

**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 thu 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 phủ 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 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 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.

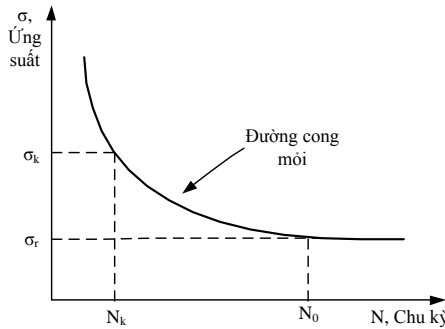
Chương 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

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

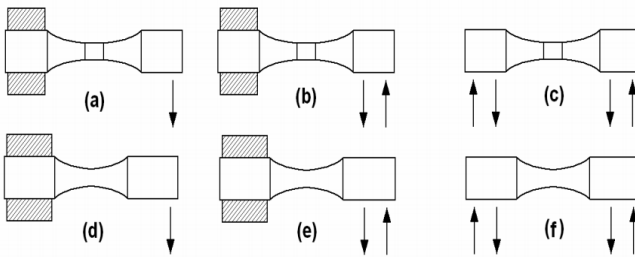
2.3 Độ bền mỗi và phương pháp đánh giá

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:

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

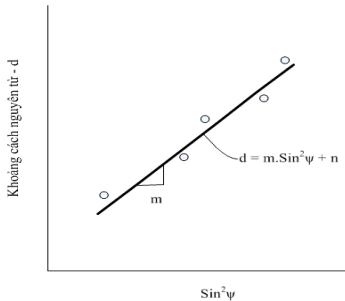
trong đó: $\sigma_{\phi} = \sigma_{11} \cos^2 \phi + \sigma_{12} \sin 2\phi + \sigma_{22} \sin^2 \phi$

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 $d - \sin^2 \psi$

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

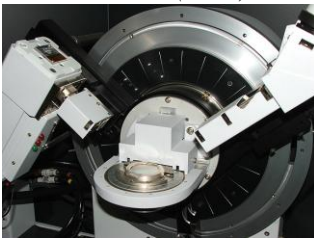
Một số thiết bị được sử dụng để đánh giá các tính chất của lớp phủ: chiều dày lớp phủ, ứng suất dư, khảo sát mặt gãy mỏi của chi tiết được giới thiệu ở Hình 3.1.



a) Lò nung Thermal Electric Furnace (Nhật)



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



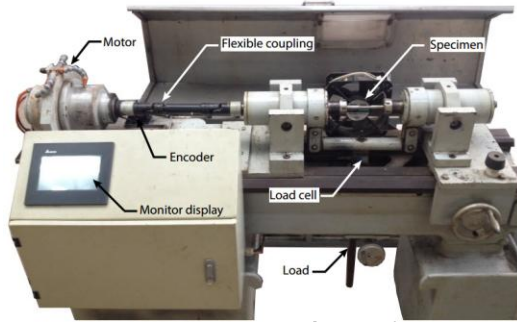
c) Máy nhiễu xạ tia X - X'Pert Pro



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.

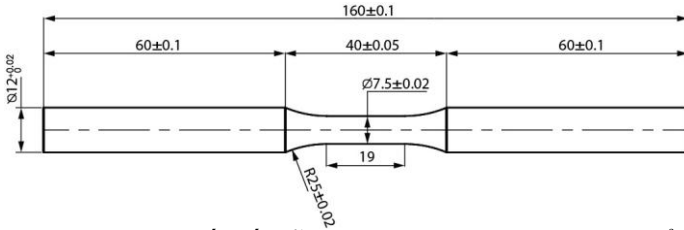


Hình 3.16. Máy thí nghiệm mỏi uốn 4 điểm MU-2016

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

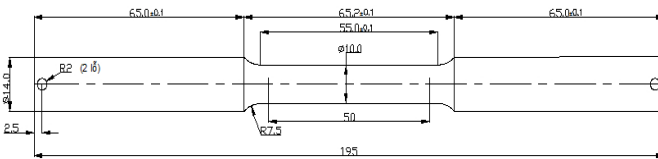
3.3.1 Kết cấu chi tiết mẫu

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.

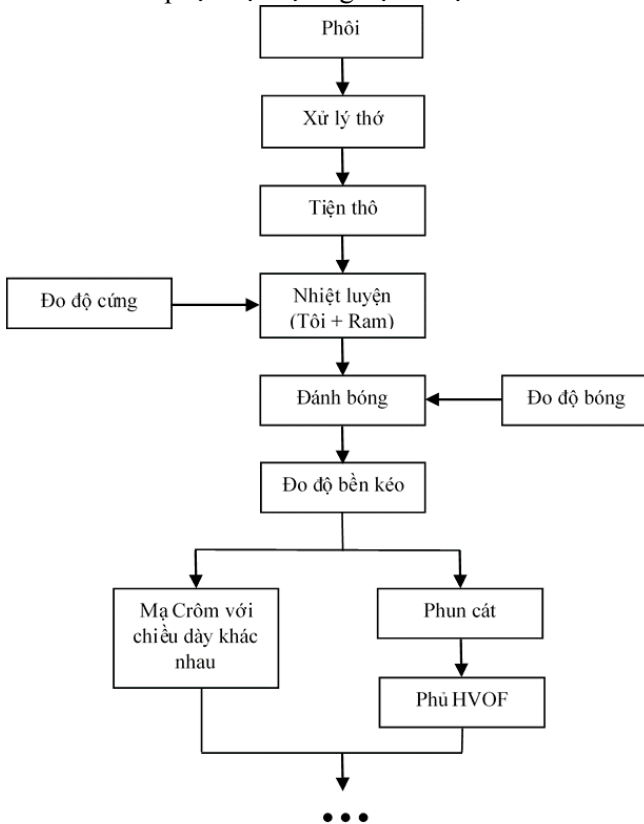


Hình 3.20. Bản vẽ thiết kế mẫu thử độ bền kéo

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 mỗi 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:

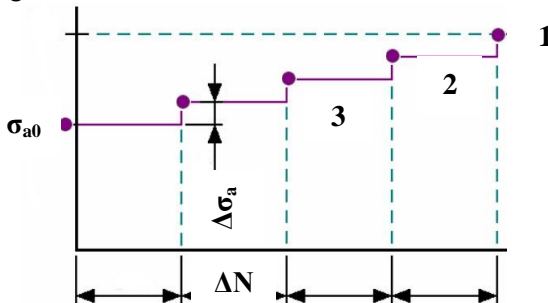
$$N=2^1 + 2.1 + 1 = 5$$

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

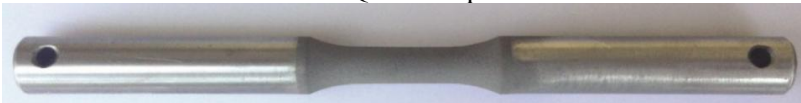


a) Quá trình phủ carbide



b) Sau khi phủ xong

Hình 3.28. Quá trình phủ HVOF



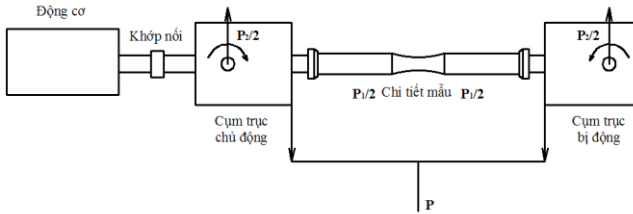
Hình 3.29. Chi tiết mẫu sau khi phủ HVOF

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.

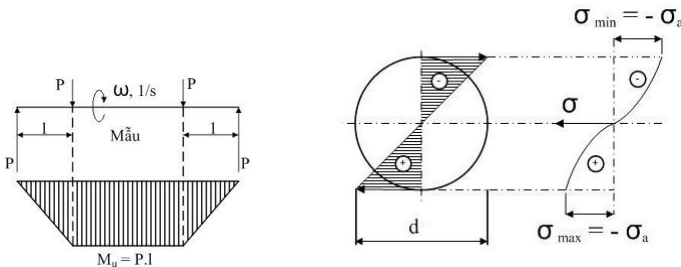


Hình 4.1. Sơ đồ nguyên lý tạo môi uốn quay 4 điểm

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

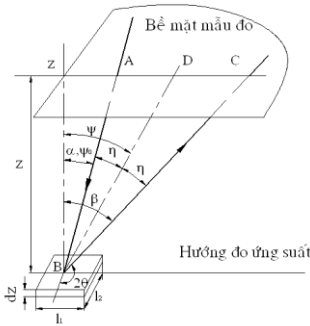
Như đã trình bày trong chương 2, ứng suất được tính thông qua vị trí của đỉnh nhiễu xạ tia X. Tuy nhiên, việc xác định chính xác vị trí đỉnh của đường nhiễu xạ thì phải được hiệu chỉnh bởi hệ số phân cực và hàm hấp thụ LPA (*Lorentz-Polarization and Absorption*). Trong đó hàm hấp thụ A là quang trọng 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

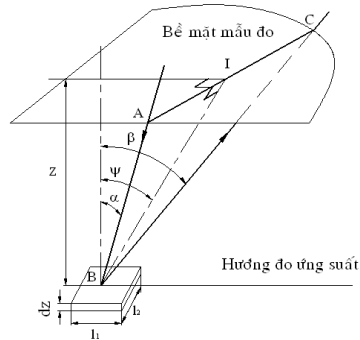
Phương pháp đo Ω (*Iso-Inclination method*) là phương pháp đo mà tia tới AB và tia nhiễu xạ BC đều nằm trong mặt phẳng đo ứng suất (Hình 4.4). Tia tới AB có cường độ nhiễu xạ là I_0 ứng với diện tích mặt cắt ngang là 1×1 (mm). Tia nhiễu xạ BC có cường độ là I thu được trên một thể tích tinh thể được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

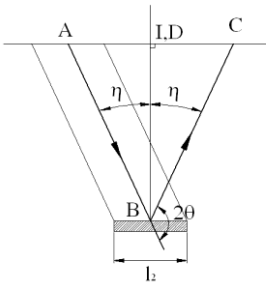
Đối với phương pháp đo Ψ (*Side-Inclination method*), tia tới AB và tia nhiễu xạ BC nằm trong mặt phẳng vuông góc với mặt phẳng đo ứng suất (Hình 4.5a)



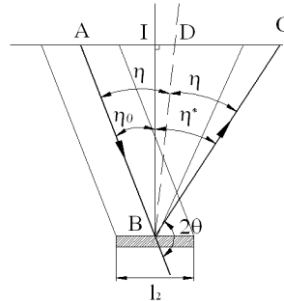
Hình 4.4. Phương pháp đo Ω



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:

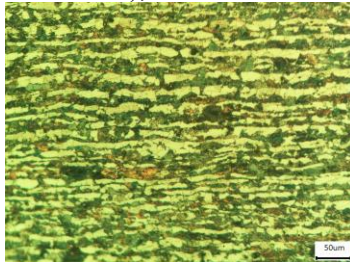
$$\Delta\sigma_\varphi = \pm 1.96\sigma_s \quad (4.31)$$

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.

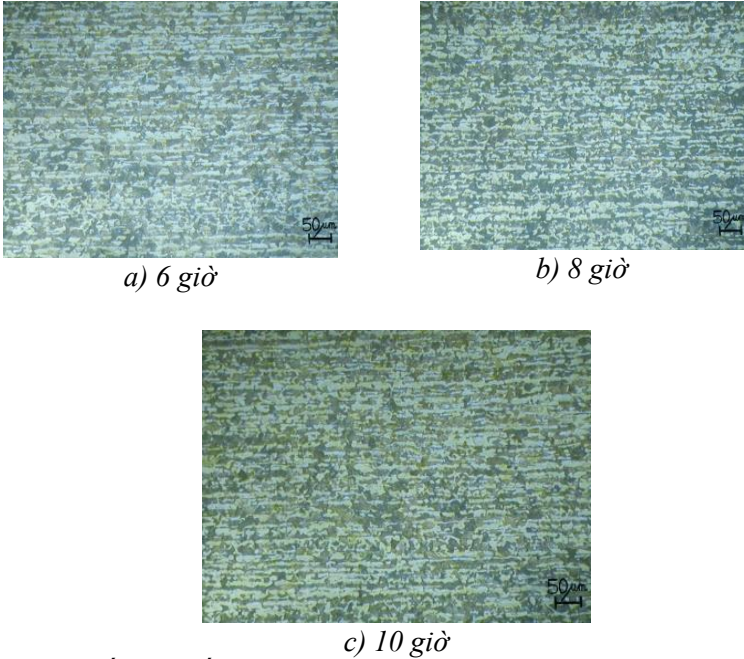


Hình 5.1. Mẫu trước khi xử lý thớ phương cán

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].

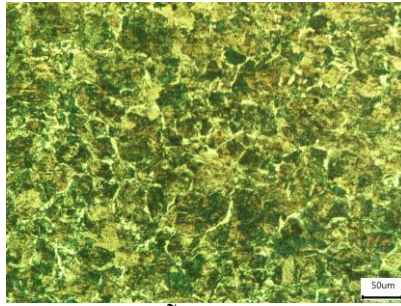
Một quy trình ủ kết tinh lại thường được sử dụng cho thép C45 đã tiến hành thực nghiệm cho phôi thép kéo/cán đường kính $\phi 14$ mm ở nhiệt độ ở 500°C , thời gian giữ nhiệt lần lượt là 6, 8 và 10 giờ [112]. Kết quả cho thấy cấu trúc thớ có cải thiện nhưng vẫn còn hiện diện khá đáng kể, thể hiện trong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



Hình 5.2. Cấu trúc tế vi của thép C45 theo phương cán sau quy 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].

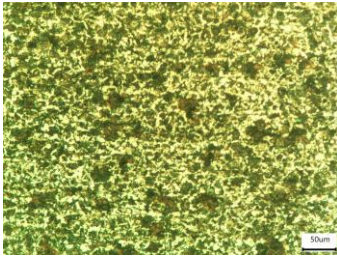
Kết quả nghiên cứu cho thấy, tất cả các quy trình đều làm mất tổ chức thớ [113]. Tuy nhiên, phôi được thường hóa theo quy trình đề xuất tại nhiệt độ 920°C trong 15 phút làm mất tổ chức thớ triệt để nhất và quy trình này được áp dụng để phục vụ các bước chế tạo mẫu tiếp theo.



