

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

---oo0oo---

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

**LUẬN ÁN TIẾN SĨ
NGÀNH: KỸ THUẬT CƠ KHÍ**

Tp. Hồ Chí Minh, tháng 06/2021

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

---oo0oo---

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

NGÀNH: KỸ THUẬT CƠ KHÍ - 9520103

Hướng dẫn khoa học:

1. PGS.TS. Đặng Thiện Ngôn
2. PGS.TS. Lê Chí Cường

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

QUYẾT ĐỊNH

Về việc giao đề tài luận án và người hướng dẫn nghiên cứu sinh khóa 2014-2017 HIỆU TRƯỞNG TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT TP. HỒ CHÍ MINH

Căn cứ Quyết định số 426/QĐ-TTg ngày 27/10/1976 của Thủ tướng Chính phủ quy định về mạng lưới tổ chức và nhiệm vụ của các trường đại học;

Căn cứ Chương 6 Điều lệ Trường Đại học ban hành kèm theo Quyết định số 58/2010/QĐ-TTg ngày 22 tháng 9 năm 2010 của Thủ tướng Chính phủ;

Căn cứ Thông tư số 10/2009/TT-BGDĐT ngày 07/5/2009 của Bộ Giáo dục và Đào tạo về việc Ban hành Quy chế đào tạo trình độ tiến sĩ;

Căn cứ Thông tư số 05/2012/TT-BGDĐT ngày 15/02/2012 của Bộ Giáo dục và Đào tạo về việc sửa đổi, bổ sung một số điều của Quy chế đào tạo trình độ tiến sĩ ban hành kèm theo Thông tư số 10/2009/TT-BGDĐT ngày 07/5/2009 của Bộ trưởng Bộ Giáo dục và Đào tạo;

Xét nhu cầu công tác và khả năng cán bộ;

Xét đề nghị của Trưởng phòng Đào tạo,

QUYẾT ĐỊNH

Điều 1: Giao đề tài luận án tiến sĩ và người hướng dẫn cho:

Nghiên cứu sinh : **Nguyễn Vĩnh Phối**

Ngành : Kỹ thuật cơ khí

Khoá: 2014 - 2017

Tên luận án : **Nghiên cứu các thông số của lớp mạ phủ hai lớp ảnh hưởng đến độ bền mỏi của chi tiết máy dạng trục**

Người HD thứ nhất (HD chính): **PGS.TS Lê Chí Cương**

Người HD thứ hai : **PGS.TS Đặng Thiện Ngôn**

Thời gian thực hiện : **06/10/2014 đến 06/10/2017**

Điều 2: Giao cho Phòng Đào tạo quản lý, thực hiện theo đúng Quy chế đào tạo trình độ tiến sĩ của Bộ Giáo dục & Đào tạo đã ban hành.

Điều 3: - Trưởng các đơn vị và các Ông (Bà) có tên ở Điều 1 chịu trách nhiệm thi hành quyết định này.

- Quyết định có hiệu lực kể từ ngày ký.

Nơi nhận:

- BGH (để biết);
- Như điều 2, 3;
- Lưu P.ĐT



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

Số: 16/4-QĐ-ĐHSPKT

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM
Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

Tp. Hồ Chí Minh, ngày 30 tháng 8 năm 2019

QUYẾT ĐỊNH

Về việc bổ sung hoặc thay đổi người hướng dẫn NCS khóa 2013 HIỆU TRƯỞNG TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT TP. HỒ CHÍ MINH

Căn cứ Quyết định số 426/TTg ngày 27 tháng 10 năm 1976 của Thủ tướng Chính phủ về một số vấn đề cấp bách trong mạng lưới các trường đại học và Quyết định số 118/2000/QĐ-TTg ngày 10 tháng 10 năm 2000 của Thủ tướng Chính phủ về việc tổ chức lại Đại học Quốc gia Thành Phố Hồ Chí Minh, tách Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh trực thuộc Bộ Giáo dục và Đào tạo;

Căn cứ Quyết định số 70/2014/QĐ-TTg ngày 10 tháng 12 năm 2014 của Thủ tướng Chính phủ về việc ban hành Điều lệ trường Đại học;

Căn cứ Quyết định số 937/QĐ-TTg ngày 30 tháng 6 năm 2017 về việc phê duyệt đề án thí điểm đổi mới cơ chế hoạt động của Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. Hồ Chí Minh;

Căn cứ Thông tư số 10/2009/TT-BGDĐT ngày 07/5/2009 của Bộ Giáo dục và Đào tạo về việc Ban hành Quy chế đào tạo trình độ tiến sĩ;

