chi. *Evaluating the Effect of HVOF Sprayed WC-10Co-4Cr and Hard Chromium Electroplated Coatings on Fatigue Strength of Axle-Shaped Machine Parts*. Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 63. Springer, pp.309-317. ISSN: 2367-3370, 2018. (**Scopus Index**)
5. **Phoi Nguyen Vinh**, Ngon Dang Thien, Cuong Le Chi. *Study the Effect of Chrome Coating Thickness to Fatigue Strength of the Axle-Shaped Machine Parts*. Proceeding of the 4th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD 2018) - IEEE. ISBN: 978-1-5386-5126-1.
6. Long Nguyen Nhut Phi, Ngon Dang Thien, Cuong Le Chi and **Phoi Nguyen Vinh**. *Solution for Heat Treatment in Quenching Process of S45C Steel Small Diameter Machine Parts Having Strong Texture*. Proceeding of the 4th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD 2018)- IEEE. ISBN: 978-1-5386-5126-1.
7. **Phoi Nguyen Vinh**, Cuong Le Chi, Ngon Dang Thien. *Study the Effect of Chrome Coating Layer to the Fatigue Strength of the Axial Machine Parts*. Proceeding of the 3th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD 2016)-IEEE. ISBN: 978-1-5090-3638-7. (**Scopus Index**)
8. Tien Tran Minh, Cuong Le Chi, **Phoi Nguyen Vinh**, Nguyen La Ly, Tuyen Luu Anh. *Study of Strain and Residual Stress Distribution in the Thickness Direction by Layer Removal Method and X-ray Diffraction*. Proceeding of the 3th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD 2016)-IEEE. ISBN: 978-1-5090-3638-7. (**Scopus Index**)

9. Lê Chí Cương, **Nguyễn Vinh Phôi**. *Khảo Sát Hàm Hấp Thụ Trong Tính Toán Ứng Suất Vật Liệu Phi Đẳng Hướng Bằng Nhiều Xạ X-Quang Sử Dụng Giác Kế Kiểu Ω* . Tạp Chí Khoa Học & Công Nghệ Các Trường Đại Học Kỹ Thuật, Trang 108-115, Số 98, 2014.
10. **Nguyen Vinh Phoi** and Le Chi Cuong. *Computation on Generalized Absorption Function of Thin Film Layer Using X-Ray Analysis*. Proceedings of the 2nd International Conference on Green Technology and Sustainable Development(GTSD 2014), ISBN: 978-604-73-2817-8.