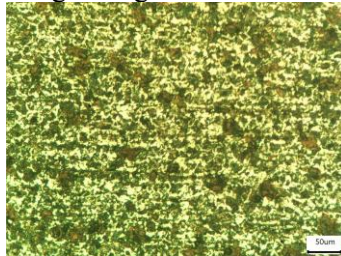
Hình 5.4. Mẫu sau khi xử lý thớ

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

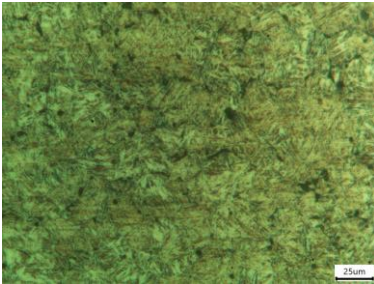


b) Theo hướng dọc theo phương cán

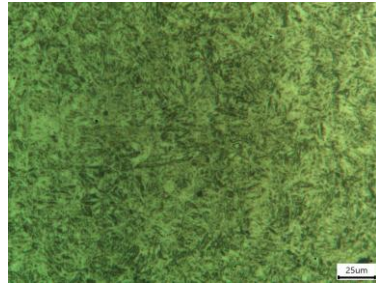
Hình 5.6. Cấu trúc tế vi của mẫu khi xử lý nhiệt tạo hạt nhỏ và làm đồng đều hạt

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)

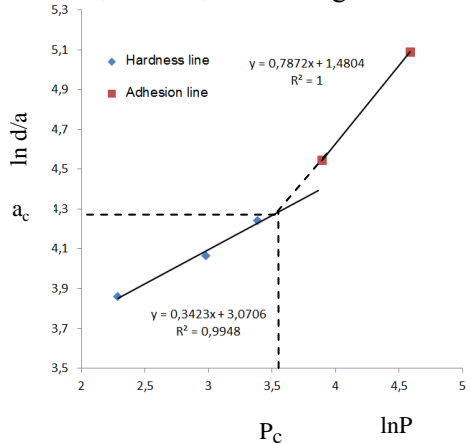
Mẫu đo	1	2	3	Trung bình
Độ cứng HV	802	832	821	817 \pm 15

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.

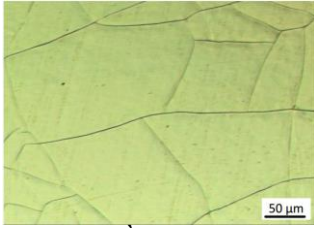
Từ phương trình d-Sin²ψ, ứng suất dư được tính toán theo công thức 2.52 và sai số được tính theo công thức 4.31 được đề xuất ở chương 4. Kết quả thể hiện tại Bảng 5.14.

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

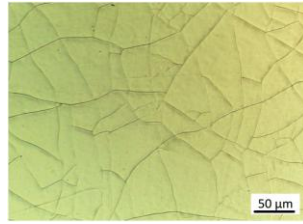
STT	Chiều dày lớp phủ (μm)	Ứng suất bề mặt lớp crôm σ_{Cr} (MPa)	Ứng suất chi tiết nền thép σ_{Fe} (MPa)
1	10	620±25	-66±15
2	30	431±29	-84±31
3	60	319±35	-68±32
4	90	228±47	-72±30

Nhận xét:

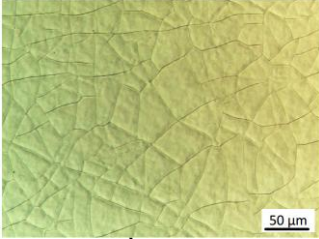
Kết quả đo ứng suất cho thấy, trong mạ crôm luôn tồn tại ứng suất dư kéo và vết nứt tế vi. Điều này được chứng minh là do quá trình phân hủy crôm hydrua trong quá trình kết tủa crôm gây co rút thể tích làm phát sinh ứng suất kéo và các vết nứt tế vi.



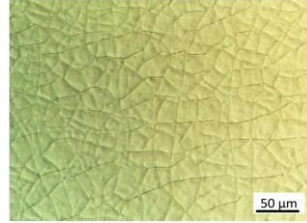
a) Chiều dày 10 μm



b) Chiều dày 30 μm



c) Chiều dày 60 μm



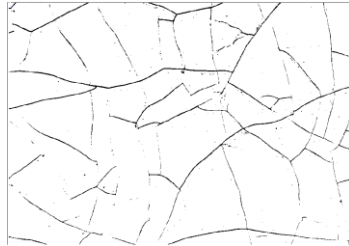
d) Chiều dày 90 μm

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

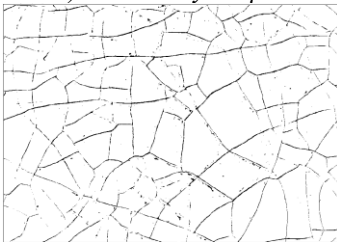
Để đánh giá định lượng mật độ vết nứt tế vi của lớp mạ crôm, phương pháp xử lý ảnh dựa trên đề xuất của tác giả M. Vidal và các cộng sự [16] đã được ứng dụng. Trước khi tính toán mật độ vết nứt tế vi của lớp crôm, các ảnh chụp vết nứt với kính hiển vi quang học được chuyển thành ảnh trắng đen 8 bit. 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.



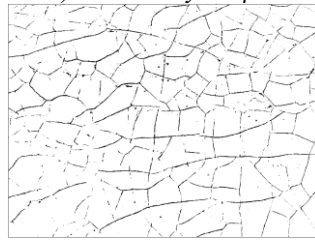
a) Chiều dày 10 μm



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

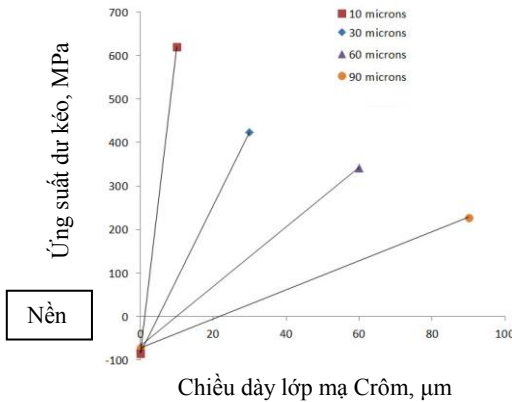
Mật độ vết nứt tế vi được tính thông qua công thức[16]:

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

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:

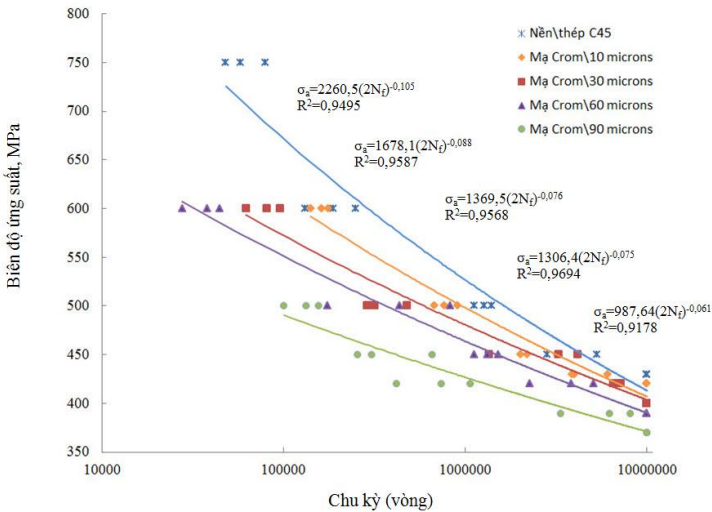
- + Vật liệu nền C45: $\sigma_u = 2260,5(2N_f)^{-0,105}$
- + Mạ crôm -10 μm : $\sigma_u = 1678,1(2N_f)^{-0,088}$
- + Mạ crôm -30 μm : $\sigma_u = 1369,5(2N_f)^{-0,076}$
- + Mạ crôm -60 μm : $\sigma_u = 1306,4(2N_f)^{-0,075}$
- + Mạ crôm -90 μm : $\sigma_u = 987,64(2N_f)^{-0,061}$

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 μm	0,0013	1678,1	-0,088
Mạ Crôm\30 μm	0,004	1369,5	-0,076
Mạ Crôm\60 μm	0,008	1306,4	-0,075
Mạ Crôm\90 μm	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.

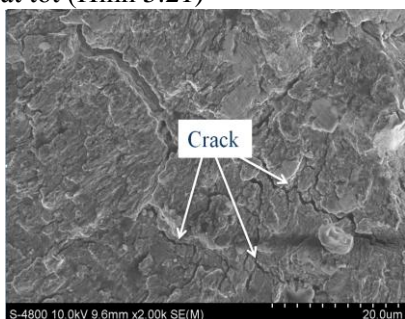


Hình 5.18. Biểu đồ đường cong mỏi cho các chiều dày mạ crom

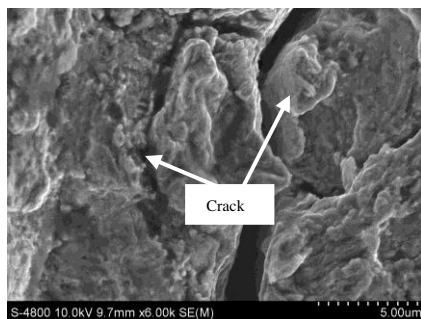
Từ đồ thị đường cong mỏi của hai loại mẫu mạ crom và nền C45 trên Hình 5.18 cho thấy độ bền mỏi của các chi tiết khi mạ crom giảm rất lớn so với chi tiết nền. Độ bền mỏi của chi tiết mạ crom có xu hướng giảm khi chiều dày lớp mạ tăng. Nguyên nhân là trong lớp mạ crom luôn tồn tại ứng suất dư kéo và vết 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)

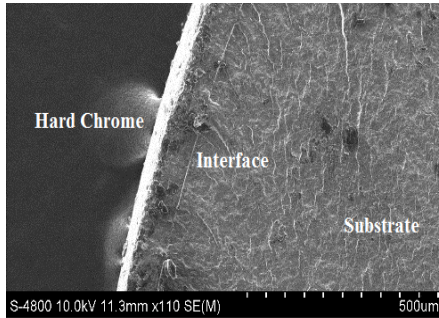


a) Vết nứt tét vi trong lớp crôm



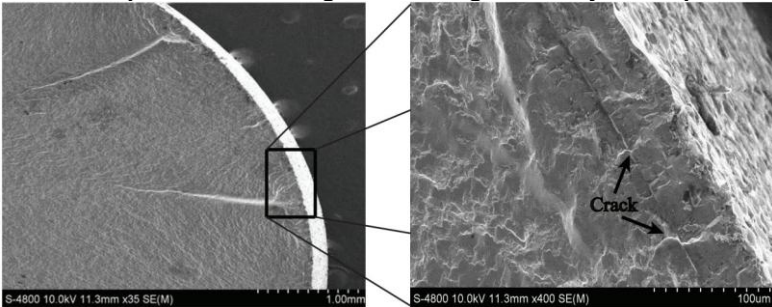
b) Vết nứt tét vi trong lớp crôm

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

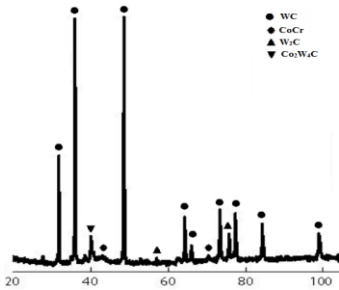
5.3 Ảnh hưởng của lớp phủ carbide vonfram đến độ bền mỏi

5.3.1 Kết quả đo thông số lớp phủ carbide vonfram

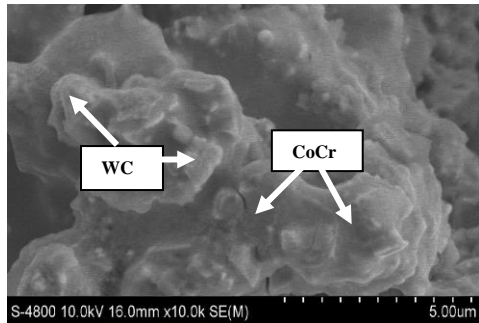
5.3.1.1 Cấu trúc tế vi của lớp phủ

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 crom, 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).

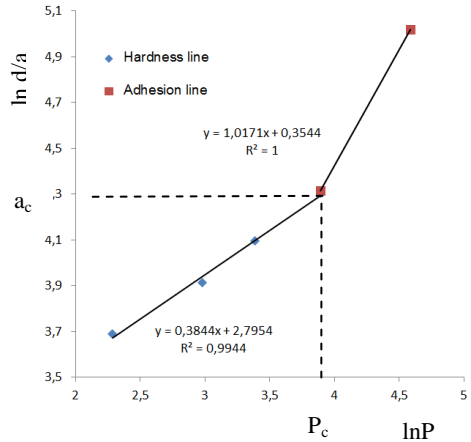
Độ bền bám dính của lớp phủ K_{ca} (MPa.m^{1/2}) được tính qua công thức:

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

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.

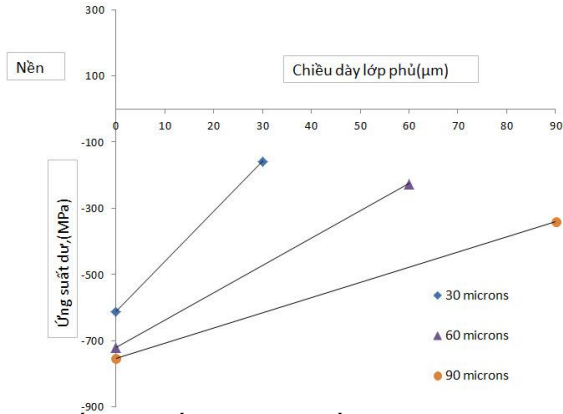
Bảng 5.24. Bảng tổng hợp đo ứng suất các mẫu.