Căn cứ Thông tư số 05/2012/TT-BGDĐT ngày 15/02/2012 của Bộ Giáo dục và Đào tạo về việc sửa đổi, bổ sung một số điều của Quy chế đào tạo trình độ tiến sĩ ban hành kèm theo Thông tư số 10/2009/TT-BGDĐT ngày 07/5/2009 của Bộ trưởng Bộ Giáo dục và Đào tạo;

Xét nhu cầu công tác và khả năng cán bộ;

Xét đề nghị NCS và của Trưởng phòng Đào tạo,

QUYẾT ĐỊNH

Điều 1: Thay đổi người hướng dẫn thứ nhất (hướng dẫn chính) cho:

Nghiên cứu sinh : **Nguyễn Vĩnh Phối**

Ngành : Kỹ thuật cơ khí

Khoá: **2014 - 2017**

Tên luận án : **Nghiên cứu ảnh hưởng của lớp phủ bề mặt đến độ bền mỏi của chi tiết máy dạng trục**

Người HD thứ nhất (HD chính): **PGS.TS Đặng Thiện Ngôn**

Người HD thứ hai : **PGS.TS Lê Chí Cương**

Thời gian thực hiện : **06/10/2014 đến 06/10/2017**

Điều 2: Giao cho Phòng Đào tạo quản lý, thực hiện theo đúng Quy chế đào tạo trình độ tiến sĩ của Bộ Giáo dục & Đào tạo đã ban hành.

Điều 3: Trưởng các đơn vị: phòng Đào tạo, khoa quản ngành, phòng KHTC và các Ông (Bà) có tên ở Điều 1 chịu trách nhiệm thi hành quyết định này. Quyết định có hiệu lực kể từ ngày ký.

Nơi nhận:

- BGH (để chỉ đạo);
- Như điều 3;
- Lưu: VT, ĐHT (2b).



TÓM TẮT LÝ LỊCH TRÍCH NGANG

-- ☞ 📖 ☞ --

I. LÝ LỊCH SƠ LƯỢC

Họ và tên : Nguyễn Vĩnh Phôi Giới tính: Nam
Ngày tháng năm sinh : 15/09/1984 Nơi sinh: Quảng Ngãi
Quê quán : Quảng Ngãi Dân tộc: Kinh
Chỗ ở riêng hoặc địa chỉ liên hệ: Thị Trấn Chợ Chùa, Nghĩa Hành, Quảng Ngãi
Điện thoại cơ quan :
Điện thoại nhà riêng : 0918162283
E-mail : vinhphoi@gmail.com

II. QUÁ TRÌNH ĐÀO TẠO

1. Đại học

- Hệ đào tạo: chính quy
- Thời gian đào tạo từ 2002 đến 2007
- Nơi học (trường, thành phố): Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. HCM
- Ngành học: Kỹ thuật Công nghiệp
- Tên đồ án: Tính toán, thiết kế máy mài gạch Terrazzo

2. Cao học

- Hệ đào tạo: chính quy
- Thời gian đào tạo từ 2007 đến 2009
- Nơi học (trường, thành phố): Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. HCM
- Ngành học: Công nghệ Chế tạo máy
- Tên luận văn: Khảo sát sự ảnh hưởng của tính đẳng hướng đến hàm hấp thụ tổng quát trong quá trình đo ứng suất dùng nhiễu xạ X-quang

III. QUÁ TRÌNH CÔNG TÁC CHUYÊN MÔN KÊ TỪ KHI TỐT NGHIỆP ĐẠI HỌC

Thời gian	Nơi công tác	Công việc đảm nhiệm
2007 - nay	Trường ĐH Phạm Văn Đồng (Quảng Ngãi)	Giảng viên

LỜI CAM ĐOAN

Tôi cam đoan đây là công trình nghiên cứu của tôi. Các số liệu, kết quả nêu trong luận án là trung thực và chưa từng được ai công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

Tp. Hồ Chí Minh, ngày 15 tháng 06 năm 2021

Tác giả luận án

Nguyễn Vĩnh Phối

LỜI CẢM ƠN

Tôi xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đến PGS. TS. Đặng Thiện Ngôn và PGS. TS. Lê Chí Cường - Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp. HCM đã tận tình hướng dẫn và giúp đỡ để tôi hoàn thiện luận án này.

Tôi cũng chân thành cảm ơn Nhóm nghiên cứu trọng điểm Cơ khí và Môi Trường (REME Lab); phòng thí nghiệm Vật liệu trường ĐH Sư phạm Kỹ thuật Tp. HCM; Trung tâm Hạt Nhân Tp. HCM; Trung tâm Đào Tạo khu Công nghệ Cao Tp. HCM; Phòng thí nghiệm Đo Lường trường ĐH Công Nghiệp Tp. HCM; Công ty tư vấn kiểm định Hưng Thịnh Tp. HCM; Công ty Vivablast Việt Nam đã hỗ trợ về mặt thiết bị trong quá trình thực hiện luận án.

Tôi xin chân thành cảm ơn các thầy, cô thuộc Khoa Kỹ thuật - Công nghệ và Ban Giám hiệu trường Đại học Phạm Văn Đồng đã tạo điều kiện giúp đỡ, góp ý và động viên trong quá trình thực hiện luận án.

Sau cùng, tôi xin cảm ơn gia đình đã luôn ở bên cạnh và động viên trong suốt thời gian qua để tôi hoàn thành tốt công việc nghiên cứu khoa học của mình.

Tác giả

Nguyễn Vĩnh Phối

TÓM TẮT

Công nghệ mạ phủ bằng crôm cứng và phun phủ nhiệt khí tốc độ cao (High Velocity Oxy Fuel - HVOF) là các công nghệ mạ phủ đang được sử dụng rộng rãi trong công nghiệp. Tính chất của các lớp phủ đã và đang được nghiên cứu nhưng ảnh hưởng của chúng đến độ bền mỏi của chi tiết khi chiều dày lớp phủ thay đổi chưa được nghiên cứu sâu. Ngoài ra, khả năng thay thế công nghệ mạ crôm cứng, một trong các công nghệ gây ra ô nhiễm môi trường và ảnh hưởng xấu đến sức khỏe của người vận hành hệ thống mạ, bằng công nghệ HVOF sử dụng vật liệu phủ carbide vonfram cũng đang là hướng nghiên cứu đang được quan tâm. Từ các định hướng trên, nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng đến đặc tính mỏi của chi tiết trục được làm từ thép C45 phủ carbide vonfram và mạ crôm cứng dựa trên các tiêu chí: ứng suất dư, vết nứt tế vi, chiều dày lớp phủ đã được triển khai. Từ đó, các nội dung chính trong luận án đã tập trung nghiên cứu và giải quyết các nhiệm vụ cụ thể sau:

- Khảo sát các tính chất bên trong của lớp mạ crôm và phủ carbide vonfram: trường ứng suất dư, mật độ vết nứt tế vi,... ứng với các chiều dày khác nhau;
- Đánh giá ảnh hưởng của chiều dày lớp mạ crôm, lớp phủ carbide vonfram đến độ bền mỏi trên nền thép C45 đã được nhiệt luyện;
- Thiết lập mô hình toán đường cong mỏi và phương trình mỏi ứng với các chiều dày mạ phủ khác nhau cho lớp mạ crôm và lớp phủ carbide vonfram;
- So sánh, đánh giá, dự đoán độ bền mỏi của chi tiết trục được chế tạo trên nền thép C45 ứng với các chiều dày mạ phủ crôm cứng, carbide vonfram khác nhau.

Với lớp phủ mạ crôm cứng, kết quả nghiên cứu cho thấy ứng suất dư kéo luôn tồn tại trong lớp mạ crôm. Giá trị ứng suất dư giảm dần từ bề mặt lớp phủ đến bề mặt chi tiết nền thép C45. Chiều dày lớp phủ càng tăng thì độ bền mỏi giảm càng mạnh so với chi tiết nền, giá trị giảm tương ứng với chiều dày lớp phủ 10/30/60/90 μm là 2,3/6,97/9,3/11,62%. Nguyên nhân quan trọng gây giảm độ bền mỏi của lớp phủ crôm là mặc dù ứng suất dư kéo có xu hướng giảm theo chiều dày lớp mạ nhưng mật độ vết nứt tế vi lại tăng. Chính lý do này đã gây ra giảm độ bền mỏi. Kết

quả chụp mặt gãy mõi (SEM) cũng đã chứng tỏ các vết nứt mõi xuất phát từ vết nứt tế vi của lớp mạ crôm.

Với lớp phủ carbide vonfram, ứng suất dư nén luôn tồn tại trong lớp phủ. Đây là kết quả của sự va chạm của các hạt cứng WC với nền thép và do hệ số giãn nở nhiệt của lớp phủ nhỏ hơn hệ số giãn nở nhiệt của vật liệu nền nên sẽ tạo ra ứng suất nén. Khi tăng chiều dày lớp phủ, ứng suất nén có xu hướng tăng lên và khi khảo sát trường ứng suất dư cũng cho thấy ứng suất dư nén tăng dần từ bề mặt đến lớp tiếp giáp với vật liệu nền thép C45. Nguyên nhân là trước khi phủ, vật liệu nền được phun bi tạo độ nhám nhằm tăng độ bám dính với hạt Al_2O_3 tạo nên biến dạng dẻo bề mặt nền và sinh ra ứng suất dư nén. Kết quả nghiên cứu cho thấy, độ bền mõi của lớp phủ tăng theo chiều dày và giá trị tăng tương ứng với chiều dày lớp phủ 30/60/90 μm là 4,65/6,97/10,46% so với nền thép.