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:

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

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

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

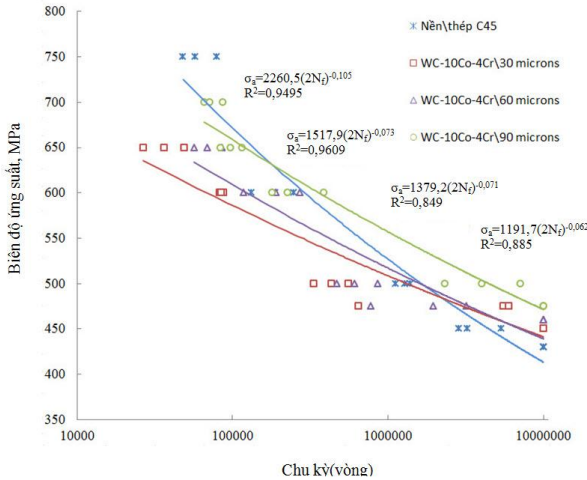
Bảng 5.26. Thông số phương trình mỏi cho lớp phủ carbide vonfram

Mẫu Phủ	Tỷ lệ (t/d)	σ'_r (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

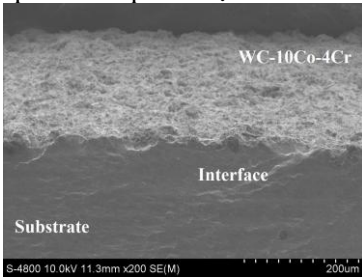
Phân tích bằng máy kính hiển vi điện tử quét (SEM) cho thấy cả lớp phủ carbide vonfram cũng có độ bám dính rất tốt và không bị tách lớp khi tác dụng tải trọng. Đối với lớp phủ carbide vonfram cho thấy bề mặt nền có độ nhám cao khi áp dụng phương pháp phun hạt Al_2O_3 tạo nhám trước khi phủ để tăng độ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

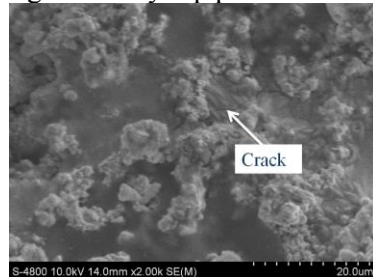
triển vào trong vật liệu nền (Hình 5.35). Điều này là phù hợp với phân tích của các nghiên cứu [18, 41]. Bên cạnh đó, như đã phân tích ở mục cấu trúc tế vi của lớp phủ cho thấy pha cứng WC chiếm đa số và được liên kết bởi pha CoCr. Từ Hình 5.35 cho thấy vết nứt lan truyền xuyên qua các hạt WC và tốc 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.

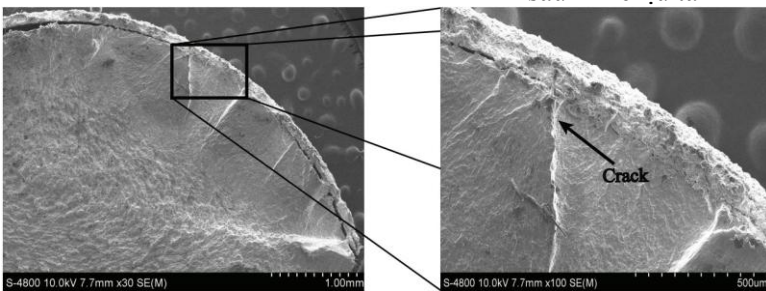
Khi tăng chiều dày lớp phủ, cho thấy ứng suất dư nén tăng. Chính điều này sẽ ngăn cản sự xuất hiện và phát triển của vết nứt ban đầu trong lớp phủ. Kết quả là độ bền mỏi tăng khi tăng chiều dày lớp phủ.



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



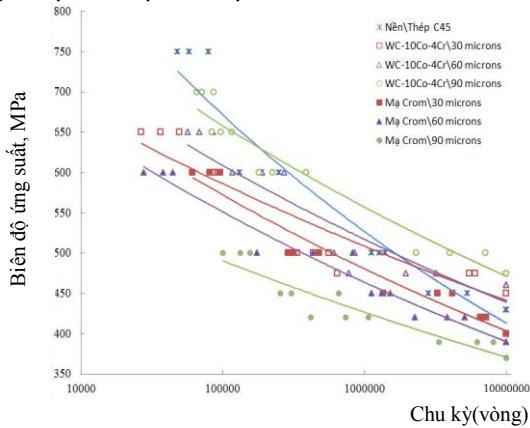
Hình 5.36. Sự phát triển vết nứt mỏi của lớp phủ WC-10Co-4Cr

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

đến độ bền mỏi và khả năng ứng dụng

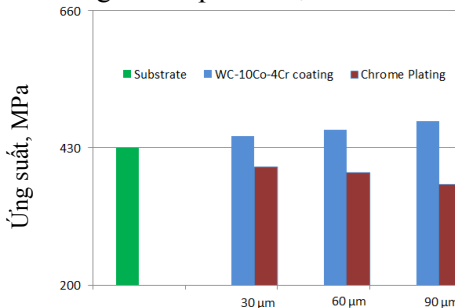
5.4.1 So sánh ảnh hưởng của lớp mạ crôm và lớp phủ carbide vonfram đến độ bền mỏi

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. Để 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 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 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. 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 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.

MINISTRY OF EDUCATION AND TRAINING
HO CHI MINH CITY UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
AND EDUCATION

---oo0oo---

NGUYEN VINH PHOI

**STUDY ON THE EFFECT OF SURFACE
COATING ON FATIGUE STRENGTH OF
AXLE-SHAPED MACHINE PARTS**

SUMMARY OF THE THESIS

Major: Mechanical Engineering

Major code: 9520103

HO CHI MINH CITY – YEAR 2021

The work is completed at Ho Chi Minh city University of
Technology and Education

Scientific Supervisor one: Assoc. Prof. Dr. Dang Thien Ngon

Scientific Supervisor two: Assoc. Prof. Dr. Le Chi Cuong

The thesis will be defended in front of the Council for
Ph.D. evaluation of the Ho Chi Minh City University
of Technology and Education on/2021

The thesis can be found at:

-The National Library of Vietnam

-The Library of Ho Chi Minh City University of Technology and
Education

Chapter 1. INTRODUCTION

1.1 Fatigue.

1.2 Electroplating

1.3 High Velocity Oxygen-Fuel (HVOF)

1.4 Status of research on fatigue in Vietnam

1.5 Previous researches

1.5.1 Overseas research situation

Many studies show that hard chromium plating is widely used to increase hardness, resistance to abrasion, corrosion and low friction coefficient and it was applied in the aerospace, automotive and petrochemicals fields. The properties of chrome plating such as adhesion, micro hardness ... are well appreciated. In addition, some studies also show tensile residual stress and microcracking of hard chromium to reduce fatigue strength. Most of the studies were performed on high-strength steel such as AISI 4340, AISI 4340, AISI 4340, Al 2024-T4, 12CrMoV, ...

Recently, High Velocity Oxygen-Fuel (HVOF) technology has been studied. This method can be coat with a variety of materials. However, tungsten carbide, the material with the main composition is the WC phase and the cobalt binder phase, which has received the most attention. With the good properties, it is widely applied in the process of covering details in the aviation, mining, oil and gas industries especially, it can replace hard chromium plating. Several initial studies have evaluated tungsten carbide coatings layer. Effect of coatings layer on fatigue strength is also studied. But the results increase or decrease when coated on different materials, This shows that the coating process is extremely complex.

In addition, many studies also show that the effect of coating on the substrate materials which was applied the heat treatment process or not will give different results.

1.5.2 Researches in our country

Currently, surface treatment technology is being interested and developed in our country, especially electroplating. This is a technology that will be focus on research in the near future with the advantage such as improving surface quality, increasing wear and corrosion resistance, increasing surface hardness..... Many studies works on composite plating for improving the frictional performance of copper and nickel plating. In addition, thermal spray coating technology has also been initially studied, but only stopped studying properties such as hardness, adhesion, and abrasion in 67Ni18Cr5Si4B alloy, Cr3C2 - NiCr alloy to restore details.

1.6 Scientific problem still exists

The analysis of the research shows that the studies focuses on improving the surface layer quality by coating a layer which have heat- and

wear-resistant material to adapt to working conditions. Besides, the coating parameters such as adhesion, residual stress, ... especially the fatigue strength of the coating are focused on research. Evaluation of the fatigue strength of the coating using the HVOF technology and hard chrome plating method has been studied but only focused on high strength steel such as stainless steel. In addition, studies were only performed on a specific coating thickness. Therefore, the published research have not shown the change of the coating properties and fatigue strength when the coating thickness varies. In addition, the effect on fatigue strength of applying heat treatment to the substrate material of the part has not been studied.

The survey also show that there has not been any research on the properties of WC-10Co-4Cr (HVOF), chromium plating with different thicknesses affect fatigue strength on C45 steel which has been heat treated. Therefore, conducting research and evaluation of fatigue strength of WC-10Co-4Cr tungsten carbide coating, chromium plating on C45 steel which has been heat-treated is very necessary in mechanical engineering, restoring shaft details.

1.7 Scientific significance and Practical value

1.7.1 Scientific significance

- Deriving the fatigue equation according to the Basquin model based on the thickness of the chromium plating layer and the tungsten carbide coating to help predict the fatigue strength

- Proposing a way to calculate the residual stress and micro-cracks density and determine the relationship between residual stress and fatigue strength as well as micro-cracks density in the plating layer.

- It has been determined that the crack density increases and the residual tensile stress to decrease when increasing the chromium plating layer thickness on the C45 steel. This reason make to a decrease in fatigue strength. When increasing the tungsten carbide coating thickness, the compressive residual stress will increase so the fatigue strength tends to increase.

1.7.2 Practical value

- This research contributes to the development of HVOF coating technology, contributing to the application of this high-quality technology in surface coating as well as machine part restoration in Vietnam.

The research results of the thesis indicate the ability and scope of application of hard chrome plating, HVOF spray coating with tungsten carbide (WC-10Co-4Cr) on C45 steel in new detail manufacturing technology, machine part recovery with coating thicknesses of 10, 30, 60 and 90 microns.

1.8 Research objectives

- Analyzing the influence of the plating parameters (thickness, residual stress, density of micro-cracks) of the chromium plating layer on the fatigue strength of the shaft machine part.

- Analyzing the influence of coating parameters (thickness, residual stress) of tungsten carbide coating on fatigue strength of axial machine parts.

- Comparing and evaluating the fatigue strength of the two methods on different coating thicknesses.

- Determining the appropriate thickness of the coating to improve the fatigue strength of the machine part

1.9 Scope of work

- Substrate: C45 steel.

- Coating materials: hard chrome and carbide vonfram (WC-10Co-4Cr).

- Coating thickness: 10 μm to 90 μm .

- The chrome plating process using standard industrial processes is currently being widely used in coating factories in Vietnam. The HVOF coating process using the parameters of the coating process has been optimized for hardness, porosity and adhesion and will not be studied in this study.

1.10 Research orientation

In this study, the following topics are focused on:

- Building a rotary bending fatigue model for coated shaft.

- Studying the texture remove process and small grain process to get isotropy in shaft using C45 steel

- Determining the heat treatment process for the shaft using C45 steel

- Studying the hard chrome plating and coating tungsten carbide process on shaft according to industry standard process and based on optimized coating parameters on hardness, adhesion and porosity.

- Measuring and evaluating the change of residual stress and microcrack density with different coating thicknesses.

- Evaluating and comparing the effect of hard chrome plating and tungsten carbide coating thickness on fatigue strength of C45 shaft.

1.11 Structure of dissertation

The dissertation has been organized into six chapters. A brief description of the content of these chapters is given in the following paragraphs:

- Chapter 1: Introduction

- Chapter 2: Survey of Literature

- Chapter 3: Experimental Procedures

- Chương 4: Theoretical Results
- Chương 5: Experimental Results and Discussion
- Chương 6: Conclusion and Future Scope

Chapter 2. SURVEY OF LITERATURE

2.1 Fatigue

Fatigue is the gradual accumulation of failure in the material under the influence of cyclic stresses. This changing stress causes fatigue cracks to appear which then grow and lead to material failure (fatigue failure).

2.1.1 S-N curve

On the basis of fatigue test results, a fatigue curve is established to represent the relationship between the stress σ (maximum stress) and the number of stress change cycles N that the machine part (or test specimen) has. withstand until broken

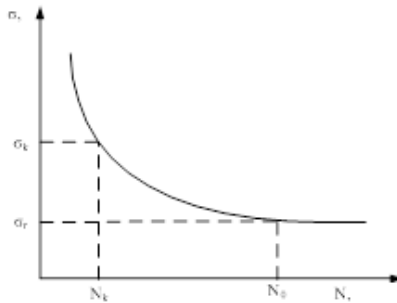


Figure 2.1. Wöhler curve [1]

The number of cycles N is called the fatigue life with stress level σ . The fatigue curve has shown in Figure 2.1.

Through the fatigue curve graph we can see:

- The higher the stress, the shorter the fatigue life
- If stress is reduced to a certain limit σ_r for some types materials, the fatigue life N can be increased without the part being destroyed. The value σ_r is called the fatigue strength of the material.

The fatigue curve equation can be written:

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

Where C , m is a constant and m (exponent) is called the degree of the fatigue curve. Equation (2.5) represents the relationship between stress σ and fatigue life N . From equation (2.5) we can determine the fatigue life N_k of the material subjected to variable stress σ_k ($\sigma_r < \sigma_k < \sigma_u$). The stress σ_r is called the short-term fatigue limit corresponding to the life N_k of the

material. In the logarithmic coordinate system $\lg\sigma\text{-}\lg N$, equation (2.5) is represented by a straight line:

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

Fatigue curve graph in semi-coordinate system has its own branch as a straight line with the equation:

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

Where k and B are constants.

The curve of equation (2.5) will have an asymptote to the horizontal axis N . This is not true for cast iron or steel materials because their fatigue curves will have an asymptote parallel to the horizontal axis and one distance from the horizontal axis, approximately equal to the long-term fatigue limit value of the material. So, on the basis of the mathematical statistical analysis of the experimental data, Weibull expresses the fatigue curve by the equation:

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

From equation (2.8) when $\sigma \rightarrow \sigma_r$ then $N \rightarrow \infty$, that is the horizontal fatigue line is a distance σ_r from the horizontal axis and it is called the asymptote of the fatigue curve.

2.2 Adhesion and assessment methods

2.3 Fatigue and assessment methods

The fatigue testing process for metallic materials can be based on international standards such as JSME S002, ASTM E739 and ISO 1143-2010. In which, ISO 1143-2010 is used the most and is compatible with Vietnamese standards (TCVN).

ISO 1143-2010 shows specific methods of fatigue assessment according to rotary bending fatigue such as 1-point bending method, 2-point bending method and 4-point bending method.

All three methods can be applied to two types of samples (Figure 2.11): cylindrical (a, b, c) and houghlass (d, e, f).

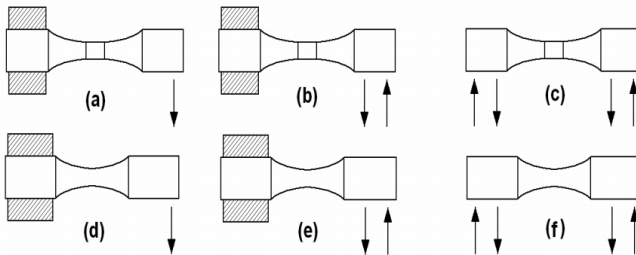


Figure 2.11. Specimen fatigue according to ISO 1143-2010

The cylindrical specimen (Figure 2.11c) used for the 4-point bending fatigue test method was selected for this study. This type of specimen is convenient for coating thickness measurement and X-ray diffraction

2.4 Plating principle and properties of chromium coating

2.5 High Velocity Oxygen-Fuel (HVOF)

2.6 X-ray diffraction and residual stress measurement applications

2.6.1 X-ray diffraction

2.6.2 Bragg's law and diffraction conditions [76]

When X-rays are irradiated with a wavelength ($10^{-4} - 10^{-2}\text{\AA}$), the diffraction rays with different intensity and directions will appear. The diffraction directions depend on the wavelength of the incident radiation and the properties of the crystal sample. Bragg's law establishes the relationship between the X-ray wavelength and the distance between the atomic planes:

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

where $n = 1, 2, 3, \dots$ is called the order of reflection.