ABSTRACT

Hard chrome plating technology and High Velocity Oxy Fuel (HVOF) method have long been studied and applied in industry. The properties of the coating layers have been studied but their effect on the fatigue strength of machine part has not been studied when the coating thickness changes. In addition, the HVOF technology using tungsten carbide coating material is recommended to replace hard chrome plating. Because it is one of the technologies which causes environmental pollution and harmful affecting the operators' health of the plating system. Thus, the study on the fatigue behavior of shafts using AISI 1045 steel which are coated tungsten carbide and hard chromium based on the residual stress, microcracks and coating thickness has been performed. Therefore, this thesis has focused on researching specific tasks:

- Investigating the properties of chromium plating and tungsten carbide coating such as residual stress gradient, microcrack density, ect. depend on different coating thicknesses.
- Assessing the effect of chromium coating thickness and tungsten carbide coating thickness on fatigue life of AISI 1045 steel applying heat treatment process.
- Deriving equation model of rotating bending fatigue and fatigue equation for chromium plating and tungsten carbide with different coating thicknesses.
- Comparing, assessing and predicting fatigue strength of tungsten carbide layer to hard chrome plating on AISI 1045 steel.

For the hard chrome plating, the results show that the tensile residual stress exists in chromium plating. The residual stress decreases from the surface of coating layer to substrate. The fatigue strength of coating sample decreases when compared to the substrate with 10 μm , 30 μm , 60 μm and 90 μm thickness are 2,3%; 6,97%; 9.3% and 11,62%, respectively. The main cause of the chromium coating's fatigue strength reduction is that the tensile residual stress tend to decrease with the coating thickness but the microcracks density increases. It is the reason to reduce fatigue

strength. The fracture surfaces show that the cracks generate from hard chrome layer and propagate into the substrate during the cyclic loading.

For the tungsten carbide coating, compressive residual stress always exists in the coating layer. The impaction of hard particles WC and substrate, the thermal expansion coefficient of the coating is smaller than that of the substrate which creates compressive stress. As the coating thickness increases, the compressive residual stress tends to increase. The residual stress gradient shows that the residual stress increased from the surface coating layer to the substrate. The reason is that the substrate roughness induced by grit blasting using Al_2O_3 particles before coating process and compressive stress were formed in substrate surface. The fatigue strength of coating sample increase when compared to the substrate with 30 μm , 60 μm and 90 μm thickness are 4,65%; 6,97% and 10,46%, respectively.

MỤC LỤC



	TRANG
Trang tựa	
Quyết định giao đề tài	
Lý lịch cá nhân	i
Lời cam đoan	ii
Cảm tạ	iii
Tóm tắt	iv
Mục lục	viii
Danh mục các ký hiệu	xii
Danh mục các chữ viết tắt	xv
Danh mục các hình	xvi
Danh mục các bảng	xxii
Mở đầu	1
Chương 1 – Tổng quan	9
1.1. Khái quát về hiện tượng môi	9
1.1.1. Khái niệm	9
1.1.2. Bản chất	9
1.1.3. Đặc điểm của bề mặt gãy môi	10
1.2. Mạ điện	11
1.3. Phun phủ HVOF	13
1.3.1. Lớp phủ bảo vệ chống ăn mòn	16
1.3.2. Lớp phủ chức năng	16
1.3.3. Lớp phủ phục hồi mài mòn	16
1.4. Thực trạng nghiên cứu về môi ở Việt Nam	18
1.5. Tình hình nghiên cứu trong và ngoài nước	18
1.5.1. Các nghiên cứu của nước ngoài	18
1.5.2. Các nghiên cứu trong nước	30
1.6. Các tồn tại và định hướng nghiên cứu	31

1.6.1. Các tồn tại.....	31
1.6.2. Định hướng nghiên cứu.....	32
Chương 2 – Cơ sở lý thuyết.....	33
2.1. Lý thuyết môi và những khái niệm.....	33
2.1.1. Hiện tượng môi	33
2.1.2. Giới hạn môi.....	33
2.1.3. Đường cong môi.....	34
2.1.4. Những yếu tố ảnh hưởng đến độ bền môi	39
2.1.5. Những chỉ tiêu phá hủy môi	43
2.2. Độ bám dính và phương pháp đánh giá	46
2.3. Độ bền môi và phương pháp đánh giá.....	47
2.4. Nguyên lý mạ và tính chất của lớp phủ crôm.....	48
2.4.1. Nguyên lý của quá trình mạ crôm	48
2.4.2. Tính chất của lớp mạ crôm.....	50
2.5. Phun phủ HVOF	50
2.5.1. Lý thuyết về sự hình thành lớp phủ.....	50
2.5.2. Tính chất của lớp phủ.....	53
2.6. Nhiễu xạ tia X và ứng dụng đo ứng suất dư	58
2.6.1. Hiện tượng nhiễu xạ tia X	58
2.6.2. Định luật Bragg và điều kiện nhiễu xạ.....	58
2.6.3. Các yếu tố ảnh hưởng đến cường độ nhiễu xạ LPA.....	60
2.6.4. Chiều sâu xuyên qua của tia X.....	61
2.6.5. Tính ứng suất.....	62
Chương 3 – Vật liệu - thiết bị và phương pháp thí nghiệm	68
3.1. Vật liệu thí nghiệm	68
3.1.1. Vật liệu nền	68
3.1.2. Vật liệu crôm cứng	69
3.1.3. Vật liệu carbide vonfram.....	69
3.2. Thiết bị phục vụ thực nghiệm.....	70

3.2.1. Lò nung nhiệt	70
3.2.2. Máy quang phổ xác định thành phần vật liệu	73
3.2.3. Máy đo độ nhám.....	73
3.2.4. Máy đo độ cứng HRC	74
3.2.5. Máy đo độ cứng HV	75
3.2.6. Máy đo độ bền kéo - nén	76
3.2.7. Máy đo chiều dày lớp phủ.....	76
3.2.8. Thiết bị đánh giá tổ chức tế vi lớp phủ.....	77
3.2.9. Máy nhiễu xạ tia X	78
3.2.10. Máy thí nghiệm mỏi uốn 4 điểm MU-2016	79
3.2.11. Kính hiển vi điện tử quét.....	80
3.3. Nghiên cứu đề xuất kết cấu và quy trình chế tạo chi tiết mẫu.....	82
3.3.1. Kết cấu chi tiết mẫu.....	82
3.3.2. Quy trình chế tạo chi tiết mẫu	83
3.4. Thiết kế thí nghiệm theo phương pháp quy hoạch thực nghiệm	84
3.4.1. Lựa chọn số lần thí nghiệm	84
3.4.2. Quá trình thí nghiệm mỏi	85
3.5. Phân tích, xác định chiều dày mạ phủ	87
3.6. Quy trình mạ crôm và phủ carbide vonfram.....	90
3.6.1. Quy trình mạ crôm	90
3.6.2. Quy trình phủ HVOF.....	92
Chương 4 – Kết quả nghiên cứu lý thuyết	94
4.1. Mô hình toán đường cong mỏi cho chi tiết dạng trục	94
4.1.1. Sơ đồ mô hình thí nghiệm mỏi.....	94
4.1.2. Mô hình toán đường cong mỏi cho chi tiết dạng trục	96
4.2. Hàm hấp thụ tia X trong quá trình đo ứng suất	100
4.2.1. Giới thiệu về hàm hấp thụ tia X	100
4.2.2. Phương pháp đo kiểu Ω và kiểu Ψ	100
4.3. Tính sai số cho ứng suất	106

Chương 5 – Kết quả nghiên cứu thực nghiệm và bàn luận	108
5.1. Nghiên cứu đề xuất quy trình xử lý nhiệt cho chi tiết mẫu	108
5.1.1. Xử lý thớ	108
5.1.2. Tôi và ram	113
5.1.3. Kết quả đo các thông số của mẫu	114
5.2. Ảnh hưởng của chiều dày lớp mạ crôm đến độ bền mỏi.....	115
5.2.1. Kết quả đo thông số lớp mạ crôm	115
5.2.2. Ứng suất dư của lớp mạ crôm	118
5.2.3. Ảnh hưởng của lớp mạ crôm đến độ bền mỏi.....	132
5.3. Ảnh hưởng của lớp phủ carbide vonfram đến độ bền mỏi	140
5.3.1. Kết quả đo thông số lớp phủ	140
5.3.2. Tính toán ứng suất dư của lớp phủ carbide vonfram	144
5.3.3. Ảnh hưởng của lớp phủ carbide vonfram đến độ bền mỏi.....	154
5.4. Đánh giá ảnh hưởng của lớp mạ crôm và lớp phủ carbide vonfram đến độ bền mỏi và khả năng ứng dụng.....	160
5.4.1. So sánh ảnh hưởng của các lớp phủ đến độ bền mỏi	160
5.4.2. Khả năng ứng dụng của lớp mạ crôm và lớp phủ carbide vonfram.	161
Kết luận – Kiến nghị	164
1. Kết luận.....	164
2. Kiến nghị	165
Tài liệu tham khảo	166
Danh mục các công trình đã công bố	
Phụ lục	