2.6.3 Factors affecting the diffraction intensity (LPA)

2.6.4 X-ray penetration depth

2.6.5 Principle of stress measurement using X-ray diffraction

According to Hooke's law, isotropic elastic strain through transformation can be determined through the following:

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

We can write (2.48) as::

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

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

From equation (2.49), the atomic distance $d_{\phi,\psi}$ is calculated by the formula:

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

This is the equation representing the relationship $d_{\phi,\psi} - \sin^2 \psi$ with slope m :

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

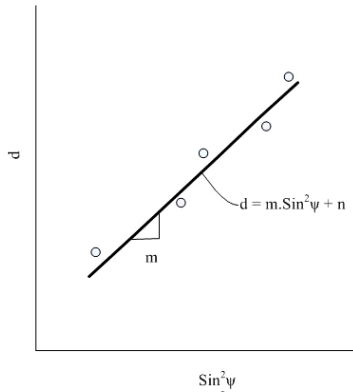


Figure 2.22. $d\text{-}\sin^2\psi$ diagram

From equation (2.51), the residual stress can be determined through the slope m as:

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

Where d_0 is the crystal surface distance in the unstressed state calculated on the graph $d\text{-}\sin^2\psi$:

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

Chapter 3. EXPERIMENTAL PROCEDURES

3.1 Material selection

- Substrate: C45 steel.
- Coating materials: hard chrome and carbide vonfram

3.2 Experimental equipment

Some equipment used to evaluate the properties of the coating: coating thickness, residual stress, fatigue fracture survey of the part are introduced in Figure 3.1.



a) *Thermal Electric Furnace*



b) *Coating thickness equipment (MiniTest 600B-Elektrophysik)*



c) X-ray diffraction equipment (X'Pert Pro)



d) Scanning Electron Microscope (SEM-S4800)

Figure 3.1. Some of the main equipment used in the study

To carry out the experimental fatigue, MU-2016 multi-purpose bending fatigue testing equipment at REME Lab (Ho Chi Minh City University of Technology and Education) was used.

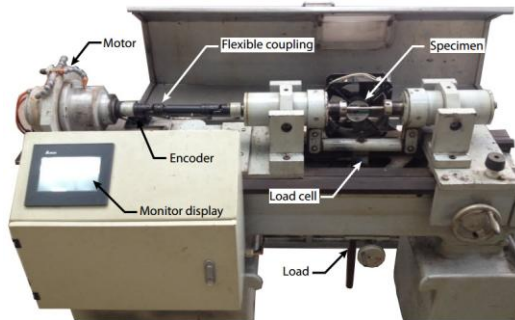


Figure 3.16. Fatigue testing equipment MU-2016

3.3 Preparation of fatigue and tensile test specimens

3.3.1 Fatigue test specimens

According to the ISO 1143:2010 and the actual conditions of the fatigue testing machine, the specimen for fatigue testing made from C45 steel is shown in Figure 3.19.

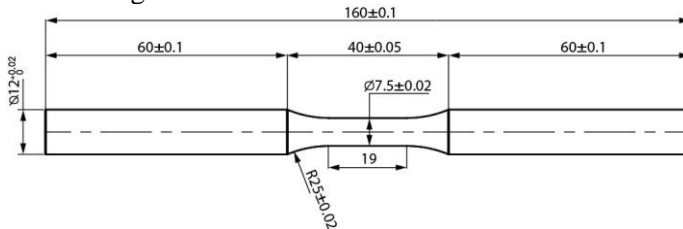


Figure 3.19. Specimen for fatigue testing

When conducting the test to determine the fatigue strength, it is necessary to predict the initial stress level so that the fatigue stress levels can be distributed on the fatigue testing machine. According to the ISO

6892-1(2009) standard, tensile testing specimen made from C45 steel is shown in Figure 3.20

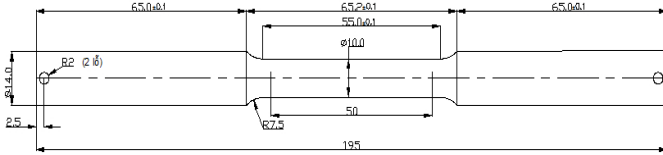


Figure 3.20. Tensile testing specimen

3.3.2 The process of manufacturing fatigue test specimens

According to ISO 1143:2010, the standard for four-point rotational fatigue testing, in order to obtain test results with high reliability the specimen must be isotropic. This means that the sample must be heat treated (texture remove and grain size reduction) before manufacturing. A specimen manufacturing process for experiment is shown in Figure 3.21

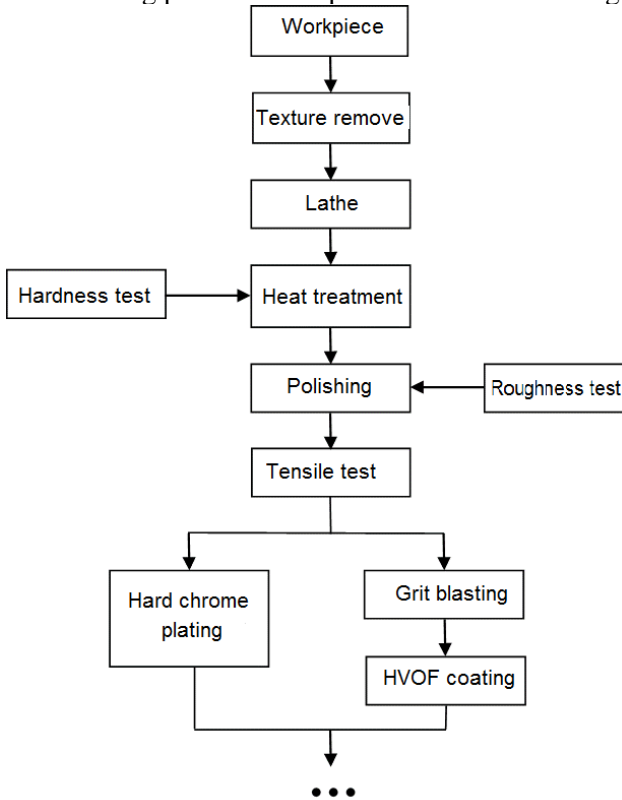


Figure 3.21. Specimen manufacturing process

3.4 Experiment design

3.4.1 Select the number of experiments

In order to build a fatigue equation curve for different thicknesses, it is necessary to study the influence of the input parameter which is the stress, σ_a , and the output parameter which is the number of cycles N_f respectively. According to the experimental planning method, we have the number of experiments [79].

$$N=2^k + 2.k + n_0 \tag{3.1}$$

Where: k is the number of influencing factors; n_0 number of experiments in the center of the solution

Thus, with only one influencing factor, which is stress ($k=1$) and choosing the number of experiments centered on the option $n_0=1$, we have the number of experiments as:

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

To provide data with high reliability and statistical significance, the number of repetitions of each experiment was 3 times [79-81]

3.4.2 Fatigue testing process

In order to establish fatigue equations for samples with high reliability experimental data, it means that fatigue tests must be performed at least 5 stress levels and 3 times repetitions for each stress level [80, 81]. Based on the standard fatigue curve of C45 material and the yield strength σ_c obtained from the experiment, we can propose a base stress level to conduct fatigue testing.

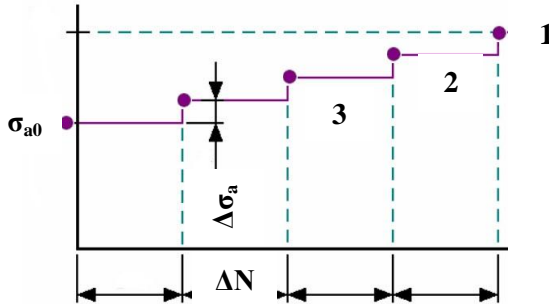


Figure 3.23. Steps to choose test stress [81]

The base stress level is preliminarily selected based on the 3 values (66%, 59%, 56%) σ_c [46]. Preliminary values σ'_f and b on the mathematical model of the fatigue curve are calculated through experimental data. From the preliminary σ'_f and b values, fatigue curve is established for the selection of subsequent stress levels for the remaining two stress points. To determine the fatigue limit, from the stress value corresponding to 10^7 cycles determined through the preliminary fatigue curve, we conduct a fatigue test

to determine the corresponding number of experimental cycles. After determining this stress - cycle value pair, we add or subtract a amount $\Delta\sigma_a$ until the number of cycles is 10^7 (fatigue limit) corresponding to the stress level σ_{a0} . The experimental layout is shown in Figure 3.23.

3.5 Coating thickness

The coating thickness is a very important parameter for the part to be coated. It greatly affects the mechanical properties of the specimen after coating. The choice of coating thickness depends on the working requirements and the dimension of each specific shaft. In this thesis, the fatigue test specimen is designed according to ISO 1143:2010 with the diameter of the coated specimen is $\varnothing 7.5$ mm, so the thickness of the chrome coating cannot be too large. In practice, the dimension of the shaft is much larger so the coating will have a larger range of variation (thicker). Therefore, it is necessary to determine the coating thickness on the specimen appropriately. Through the process of surveying and analyzing research documents on the influence of the surface strength layer on the fatigue strength of machine parts, especially the research works of Sirina and Genel [83, 84]. They have used the ratio of coating thickness/shaft diameter (t/d) to study and evaluate the influence of chromium plating and HVOF coating thicknesses.

From the actual survey results, the studies on the coating thickness [20-22, 64, 78, 85-91], it is proposed that samples with the diameter area $\varnothing 7.5$ mm are coated with minimum thickness for study is $10\ \mu\text{m}$ and the maximum thickness is $90\ \mu\text{m}$. To construct the fatigue curve for each thickness, we need to perform the experiment at 5 different force points level and repeat 3 times for each force point [80,81]. So, the number of samples are:

- + 15 plating samples with the smallest thickness, $10\ \mu\text{m}$ thick;
- + 15 plating samples with normal thickness, $30\ \mu\text{m}$ thick;
- + 15 plating samples with normal thickness, $60\ \mu\text{m}$ thick;
- + 15 plating samples with maximum thickness, thickness of $90\ \mu\text{m}$.

In HVOF coating technology, it is not possible to apply a layer thickness that is too thin because of technical factors such as grit blasted with Al_2O_3 particles to create roughness before coating. The coating process cannot adjust the amount of powder too small in one coating. Therefore, the HVOF coating method, We coated 3 thicknesses of $30\ \mu\text{m}$, $60\ \mu\text{m}$, $90\ \mu\text{m}$ with the number of samples as follows:

- +15 samples covered $30\ (\mu\text{m})$ thickness: minimum thickness
- +15 samples covered $60\ (\mu\text{m})$ thickness: normal thickness
- +15 samples covered $90\ (\mu\text{m})$ thickness: maximum thickness

3.6 Chrome plated and tungsten carbide coated process

3.6.1. Chrome plated process

Chrome plating is performed according to the standard procedure and using the plating solution shown in Table 3.6 with the plating parameters applied in the industry.

Table 3.6. Solution [64]

Solution	content (g/l)
CrO ₃	250
H ₂ SO ₄	2.0
Cr ³⁺	3 - 6
Temperature, °C	55
i _a (A/dm ²)	30
(%)	1
CrO ₃ /H ₂ SO ₄ ratio	100/1
S _a /S _c ratio	1/1 - 2 1
Plating speed, μm/min	0.15 - 0.60



Figure 3.26. Hard chrome specimen

3.6.2 Tungsten carbide coated process

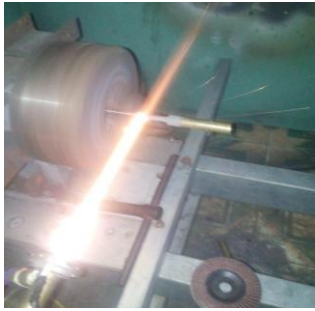
Before conducting spraying, the sample was roughened by grit blasting Al₂O₃ with the parameters as shown in Table 3.7. After the blasting process to create surface roughness, the specimen are coated on the Jet-Kote coating system according to the parameters as shown in Table 3.8. The parameters of the coating process are selected based on the optimization of hardness, porosity and adhesion of the coating through the doctoral thesis of author Nguyen Thanh Phu [60].

Table 3.7. Conditions for grit blasting

Pressure	4 bar
Distance	150 mm
Angle	60~90°
Agent Al ₂ O ₃	0,443mm ~ 0,686mm
Surface roughness	Ra = 4,3 μm

Table 3.8. Conditions for HVOF spraying

Oxygen regulator	150 psi
Oxygen flowmeter	200 l/min
Gas (LPG) regulator	50 psi
LPG flowmeter	40 l/min
Air pressure for powder feeder	80~100 psi
Carrier gas flowmeter	10 l/min
Standoff distance	250 mm
Rotaty speed	240 rpm
Angle of impingement	80~90°
Traverse speed	600 mm/min



a) HVOF process



b) Specimen cover

Figure 3.28. HVOF Coating



Figure 3.29. HVOF Specimen

Chapter 4. THEORETICAL RESULTS

4.1 Fatigue model

4.1.1 Diagram of fatigue test model

The schematic diagram of 4-point rotational bending fatigue is shown in Figure 4.1.

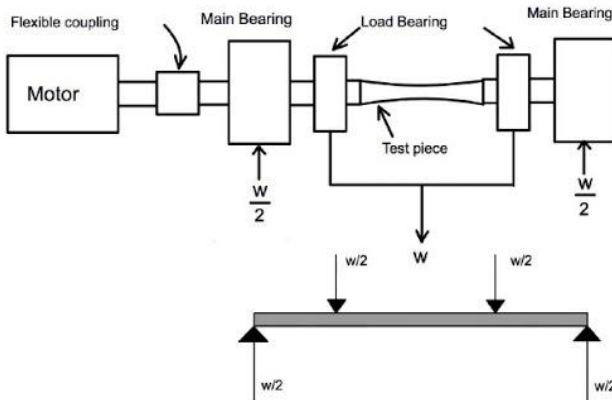


Figure 4.1. Schematic diagram of 4-point rotational bending fatigue

The motor transmits rotation to the active shaft assembly and the passive shaft through a flexible coupling and specimen. The force acting on both ends of the specimen in the vertical direction. The applied force value will be measured by the load cell. The number of fatigue fracture cycles is measured by a rotary encoder. The parameters of applied force and number of cycles will be displayed on the monitor.

Fatigue curve (SN) is established on the stress value σ_a and number of failure cycles N . However, when performing fatigue test, the load acting on the specimen is force P (Figure 4.2), so the stress value is calculated through this applied force. Based on the load acting on the specimen, we have the following force diagram:

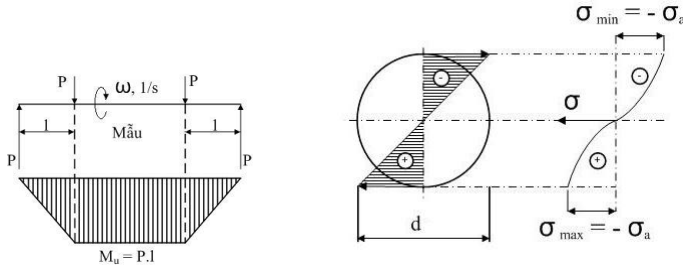


Figure 4.2. Applied force diagram

- The bending moment of the specimen is calculated :

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

- Bending stress acting on the specimen:

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

Where: + P (N) is the applied force

+ l (mm) is the distance from the place where the force is applied to the center of the shaking assembly

+ W_u (mm^3) is the bending moment

+ d (mm) is the diameter of the specimen

4.1.2 Fatigue model for axial part

Determining a mathematical model of the fatigue curve is to establish the fatigue curve equation with the stress σ_a and the number of cycles N_f . When evaluating fatigue strength with the criterion of stress-strain, there are three most widely used models: Stussi, Weibull and Basquin models.

4.1.2.1 Stussi model

Fatigue curve according to Stussi model is determined by stress and fatigue life N [1]:

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

Where : σ_E : Stress; σ_F : Fatigue Limit

σ_T : tensile strength ; C, p : fatigue resistance constant

To determine the C and p constant, we use the Trail-and-Error method to find the σ_F .

4.1.2.2 Weibull model

The mathematical model of the Weibull fatigue curve equation[1] is processed in the $\lg\sigma\text{-}\lg N$ coordinate system:

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

Where: N: number of cycles; σ_E : Stress
 σ_F : Fatigue limit; k,m: material constant

The σ_F value is also determined by the trial-and-error method. This model is often used when evaluating the fatigue failure probability of specimen.

4.1.2.3 Basquin model

To establish fatigue curves with stress and fatigue life N, Basquin proposed a mathematical model [92]

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

Where: σ_a : stress amplitude; σ'_f : fatigue strength coefficient
 $2N_f$: number of failure cycles; b: Basquin exponent

This mathematical model with the exponential equation is evaluated to be compatible with the Wöhler equation and is widely used in current fatigue research [93 - 97], especially in evaluating the effect of surface treatment [98] as well as surface coating to the fatigue strength of the substrate [99 - 101].

Through the process of reference and analysis of studies on the influence of surface coating on the fatigue strength of parts, it has been shown that the Basquin model (4.5) is suitable to evaluate the influence of chromium plating and HVOF coating. However, this is a general model used in the study of fatigue strength. In order to be able to apply it to the research in the rotary bending fatigue, it is necessary to establish a mathematical model with the coefficients σ'_f (fatigue coefficient) and b (exponential factor) respectively based on on this model.

From the 4-point rotary bending fatigue test model for the axial part, σ_a (stress amplitude) is the bending stress σ_u which was calculated on the formula 4.2 and $2N_f$ is the number of cycles from the experience. The coefficients σ'_f and b are determined by these parameters.

The pairs of values $(\sigma_{u1}, 2N_{f1}), (\sigma_{u2}, 2N_{f2}) \dots (\sigma_{un}, 2N_{fn})$ which were obtained from the experiment are only approximate values. They are not completely true solutions of the equation $\sigma_u = \sigma'_f (2N_f)^b$. So the deviation from the standard equation is:

$$\sigma_{u1} - \sigma'_f (2N_{f1})^b = v_1$$

$$\sigma_{u2} - \sigma'_f (2N_{f2})^b = v_2$$

$$\sigma_{u3} - \sigma'_f (2N_{f3})^b = v_3$$

...

$$\sigma_{un} - \sigma'_f (2N_{fn})^b = v_n$$

Where v_i are the errors.

Here, the least squares method is used. The total difference S is defined as:

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

So σ'_f and b are solutions of the system of equations:

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

Solving the above equations, we have:

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

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

With variance and determination coefficient is:

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \frac{1}{n-2} \sum_{j=1}^n (\sigma_{uj} - \sigma'_f (2N_f)^b) \\ R^2 &= \frac{\left[\sum \ln 2N_f \cdot \ln \sigma_u - \frac{1}{n} \sum \ln 2N_f \sum \ln \sigma_u \right]^2}{\left[\sum (\ln 2N_f)^2 - \frac{(\sum \ln \sigma_u)^2}{n} \right] \left[\sum (\ln \sigma_u)^2 - \frac{(\sum \ln 2N_f)^2}{n} \right]} \end{aligned} \quad (4.9)$$

From the above calculations and analysis, the mathematical model of the bending fatigue for the axial part are :

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

4.2 X-ray absorption function

4.2.1 Introduction

As showed in Chapter 2, the stress is calculated through the X-ray diffraction peak position. However, determining the exact position of the diffraction line peak must be corrected by the Lorentz-Polarization and Absorption function (LPA). The absorption function A is the most important because it has the greatest influence on the stress measurement results. Therefore, the author studies to set up the X-ray absorption function to correct the diffraction line. It make the stress measurement results more accurate.

4.2.2 Ω and Ψ Inclination method

The Ω method (Iso-Inclination method) have the incident ray AB and the diffracted ray BC are both in the stress measurement plane (Figure 4.4). The incident ray AB has a diffraction intensity I_0 corresponding to a cross-section area of 1 x 1 (mm). BC ray diffracted intensity I obtained on a diffracted crystal volume is calculated over a diffraction area S of length l_1 and width l_2 with a height of dz. Rays AB and BC make an angle α and β with the BZ line. There are two ways of measuring in the measurement method: fixed ψ and ψ_0 . For the fixed- ψ_0 , the incident ray AB is fixed and the BC ray changes (change in the diffraction angle 2θ). For the fixed ψ method, the bisector BD of incident ray AB and diffracted ray BC are fixed, incident ray AB and diffracted ray BC change (change of diffraction angle 2θ)

For the Ψ method (Side-Inclination method), the incident ray AB and the diffracted ray BC belong to a plane perpendicular with the plane of stress measurement (Figure 4.5a).

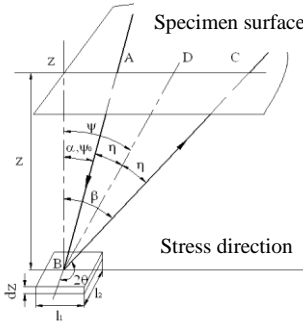


Figure 4.4. Ω method

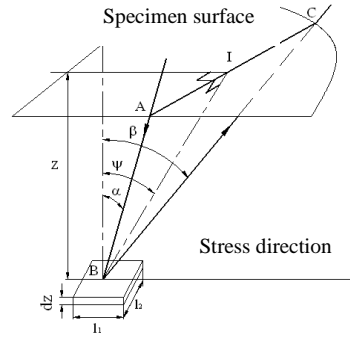


Figure 4.5a. Ψ method

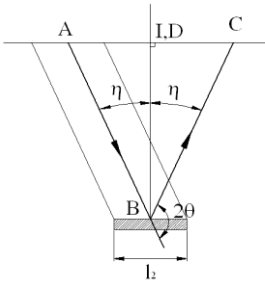


Figure 4.5b. Fixed η

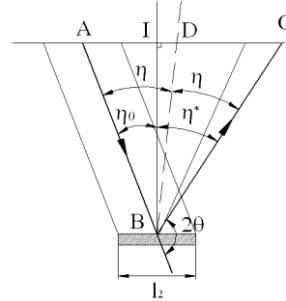


Figure 4.5c. Fixed η_0

The Ψ method also has two ways of measuring the fixed angle η and the fixed angle η_0 . For the fixed η_0 method (Figure 4.5.b), the incident ray AB is fixed to the perpendicular line with the surface of the measuring sample BI at angle η_0 and the diffracted ray BC changes with 2θ angle. While the fixed η method (Figure 4.5.c), the bisector BD of the angle formed by the incident ray AB and the diffracted ray BC is fixed perpendicular to the specimen surface.

4.2.3 X-ray absorption function for Ω and Ψ Inclination method

To establish the X-ray absorption function, the diffraction intensity I and the incident ray intensity I_0 must be determined. X-ray absorption is the difference between these two X-ray intensities. The diffraction intensity applied to the material is calculated according to the formula [104,105]:

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

Where F_{ij} is the orientation parameter of the material. For anisotropic materials it is the matrix of direction cosines. For isotropic materials, the direction parameter is the same in all directions and is constant. The above formula is rewritten [105]:

$$dI = aI_0 \exp[-\mu(AB + BC)]Sdz$$

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

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

The general absorption function is:

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

This is the general absorption function formula for Ω and Ψ methods.

4.2.3.1 unlimited diffraction area

In the case of stress measurement with unlimited diffraction area (Figure 4.4), the length l_1 and the width l_2 are determined.:

$$l_1 = \frac{1}{\cos \alpha}, l_2 = 1$$

For fixed ψ_0 method, we have : $\alpha = \psi_0$ and $\beta = \psi_0 + 2\eta$

$$\cos \alpha = \cos \psi_0$$

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

$$\text{Where } \eta = 90^\circ - \theta$$

Substituting equation (4.13) into (4.12), we have the absorption function A for the ψ_0 method

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

For fixed ψ method, we have: $\psi_0 = \psi - \eta$ and $\eta = 90^\circ - \theta$

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

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

Substituting into equation (4.12), we have the absorption function A for the ψ method

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

The equation (4.16) which is X-ray absorption function for the fixed- ψ method was established by Koistinen [102].

For the Ψ method, the length l_1 and the width l_2 are determined:

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

For fixed η_0 method, we have: $\cos\alpha = \cos\psi\cos\eta_0$ and $\cos\beta = \cos\psi\cos\eta^*$,
Substituting $\eta_0 = 90^\circ - \theta_0$, $\eta^* = 180^\circ - 2\theta - \eta_0$

We have $\cos\alpha = \cos\psi\cos\eta_0 = \cos\psi\sin\theta_0$

$$\begin{aligned} \cos\beta &= \cos\psi\cos\eta^* = \cos\psi\cos(180^\circ - 2\theta - \eta_0) \\ &= \cos\psi\cos(90^\circ - (2\theta - \theta_0)) = \cos\psi\sin(2\theta - \theta_0) \end{aligned} \quad (4.18)$$

Substituting into equation (4.17) and (4.12), the absorption function A for the fixed η_0 method is

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

For fixed η method, Substituting $\theta=\theta_0$ into equation (4.19), the absorption function A for the fixed η method is

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

4.2.3.2 limited diffraction area

In the case of limited area of diffraction, length l_1 and width l_2 are determined $l_1=1, l_2=1$

Substituting into equation (4.12), the general absorption function formula for the Ω and Ψ method is

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

For fixed ψ_0 method, substituting equation (4.13) into (4.21), we have

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

Substituting equation (4.15) into (4.21), the absorption function A for the fixed ψ method is

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

For fixed η_0 method, Substituting $\theta = \theta_0$ into equation (4.18) in to (4.21), the absorption function A for the fixed η_0 method is

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

For fixed η method, substituting $\theta = \theta_0$ into equation (4.24), we have:

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

The X-ray absorption function for both Ω and Ψ method is summarized in Table 4.1

Table 4.1. The X-ray absorption function for Ω and Ψ method

Method	Fixed	Unlimited diffraction area	Limited diffraction area
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 Residual stress error

There are many methods to approximate the diffraction line for finding the diffraction peak from which to calculate the atomic face distance d. Some approximation methods can be used such as Parabolic function, C.o.G, Lorentzian, Gauss... [106]. The Gauss function gives the lowest accuracy and error because the it is statistical and has high reliability. Therefore, in the thesis, the formula for calculating stress error will be established using Gauss function. The method of least squares is used to determine the residual stress error.

Residual stress error was calculated

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

95% confidence of the stress value is:

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

Chapter 5. EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION

5.1 Research and propose heat treatment process for specimen

5.1.1 Texture remove

The purpose of this process is to remove the texture of the workpiece which was caused by the rolling/rolling process. This process also reduce the grain size and make isotropy in the specimen. The workpiece in this study is rolled steel with a small diameter ($\phi 14$ mm) so that the grain structure is stretched in the rolling direction (RD) after pulling/rolling and texture structure appears.

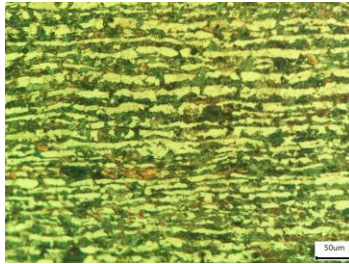
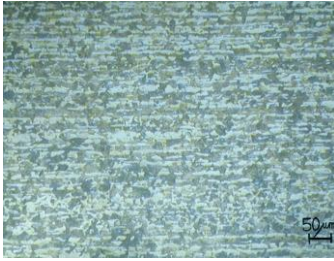


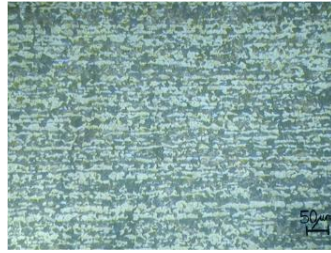
Figure 5.1. Microstructure of workpiece

The microstructure showed that the strong texture structure was existed (Figure 5.1, following RD direction). It is this that loses the isotropy and will harmful affect on the fatigue test without heat treatment process. In addition, many studies also show the influence of grain structure on mechanical properties, cutting ability [107-110]. Therefore, several heat treatment processes to remove texture structure to improve the mechanical properties of steel have been studied by Schindler and Abrão [110, 111].

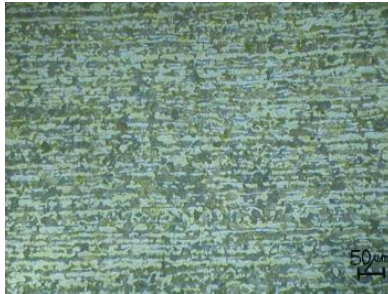
A commonly annealing process for C45 steels has been tested for workpiece with $\phi 14$ mm diameter at 500°C and times of 6, 8 and 10 hours, respectively [112]. The results show that the texture has improved but it is still quite significant as shown in Figure 5.2.



a) 6 hours



b) 8 hours



c) 10 hours

Figure 5.2. Microstructure of workpiece after annealing process

The new process to remove the texture structure was proposed. This heat treatment process improves the machinability, small grain structure to improve the fatigue strength of the C45 steel sample. The results of this study have been published in journal paper [113, 114].