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU

σ_{\max}	Ứng suất lớn nhất
σ_{\min}	Ứng suất nhỏ nhất
σ_m	Ứng suất trung bình
σ_{xx}	Ứng suất theo phương x
σ_{yy}	Ứng suất theo phương y
N_0	Số chu trình ứng suất cơ sở
σ	Ứng suất
N	Chu kỳ
C	Hằng số
m	Hệ số mũ
$\sigma_{ch} = \sigma_y$	Giới hạn chảy
$\sigma_{0.2}$	Giới hạn chảy của vật liệu ứng với biến dạng 0.2%
$\sigma_{-1} = \sigma_r = \sigma_F$	Giới hạn bền mỏi
k	Hằng số
B	Hằng số
σ_a	Biên độ ứng suất
τ_a	Biên độ ứng suất tiếp
τ_{-1}	Giới hạn bền mỏi xoắn
r	Hệ số tính chất chu trình
K_F	Hệ số ảnh hưởng tổng hợp ứng suất
h_0	Kích thước trung bình của hạt, mm
ε_σ	Hệ số ảnh hưởng của kích thước tuyệt đối (đối với ứng suất pháp)
ε_τ	Hệ số ảnh hưởng của kích thước tuyệt đối (đối với ứng suất tiếp)
σ_{rd}	Giới hạn bền mỏi của chi tiết có đường kính d
σ_{rd0}	Giới hạn bền mỏi của chi tiết có đường kính d_0
τ_{rd}	Giới hạn bền mỏi xoắn của chi tiết có đường kính d

τ_{rd0}	Giới hạn bền mỗi xoắn của chi tiết có đường kính d_0
α_σ	Hệ số tập trung ứng suất pháp lý thuyết
α_τ	Hệ số tập trung ứng suất tiếp lý thuyết
k_σ	Hệ số tập trung ứng suất pháp thực tế
k_τ	Hệ số tập trung ứng suất tiếp thực tế
F_n	Độ bền mỗi ứng với N chu kỳ.
S	Ứng suất ứng với N chu kỳ.
K_n	Số mũ của đường cong Wöhler.
e_p	Độ dẫn dài tương ứng với lúc phá hủy.
N_p	Số chu kỳ ứng suất ứng với lúc phá hủy.
k	Hệ số mũ ($\sim 0,01 \div 0,1$)
C_e	Hằng số.
K_{atb}	Cường độ ứng suất tới hạn
K_{ca}	Độ bền bám dính lớp phủ
σ_q	Ứng suất do tải
E_c	Mô đun đàn hồi của lớp phủ
α_c	Hệ số giãn nở nhiệt của lớp phủ
α_s	Hệ số giãn nở nhiệt của nền
T_m	Nhiệt độ nóng chảy của một lớp mỏng
T_s	Nhiệt độ của vật liệu nền
ϕ, ψ	Góc phương vị và góc cực của hướng đo trong hệ tọa độ mẫu
λ	Bước sóng chùm tia X
d_{hkl}	Khoảng cách giữa các mặt phẳng nguyên tử (hkl)
d_0	Khoảng cách giữa các mặt phẳng nguyên tử trước khi biến dạng
d	Khoảng cách giữa các mặt phẳng nguyên tử khi biến dạng
$(\varepsilon'_{33})_{\phi, \psi}$	Biến dạng theo phương đo
τ	Chiều sâu thâm của tia X

μ	Hằng số hấp thu (phụ thuộc vào đặc tính của tia X và loại vật liệu mẫu đo)
a	Hệ số tính chất của vật liệu (phụ thuộc loại vật liệu)
b	Tỉ lệ thể tích phân năng lượng tia tới trên một đơn vị thể tích
ψ	Góc tạo bởi phương pháp tuyến của mẫu đo với phương pháp tuyến của họ mặt phẳng nguyên tử nhiễu xạ
ψ_0	Góc tạo bởi phương pháp tuyến của mẫu đo và tia tới X
η	Góc phân giác của tia tới và tia nhiễu xạ X
η_0	Góc tạo bởi phương pháp tuyến của họ mặt phẳng nhiễu xạ và tia tới
2θ	Góc nhiễu xạ
F_{ij}	Thông số hướng
C_{ijkl}	Ten xơ độ cứng đàn hồi hạng tư
S_{ijkl}	Ten xơ kết hợp đơn tinh thể hạng tư
$S_1, 1/2S_2$	Hằng số đàn hồi tia X (XEC) của vật liệu đẳng hướng
ν	Hệ số poisson
E	Mô đun đàn hồi của vật liệu
σ_u	Ứng suất uốn
σ_E	Ứng suất ứng với chu kỳ mỗi N
σ_T	Giới hạn bền kéo
σ'_f	Hệ số độ bền mỏi
$2N_f$	Số chu kỳ phá hủy
b	Hệ số mũ Basquin $b = -0,05 \div -0,12$

DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT

- HVOF - High Velocity Oxygen-Fuel
Phủ nhiệt khí tốc độ cao
- ISO - International Organization for Standardization
Tiêu chuẩn quốc tế
- VDA - Verband der Automobilindustrie
Hiệp hội công nghiệp ô tô Đức
- ANSI - American National Standards Institute
Viện tiêu chuẩn quốc gia Hoa kỳ
- JIS - Japanese Industrial Standards
Tiêu chuẩn công nghiệp Nhật bản
- JSME - The Japan Society of Mechanical Engineers
Hiệp hội kỹ sư cơ khí Nhật bản
- ASTM - American Society for Testing and Materials
Hiệp hội thí nghiệm và vật liệu Hoa kỳ
- ASM - American Society for Metals
Hiệp hội kim loại Hoa kỳ
- SEM - Scanning Electron Microscopy
Kính hiển vi điện tử quét

DANH MỤC CÁC HÌNH

HÌNH	TRANG
Hình 1.1. Bề mặt gây môi.....	11
Hình 1.2. Nguyên lý mạ điện	12
Hình 1.3. Mạ crôm trực khuỷu.....	13
Hình 1.4. Nguyên lý phun phủ HVOF	14
Hình 1.5. Một số chi tiết phủ bề mặt ứng dụng công nghệ HVOF	16
Hình 1.6. Phủ HVOF trực khuỷu	17
Hình 1.7. Miết bề mặt mạ crôm dùng dụng cụ kim cương	21
Hình 1.8. Ứng suất dư với các vật liệu phủ khác nhau	23
Hình 1.9. Ứng suất dư của vật liệu WC-10Co-4Cr	23
Hình 1.10. Ứng suất dư nén tăng theo chiều dày lớp phủ WC-12Co.....	24
Hình 1.11. Độ bền mỏi của lớp phủ WC-10Co-4Cr.....	25
Hình 1.12. Độ bền mỏi của lớp phủ WC-17Co tại ứng suất $S = 495$ MPa.....	27
Hình 1.13. Độ bền mỏi của lớp phủ WCCoCr và lớp mạ crôm cứng trên nền thép AISI 4340.....	27
Hình 1.14. Độ chống mòn của một số lớp phủ.....	28
Hình 1.15. Giới hạn mỏi của một số lớp phủ trên nền thép không gỉ 316	28
Hình 2.1. Sự tích lũy phá hủy mỏi ở kim loại	33
Hình 2.2. Chu trình ứng suất.....	35
Hình 2.3. Đường cong mỏi Wöhler	36
Hình 2.4. Đồ thị ứng suất giới hạn(đồ thị Smith).....	38

Hình 2.5. Đường cong thực nghiệm biểu diễn các biên độ giới hạn trên hệ tọa độ $\sigma_a - \sigma_m$	39
Hình 2.6. Những nơi tập trung ứng suất	42
Hình 2.7. Đường cong Wöhler trong hệ trục logarit	44
Hình 2.8. Xây dựng mối quan hệ giữa ứng suất và biến dạng dựa vào năng lượng.	45
Hình 2.9. Mũi đâm tại lớp tiếp giáp lớp phủ/nền	46
Hình 2.10. Vết lõm mũi đâm và đồ thị $\ln a - \ln p$	46
Hình 2.11. Các dạng mẫu thử nghiệm mỏi theo tiêu chuẩn ISO 1143-2010	48
Hình 2.12. Sơ đồ hệ mạ điện	49
Hình 2.13. Các giai đoạn quá trình phủ HVOF	51
Hình 2.14. Sơ đồ mặt cắt cấu trúc của lớp phun phủ nhiệt.....	54
Hình 2.15. Cấu trúc lớp phủ nhiệt.....	55
Hình 2.16. Ứng suất kéo do quá trình tôi.....	56
Hình 2.17. Ứng suất nén trong quá trình phủ	57
Hình 2.18. Định luật Bragg	59
Hình 2.19. Định nhiễu xạ có chỉ số Miller h, k, l , và góc nhiễu xạ 2θ	61
Hình 2.20. Hệ tọa độ thí nghiệm và hệ tọa độ mẫu.....	62
Hình 2.21. Trục tinh thể (C_i) và hướng của nó đối với hệ tọa độ mẫu (S_i) cùng hệ trục đo (L_i)	64
Hình 2.22. Đồ thị $d - \sin^2 \psi$	66
Hình 3.1. Mẫu kiểm tra thành phần vật liệu	68
Hình 3.2. Vật liệu WC-10Co-4Cr của hãng Orelikon Metco. Ltd. (Thụy sĩ)	70
Hình 3.3. Lò nung Thermal Electric Furnace (Nhật).....	71