Research results show that all the processes have removed texture [113]. However, the workpiece which was normalized according to the proposed procedure at 920°C for 15 min get the best result and this procedure was applied to next steps for fatigue specimen manufacturing.

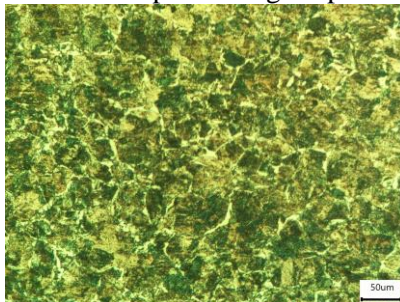


Figure 5.4. Microstructure after removing texture

Figure 5.4 shows the results of the texture removing process. The texture in the specimen has disappeared. However, the grain size is still large, about 15 - 50 μm and inhomogeneous.

In order to reduce the grain size and create isotropy, a new process for particle reduction is presented [114]. The workpiece after texture removing is normalized at 840°C and then heated a second time at 760°C. Each stage is 15 minutes. The results of the microstructure in Figure 5.6 show that the grain structure is relatively uniform in both the rolling direction and the traverse direction. Grain size is about 5 - 10 μm . This can be considered as a completely homogeneous and isotropic specimen.

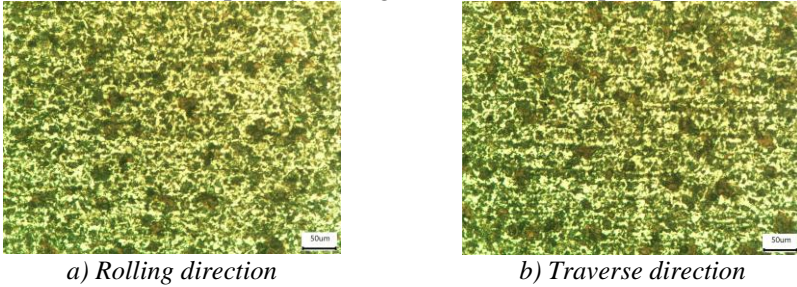


Figure 5.6. Microstructure after reducing the grain size

5.1.2 Quenching and tempering

The quenching process the sample was at 850°C for 15 minutes, and cooling in water at 20-30°C [112] to achieve a hardness from 56 to 59 HRC. After quenching, the specimen is tempered at 600°C for 30 minutes. The microstructure of the sample after quenching and tempering is shown in Figure 5.7.

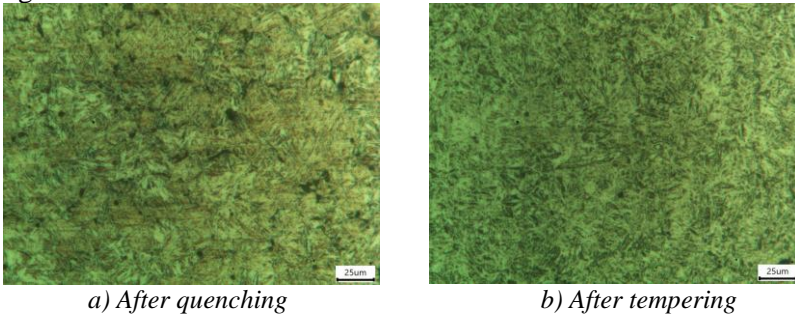


Figure 5.7. Microstructure of the sample after quenching and tempering

5.1.3 Measurement results of the parameters of the specimen

5.1.3.1 Tensile strength

Table 5.3. Tensile strength

Specimen	yield strength σ_c (MPa)	ultimate strength σ_b (MPa)	Elongation (%)
----------	------------------------------------	---------------------------------------	-------------------

1	1.067	1.124	14,925
2	1.090	1.135	14,766
3	1.091	1.168	13,433
Average	1.083±16	1.143 ±25	14,374±0,941

From the tensile test results, select the maximum fatigue test stress with the maximum stress $\sigma_{\max} = 70\% \sigma_c$. This is suitable for the working stress of the shaft within the elastic limit of C45 steel.

5.1.3.2 Roughness and hardness

Results are shown in Tables 5.4, 5.5 và 5.6.

Table 5.4. Roughness of specimen Ra (μm)

Specimen	1	2	3	Average
Roughness	0,84	0,84	0,87	0,85±0,02

Equipment error: $\pm 0,05 \mu\text{m}$

Table 5.5. Hardness of specimen after quenching

Specimen	1	2	3	Average
Hardness (HRC)	56,1	58,9	57,9	57,6±2,5

Table 5.6. Hardness of specimen after tempering

Specimen	1	2	3	Average
Hardness (HRC)	31,7	30,2	30,8	30,9±2

5.2 Effect of chromium coating thickness on fatigue strength

5.2.1 Parameters of chrome plating

5.2.1.1 Coating thickness.

The coating thickness are showed in Table 5.7. This is the average value after 5 times measurement.

Table 5.7. Coating thickness of chrome plating layer

Specimen	coating thickness (μm)
1 (10 μm)	9±2
2 (30 μm)	30±5
3 (60 μm)	61±7
4 (90 μm)	93±10

5.2.1.2 Roughness

Table 5.8. Roughness of chrome plating layer Ra (μm)

Specimen	1	2	3	Average
Roughness	0,75	0,77	0,82	0,78±0,05

5.2.1.3 Hardness

Table 5.9. Hardness of chrome plating layer (HV)

Specimen	1	2	3	Average
Hardness	802	832	821	817±15

5.2.1.4 Adhesion of chrome plating layer

The Vicker hardness tester according to ISO 19207-2016 is used for measuring the adhesion of the chrome coating. Firstly, diamond indenter is placed at the coating/substrate interface. Then, varying force levels from 1

Force levels (kgf)	Force apply P (N)	diagonal of the indenter d (μm)	crack length a (μm)
1	9,807	47,5	
2	19, 1	58,3	
3	29,42	69,	
5	49,03		94,1
10	98,07		162,4

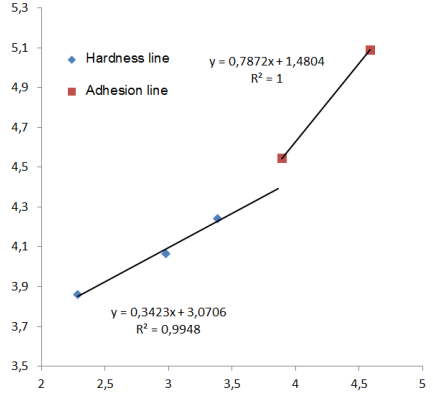


Figure 5.9. Extrapolated lines lnP – lnd and lnP – lna

They are plotted versus the applied loads in bilogarithmic scale. Then, the critical point coordinates (Pc, ac) are determined as the intersection point between extrapolated lines lnP – lnd and lnP – lna and this value is (35,6646; 73,2572).

Using the critical parameters for cracking, Pc and ac, under which no crack generates in the coating–substrate interface, apparent interfacial fracture toughness, Kca, can be expressed as [62]:

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

Where : $E_c = 271 \text{ GPa}$ [104], $H_C = 817 \text{ HV} \sim 8,012 \text{ GPa}$

$E_S = 200 \text{ GPa}$ [105], $H_S = 30,9 \text{ HRC} \sim 3,047 \text{ GPa}$

5.2.2 Residual stress of hard chrome plating

The d-Sin²ψ method was used to conduct residual stress analysis on the specimen after coating. The η method is applied to measure stress. the specimens were removed chrome layer with 30% hydrochloric acid solution according to the B. Eigenmann procedure [115] for investigating the variation of residual stress in the plating layer. The elastic modulus of chromium is E= 271 GPa and Possion coefficient is ν = 0.23 [115] while that of C45 steel are E = 200 GPa and ν = 0.3 [116], respectively.

The X-ray diffraction machine after being corrected by the LPA function (chapter 4). The OriginPro 8.5.1 software is used to interpolate the diffraction curve according to the Gauss equation. The crystal face distances in chromium coatings are calculated by Bragg's equation.

The residual stress is calculated according to the equation 2.52 and the stress error is calculated according to the equation 4.31 (chapter 4). The results are shown in Table 5.14.

Table 5.14. Residual stress of specimen

	Coating thickness (μm)	Residual stress of chrome layer $\sigma_{\phi\text{Cr}}$, (MPa)	Residual stress of substrate $\sigma_{\phi\text{Fe}}$, (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

The results show that there is always residual tensile stress and microcracks in chromium plating. This is shown to be due to the decomposition of chromium hydride during chromium precipitation causing volume shrinkage and create to tensile stresses and microcracks.

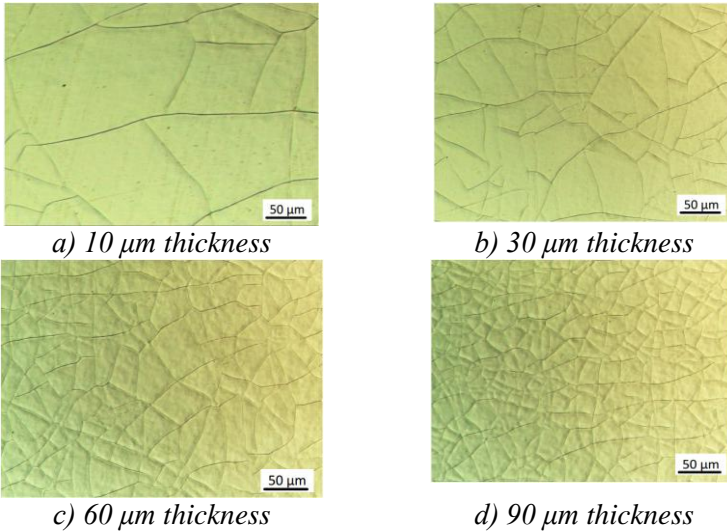


Figure 5.15. Microcracks density of chrome layer

The image processing method based on the proposal of M. Vidal et al. [16] was applied for evaluating the microcracks density of the chrome layer. Firstly, the crack images with optical microscopy were converted into 8-bit black and white images. Image processing is performed by ImageJ software to calculate the total number of black pixels presenting to the crack and the total number of black and white pixels of the survey area.

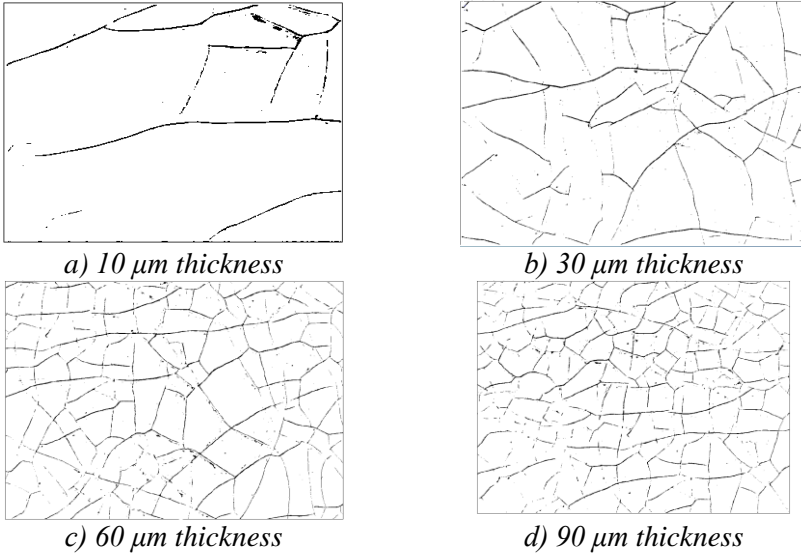


Figure 5.16. Microcracks density of chrome layer with 8-bit image
 The density of micro-cracks is calculated [16]:

$$\text{Microcrack density(\%)} = \frac{\text{Black pixels}}{\text{Total pixels}} \times 100$$

The image results after processing are shown in Figure 5.16 and the microcracks density is shown in Table 5.15.

Table 5.15. Microcracks density

	Coating thickness (μm)	Black pixels (pixel)	Total pixels (pixel)	Microcrack density(%)
1	10	14490	713838	2,03
2	30	18555	715624	2,6
3	60	26286	712460	3,69
4	90	38428	712712	5,4

Figure 5.16 and 5.17 show that increasing the chromium coating thickness, the tensile stress decrease and the micro-cracks density increase. This is cause as the thickness increases, the shrinkage of chromium crystals increases cause to tensile residual stress and microcracks appear. The residual tensile stress is reduced due to this microcrack appear [64,78]. Specifically, the tensile stress of 10 μm thickness is 620 MPa, the tensile stress is reduced to 431 MPa for a thickness of 30 μm, 319 MPa for 60 μm and will be 228 MPa for a thickness of 90 μm. However, the micro-cracks density increased from 2.03% to 5.4% with the thickness from 10 μm to 90 μm. The microcrack density of the chromium layer are consistent with the study [16] when the average microcrack density of the chromium plating

layer is 3.4%. However, the coating thickness is not shown in this study, the author shows the parameters of the plating process

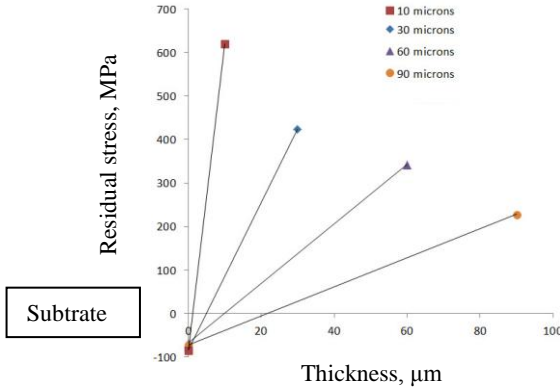


Figure 5.17. Residual stress gradient for chromium plating thicknesses

Figure 5.17 shows the variation of residual stress of the chromium plating with different plating thicknesses. The residual stress of substrate is in the range -66 MPa to -84 MPa. This shows that the substrate has very little stress after tempering process. The tempering process has almost completely relieved the stress by machining and quenching process.

5.2.3 Effect of chromium plating on fatigue strength

5.2.3.1 Evaluation Criteria

- Based on stress - life data
- Based on endurance and fatigue limit

5.2.3.2 Analysis

The purpose of the test is to evaluate the fatigue strength on C45 shaft steel with different coating thicknesses when coated with tungsten carbide using modern HVOF coating and hard chrome plating. From there, compare and evaluate the fatigue strength of tungsten carbide coating using HVOF method and hard chrome plating. Besides, the research will give the evaluation for the selection of coating method and appropriate thickness for the shaft.

5.2.3.3 Experiment results

The fatigue equation was established for the C45 material and different chromium plating thicknesses based on the mathematical figure model and experimental data:

+ C45 Substrate:
$$\sigma_u = 2260,5(2N_f)^{-0,105}$$

+ 10µm – chrome plating:
$$\sigma_u = 1678,1(2N_f)^{-0,088}$$

$$\begin{aligned}
 + 30\mu\text{m} - \text{chrome plating:} & \quad \sigma_u = 1369,5(2N_f)^{-0,076} \\
 + 60\mu\text{m} - \text{chrome plating:} & \quad \sigma_u = 1306,4(2N_f)^{-0,075} \\
 + 90\mu\text{m} - \text{chrome plating:} & \quad \sigma_u = 987,64(2N_f)^{-0,061}
 \end{aligned}$$

Table 5.17. Fatigue equation parameters

Specimen	(t/d) ratio	σ'_f (MPa)	b
C45 Substrate		2260,5	-0,105
10 μm \chrome plating	0,0013	1678,1	-0,088
30 μm \chrome plating	0,004	1369,5	-0,076
60 μm \chrome plating	0,008	1306,4	-0,075
90 μm \chrome plating	0,012	987,64	-0,061

In investigating the influence of coating layer on the fatigue strength of the part, the previous studies only analyse sensory evaluation through the stress-cycles without giving a mathematical equation for the fatigue curve [19-22], [27], [40-43]. In this thesis, the mathematical equation of the fatigue curve with each coating thickness is determined. The cycles number of any load stress value is easily determined from this equation. This is good conditions in research as well as practical application.

The determination coefficient $R^2 \sim 1$ are shown in Table 5.17. This show that the fatigue equation is very suitable to the selected mathematical figure model.

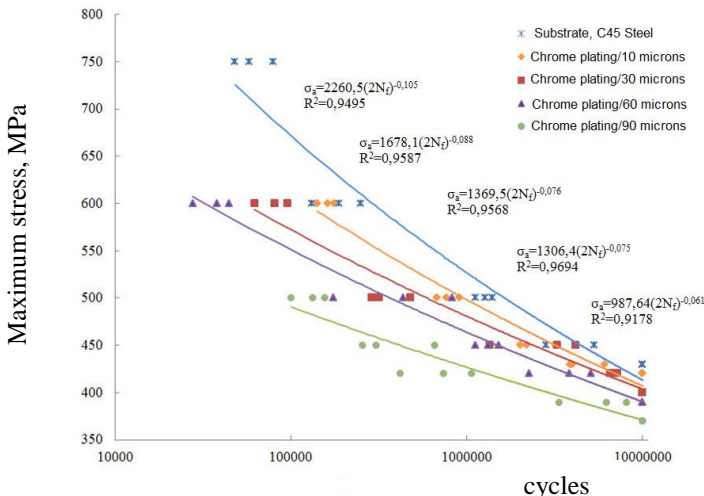
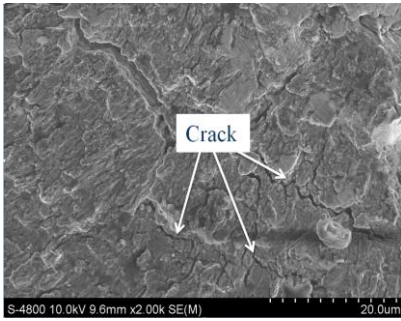


Figure 5.18. S-N curve of hard chrome plating

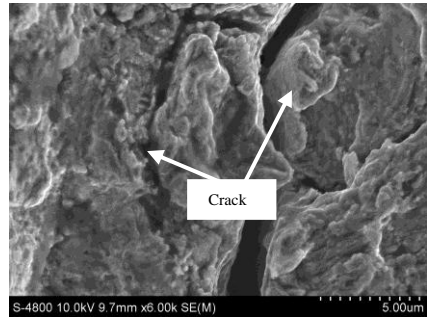
Figure 5.18 shows that the fatigue strength of the chrome plating parts is greatly reduced compared to the substrate. The fatigue strength decrease as the coating thickness increases. The chromium plating layer is always residual tensile stress and microcracking which causing a decrease in fatigue strength. As mentioned in the previous section, the tensile residual stress in hard chrome plating tends to decrease with increasing coating thickness. Theoretically, this should make fatigue strength to increase again with increasing thickness. However, the result is not the same because increasing the thickness of the chrome layer, the residual tensile stress tends to decrease but the microcracks density increases. It make cracks propagate early.

The fatigue limit (σ_{-1}) at the 10^7 cycles shows that the fatigue limit of the 10 μm coating thickness is $\sigma_{-1} = 420$ MPa, decrease of 2.3% compared to the substrate, while that of 30 μm plating thickness is $\sigma_{-1} = 400$ MPa, reduction of 6.97% compared to the substrate. For 60 and 90 μm thicknesses, the fatigue limit is $\sigma_{-1} = 390$ MPa and 370 MPa respectively, which means a reduction of 9.3 % and 11.62 % compared to the substrate. The reason is the chromium plating thickness increased from 10 μm , 30 μm , 60 μm and 90 μm , the crack density increased by 2.03%, 2.6%; 3.69% and 5.4%, respectively. A higher microcracks density reduces bonding in the chromium lattice and cracks develop earlier when cyclic stress loading. This reduces fatigue strength on the chromed part for the respective plating thicknesses. The reduced fatigue strength of plating hard chromium are consistent with studies [19, 20] when evaluated on a plating thickness. However, the study of author Voorwald [27] showed that the fatigue strength decreased by about 35% and there was little difference between the two chromium plating layers with 45 μm and 120 μm thicknesses when evaluating the effect of the chromium layer to fatigue strength on AISI 4340 high-strength steel. While research results show that fatigue strength decreases from 2.03% to 5.4% with thickness from 10 μm to 90 μm on C45 steel (heat treated). This demonstrates that the effect of chromium plating on fatigue strength on different substrates will give different results

Figure 5.20 shows that the initial crack always exists in the crystal lattice of the hard chromium layer. The SEM figure also shows that the adhesion of the chromium plating and the substrate is very good (Figure 5.21)



a) Microcracks



b) Cracks in chrome layer

Figure 5.20. Microcracks in chrome layer

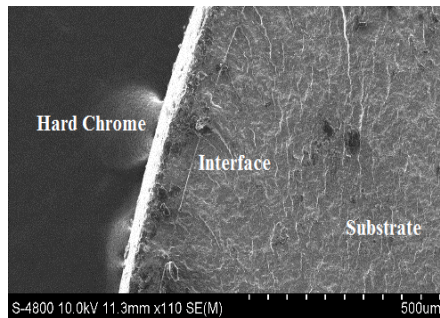


Figure 5.21. Chrome plating layer with SEM

Figure 5.22 shows that fatigue cracks develop from the original cracks existing in the chromium coating. Cracks in the coating surface develop towards the center of the part and destroy the specimen when cyclic load is applied. As the micro-cracks density increases, this means that the number of micro-cracks/coating area increases leading to weakening of the bond in the coating and fatigue crack propagate early. As a result, fatigue decreases with increasing thickness of the chromium coating.

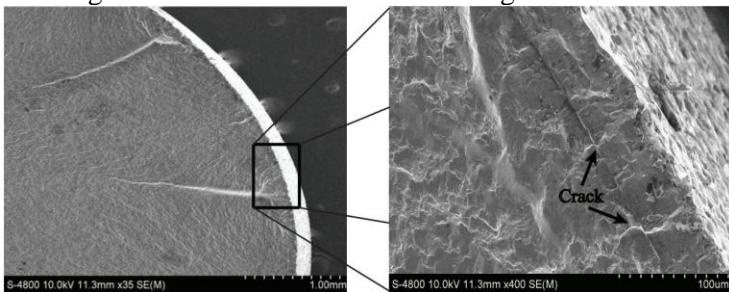


Figure 5.22. Crack propagation in chrome plating specimen

5.3 Effect of carbide vonfram coating thickness on fatigue strength

5.3.1 Measurement results of the parameters of the specimen

5.3.1.1 Microstructure of carbide vonfram layer

Figure 5.23 shows the diffraction curve of the WC-10Co-4Cr coating. The results show the WC phase occupies the majority and it is the main phase. In addition, the diffraction peak representing the WC phase, the W_2C phases were also detected in the coating layer. This is the result of high temperature decarburization during the coating process. This is consistent with the conclusion of the study [36]. In addition, the CoCr binding phase is also determined through this analytical method. We can see the WC hard phase is linked together through the CoCr matrix phase in Figure 5.24 (determined by X-ray diffraction analysis).

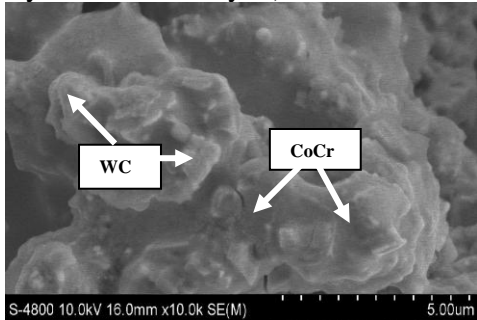
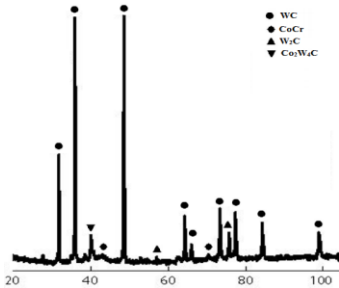


Figure 5.23. X-ray diffraction pattern of WC-10Co-4Cr

Figure 5.24. Microstructure of coating layer

5.3.1.2 Coating thickness.

The coating thickness are showed in Table 5.18. This is the average value after 5 measurements

Table 5.18. coating thickness of carbide vonfram

Specimen	HVOF coating (μm)
1	31 \pm 5
2	63 \pm 7
3	92 \pm 10

5.3.1.3 Roughness

Roughness of carbide vonfram specimen are showed in Table 5.19

Table 5.19. Roughness of carbide vonfram specimen (μm)

Specimen	1	2	3	Average
Roughness	6,31	6,52	6,46	6,43 \pm 0,12

5.3.1.4 Hardness and adhesion of carbide vonfram.

Table 5.20. Hardness of carbide vonfram (HV)

Specimen	1	2	3	Average
Hardness	1230	1056	1020	1102±128

Similar to measuring the adhesion of the chrome coating, the Vicker hardness tester according to ISO 19207-2016 is used. The measurement results are shown in Table 5.21. The critical point value (P_c, a_c) which cracks appear is the intersection between the lines $\ln P - \ln d$ and $\ln P - \ln a$ as show in Figure 5.25. From this value, we can determine the intersection of the lines $\ln P - \ln d$ and $\ln P - \ln a$ is (47.3738; 72.1279).

The adhesion strength of coating K_{ca} (MPa.m^{1/2}) is

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

Where: $E_c = 316$ GPa [37], $H_C = 1102$ HV $\sim 10,81$ GPa
 $E_s = 200$ GPa [105], $H_s = 30,9$ HRC $\sim 3,047$ GPa

Table 5.21. Adhesion strength

Force levels (kgf)	Force apply P (N)	diagonal of the indenter d (μm)	crack length 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

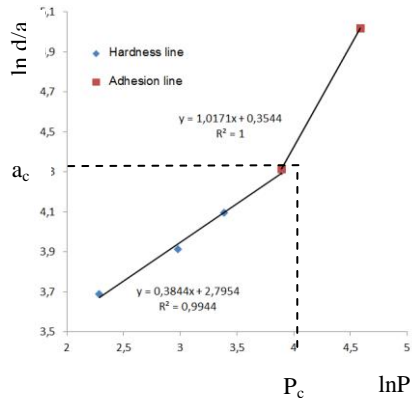


Figure 5.25. Extrapolated lines $\ln P - \ln d$ and $\ln P - \ln a$

5.3.2 Residual stress in carbide vonfram layer.

Tungsten carbide materials are multiple phases. However, the WC phase is the main phase and accounts for the highest percentage (86%). Therefore, the residual stress on the tungsten carbide material is only calculated for this carbide phase. The WC–10Co–4Cr material has an elastic modulus of $E = 316$ GPa and Possion coefficient $\nu = 0.22$ [37]. Through the results of X-ray diffraction and the $d - \sin^2 \psi$ diagram, the residual stress value for the substrate/coating interface with the coating thicknesses was calculated. The results are shown in Table 5.24.

Table 5.24. Residual stress of carbide vonfram specimen

	Coating thickness (μm)	Residual stress of carbide vonfram (MPa)	Residual stress of substrate (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

There is always a compressive residual stress in the tungsten carbide coating. The reason is that the WC particles are very hard and do not melt under the temperature when spraying in HVOF process. Therefore, the kinetic energy of these hard particles with the steel substrate and the previous coating at high speed causes plastic deformation and causes compressive stress. Another factor affecting the compressive residual stress of the coating is due to the post-coating cooling process. The thermal expansion coefficient of the coating is smaller than the thermal expansion coefficient of the substrate which will produce a compression. In this study, the coefficient of thermal expansion of AISI 1045 steel is $11.52 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ while the coefficient of thermal expansion of WC-10Co-4Cr coating is $5.5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ [36]. Thus, it will cause compressive stress when coating WC-10Co-4Cr on AISI 1045 steel. This is also consistent with the published results of the study [37, 38] when evaluating the residual stress of the tungsten carbide layer on the carbon steel base with a coating thickness.

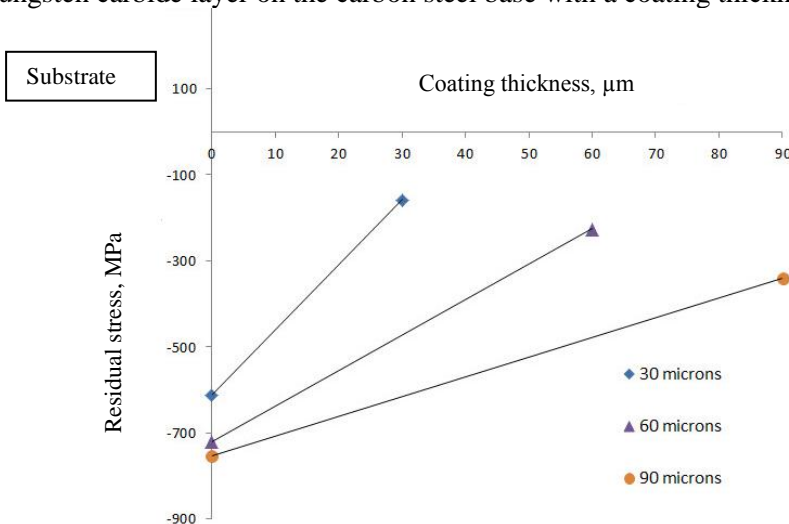


Figure 5.31. Residual stress of carbide vonfram layer

The results also show that the compressive residual stress value increases with the coating thickness. Residual stress measurement results

show that the 30 μm coating thickness is -158 MPa while it is -226 MPa for the 60 μm thickness and -341 MPa for the 90 μm thickness. In the HVOF coating process, the coating thickness is increased by increasing the number of passes because we cannot be adjusted parameter to get a thick layer for each pass coated. In this thesis, the coating thicknesses of 30 μm , 60 μm , and 90 μm are respectively 2/4/6 coating pass. This means that the thickness increases, the collision time of the WC particles with the previous coating increases and leading to greater plastic deformation and higher compressive stress. Furthermore, as the coating thickness increases, the coating time increases and the heating time increases. Finally, the substrate has a higher temperature. It is also one of the causes of increased residual compressive stress (according to equation 2.27). The effect of this temperature factor on compressive residual stress is in accordance with the study [119]

The residual stress at the coating/substrate interface shows that the value of compressive residual stress is high in three coating thicknesses. The reason is the substrate is grit blasted with Al_2O_3 particles to create surface roughness to enhance coating adhesion before carbide coating. This also causes the substrate surface is large plastic deformation and create residual compressive stress. The compressive residual stress value also increased. It grow up with the coating thickness from 613 MPa to 754 MPa with the coating thickness of 30 μm to 90 μm . The reason is plastic deformation due to Al_2O_3 particle spraying and it is also due to plastic deformation during coating process (WC particle kinetic energy). This plastic deformation increases with increasing coating thickness.

5.3.3 Effect of carbide vonfram on fatigue strength

Fatigue equations were established for tungsten carbide with different coating thicknesses on C45 steel base on experimental data and fatigue model.

$$\begin{aligned}
 + \text{WC-10Co-4Cr} \setminus 30 \mu\text{m}: & \quad \sigma_u = 1191,7(2N_f)^{-0,062} \\
 + \text{WC-10Co-4Cr} \setminus 60 \mu\text{m}: & \quad \sigma_u = 1379,2(2N_f)^{-0,071} \\
 + \text{WC-10Co-4Cr} \setminus 90 \mu\text{m}: & \quad \sigma_u = 1517,9(2N_f)^{-0,073}
 \end{aligned}$$

Table 5.26. Fatigue equation parameters

Specimen	(t/d) ratio	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

The coefficient of determination R^2 is showed in Table 5.26. All values are greater than 0.7 so demonstrating the suitability of the figure model

Fatigue strength in tungsten carbide coating show that fatigue strength tends to increase with coating thickness. Specifically, the fatigue strength of the 30 μm coating thickness is 1,444,648 cycles at a stress of 475 MPa. It is 1,949,652 cycles for 60 μm coatings thickness while it is unbroken (run out-107 cycles) for 90 μm . The comparison of fatigue limit with the substrate shows that the fatigue limit of tungsten carbide coating is higher than that of the substrate and increases with coating thickness. The coating fatigue limit of 30 μm is σ_{-1} = 450 MPa (increase of 4.65% compared to the substrate) and that of 60 μm is σ_{-1} = 460 MPa (increase of 6.97% compared to the substrate) while it is σ_{-1} = 475 MPa (10.46% increase compared to substrate) the 90 μm . There is always residual compressive stress and increases with the coating thickness. This make to increase the fatigue strength of the part. The results of tungsten carbide coating creating compressive residual stress and increasing fatigue strength are consistent with the study [40, 45]. However, it also shows that the effect of coating on fatigue strength of C45 steel material (heat treated) is different from other substrate. According to the study [40], fatigue strength increased to 540%-4300% when coating WC-10Co-4Cr on aluminum alloy AA6063-T6 with 250 μm /12.5 mm of coating thickness/diameter. While coating tungsten carbide on AISI 4340 high-strength steel material causes a reduction in fatigue strength to 21.4% for a coating thickness/specimen diameter of 200 μm /6.35 mm [46]. Similarly, this coating make to reduce fatigue strength by 28.9% on steel base 15-5PH (ASTM A 564) according to research [48]. Besides, some studies also show that coatings with higher elastic modulus than the substrate will increase fatigue strength [45]. In this thesis, the elastic modulus of C45 steel and WC-10Co-4Cr coating are $E = 200$ GPa and 316 GPa, respectively [37,116]. Another factor affecting the fatigue strength of the coating is the compressive residual stress of the substrate. The substrate is grit blasted with Al_2O_3 particles to create roughness for increasing the adhesion of the coating. However, this factor causes the substrate to be plastically deformed and generates a very large residual compressive stress. This contributes to an increase in the fatigue strength of the coated specimen.

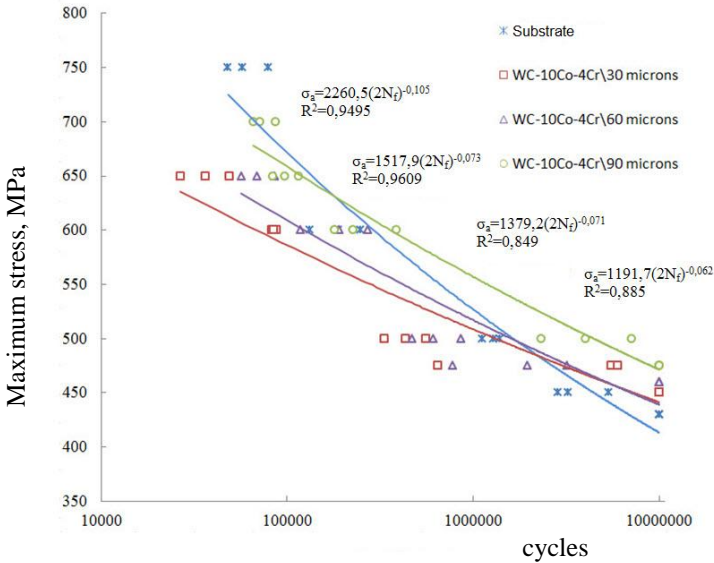


Figure 5.32. S-N curve of Carbide Vonfram

Figure 5.34 shows the tungsten carbide coating had very good adhesion and it isn't delamination under load.

The fatigue fracture surface of the coating specimen is shown in Figure 5.36. This result is fatigue cracking propagation when stress is applied at the reduced section on the specimen ($\varnothing 7.5$). Figure 5.35 shows that cracks originating from outside the coating surface or from pores will propagate into the substrate material. This result is consistent with the analysis of studies [18, 41]. Besides, figure 5.35 shows that the crack propagates through the WC particles and the crack propagation speed increases when encountering the pores in the coating. This result is consistent with published [120]. However, this crack growth slows down because of compressive stress in the coating layer.

For the coating specimen, the substrate has a very high compressive residual stress. Therefore, cracks on the coating surface cannot propagated into the substrate. It is like a barrier that prevents the growth of cracks from the outside. Fatigue cracks continue to propagate along the interface boundary between the coating and the substrate surface and delamination occurs again when the applied load is high enough. The crack delamination will stop at the place where the substrate surface has a high roughness and also is the greatest stress concentration location. Finally, cracks propagate into the shaft and fatigue failure occur.

As the coating thickness increases, the compressive residual stress increases. It is will prevent the appearance and growth of the initial crack in

the coating. The fatigue strength increases with increasing coating thickness

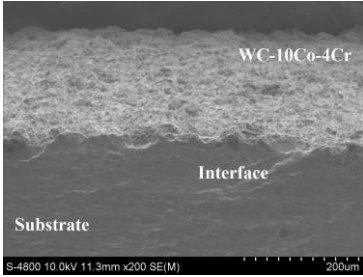


Figure 5.34. SEM of WC-10Co-4Cr coating specimen

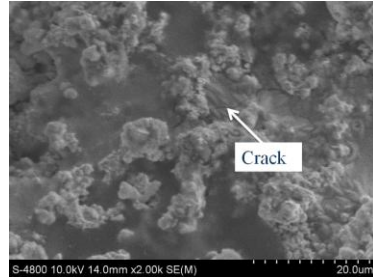


Figure 5.35. Cracks propagation in WC-10Co-4Cr layer after load applied

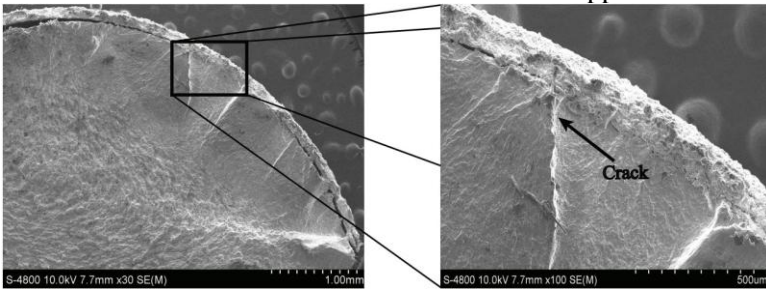


Figure 5.36. Fracture surface of a fatigue failure

5.4 The effect of chromium plating and tungsten carbide coating on fatigue strength and applicability

5.4.1 Comparison of the effect of chromium plating and tungsten carbide coating on fatigue strength

Figure 5.37 show the fatigue life of hard chrome plating and tungsten carbide coating for 30 µm, 60 µm, 90 µm thicknesses

Figure 5.37 shows that the fatigue strength of tungsten carbide coating is always higher than that of chromium plating when considering the same thickness. Although the surface roughness of tungsten carbide coating is always greater than chromium plating. This is consistent with the study [47] when evaluating the effect of these two coating methods on the fatigue strength of 316 stainless steel substrates with a coating thickness of 100 µm. While the study [46] showed that both methods caused a decrease in fatigue strength when coated on high strength steel AISI 4340 but the fatigue strength of WC-Co-Cr coating decreased lower than that of chromium plating.

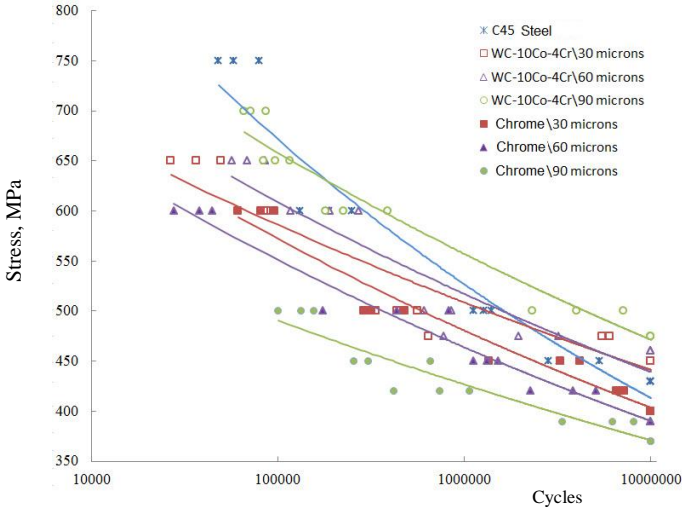


Figure 5.37. S-N curve of chrome plating and carbide vonfram

There are always two opposing trends when comparing the effect of coating thickness on fatigue strength. Fatigue strength tends to increase with carbide coating thickness and vice versa with hard chrome plating. The chromium layer there is always a microcracking that reduces fatigue strength while the carbide layer always has a residual compressive stress and increases the fatigue strength.

Figure 5.38 shows the fatigue limit of the chromium plating layer of 30 μm thickness is $\sigma_{-1} = 400$ MPa while the fatigue limit of the carbide coating is $\sigma_{-1} = 450$ MPa (12.5% increase compared to chromium plating). For a thickness of 60 μm , the fatigue limit of chromium plating is $\sigma_{-1} = 390$ MPa while the fatigue limit of the carbide coating is $\sigma_{-1} = 460$ MPa (17.9% increase compared to chrome plating). This ratio increases as the coating thickness is increased to 90 μm and the fatigue limit of chromium plating is $\sigma_{-1} = 370$ MPa while the fatigue limit of the carbide coating is $\sigma_{-1} = 475$ MPa (increase of 28.3% compared to chrome plating).

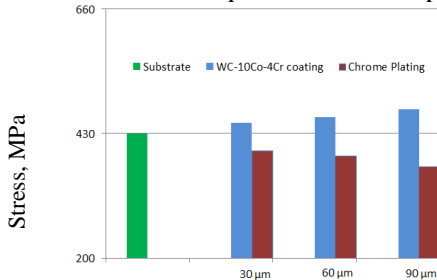


Figure 5.38. Fatigue limit of chrome plating and carbide vonfram

5.4.2 Applicability of chrome coating and tungsten carbide coating

The research results show that the tungsten carbide coating can replace the chromium coating. However, the results of the thesis also show that depending on the specific working conditions, it is possible to use the coating method with suitable thickness in a reasonable way. The apply loads under the fatigue limit (at 10^7 cycles) of the a thickness of 10/30/60/90 μm are 420/400/390/370 MPa, respectively, the chrome plating method considered as a method to get both fatigue and economic criteria. For higher loads apply, we consider using a tungsten carbide coating with a fatigue strength limit of 450/460/475 MPa are 30 μm /60 μm /90 μm , respectively. It should also be emphasized that the above research results only apply to C45 steel (which applied heat treatment according to the shaft) because the effect of coating on fatigue strength is different for different substrate materials.

Chapter 6. CONCLUSION AND FUTURE SCOPE

1. Conclusions

The following conclusions are drawn on the basis of experimental observations and analysis:

- For the chrome coating, the tensile stress decreases and the microcracks density increases as the coating thickness increases. In contrast, in tungsten carbide coating, there is always residual compressive stress and increase with coating thickness.

- The fatigue strength of the chrome-plated specimen decreases with the thicker the plating layer. It decreases 2.3%; 6.97% ; 9.3% and 11.62% with 10, 30, 60 and 90 μm thickness, respectively when compare to substrate.

- The fatigue strength of the tungsten carbide coated increases as the coating thickness increases. It increase 4.65%; 6.97% and 10.46% with 30, 60 and 90 μm , respectively, when compare to substrate.

- Establish fatigue equations for different coating thicknesses for two coating methods.

- Tungsten carbide coating has significantly higher fatigue strength than hard chrome plating and is a good alternative to chromium plating .The increase of tungsten carbide fatigue strength of 30, 60 and 90 μm thickness are 5%; 17.9% and 28.3% respectively. In addition, the ratio of coating thickness/diameter (t/d) is also taken into account in the thesis to refer for selecting the thickness coating for real shaft.

2. Scope for future work

In future, the present work may be extended in the following lines:

- This study only considers the influence of chromium plating and tungsten carbide coating at micro thickness. Therefore, it is necessary to evaluate the coating thickness at a thinner nanoscale.

- The research is only carried out on C45 steel. Therefore, it is possible to expand the research with other materials to create a dataset for applying research results into production.

LIST OF PUBLICATIONS FROM THESIS

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.