Hình 3.4. <i>Đồ gá chi tiết mẫu khi xử lý nhiệt</i>	71
Hình 3.5. <i>Quá trình nhiệt luyện</i>	72
Hình 3.6. <i>Lò ram S-now Industrial Furnace (Trung Quốc)</i>	72
Hình 3.7. <i>Máy quang phổ GNR-F20 (Italia)</i>	73
Hình 3.8. <i>Máy đo độ nhám Mitutoyo SJ-301</i>	74
Hình 3.9. <i>Đo độ cứng trên máy Mitutoyo ATK-600</i>	74
Hình 3.10. <i>Đo độ cứng Vicker Meatall-HV5</i>	75
Hình 3.11. <i>Thiết bị đo độ bền kéo WEW-1000B (Trung Quốc)</i>	76
Hình 3.12. <i>Thiết bị đo chiều dày lớp phủ MiNiTest 600B-Elektrophysik</i>	77
Hình 3.13. <i>Đo chiều dày lớp mạ phủ</i>	77
Hình 3.14. <i>Kính hiển vi IMS 300</i>	78
Hình 3.15. <i>Máy nhiễu xạ tia X - X'Pert Pro</i>	79
Hình 3.16. <i>Máy thí nghiệm mỏi uốn 4 điểm MU-2016</i>	80
Hình 3.17. <i>Hệ thống SEM-S4800</i>	81
Hình 3.18. <i>Mẫu mạ phủ để chụp SEM</i>	81
Hình 3.19. <i>Bản vẽ thiết kế mẫu thí nghiệm mỏi theo tiêu chuẩn ISO 1143:2010</i>	82
Hình 3.20. <i>Bản vẽ thiết kế mẫu thử độ bền kéo</i>	83
Hình 3.21. <i>Quy trình chế tạo chi tiết mẫu phục vụ thực nghiệm</i>	84
Hình 3.22. <i>Đồ thị ứng suất biến dạng của vật liệu</i>	85
Hình 3.23. <i>Các bước lựa chọn ứng suất thí nghiệm</i>	86
Hình 3.24. <i>Mẫu trước và sau khi phủ</i>	90
Hình 3.25. <i>Sơ đồ quy trình mạ</i>	91
Hình 3.26. <i>Chi tiết mẫu sau khi mạ crôm</i>	91

Hình 3.27. Quy trình phủ HVOF	92
Hình 3.28. Quá trình phủ HVOF	93
Hình 3.29. Chi tiết mẫu sau khi phủ HVOF	93
Hình 4.1. Sơ đồ nguyên lý tạo môi uốn quay 4 điểm.....	94
Hình 4.2. Sơ đồ các lực tác dụng lên chi tiết mẫu.....	95
Hình 4.3. Đường cong môi được thành lập từ thực nghiệm	98
Hình 4.4. Phương pháp đo Ω	101
Hình 4.5a. Phương pháp đo Ψ	101
Hình 4.5b. Cố định η	102
Hình 4.5c. Cố định η_0	102
Hình 5.1. Mẫu trước khi xử lý thớ (phương cán)	109
Hình 5.2. Cấu trúc tế vi của thép C45 theo phương cán sau khi xử lý nhiệt theo qui trình thông dụng	110
Hình 5.3. Chế độ nhiệt xử lý thớ.....	111
Hình 5.4. Mẫu sau khi xử lý thớ	111
Hình 5.5. Chế độ nhiệt tạo hạt nhỏ và làm đồng đều hạt.....	112
Hình 5.6. Cấu trúc tế vi của mẫu sau qui trình xử lý nhiệt làm hạt nhỏ	113
Hình 5.7. Ảnh chụp cấu trúc tế vi của mẫu sau tôi và ram	113
Hình 5.8. Mẫu sau khi thử nghiệm kéo nén	114
Hình 5.9. Giao điểm (P_{σ}, a_c) giữa đường thẳng $\ln P - \ln d$ và $\ln P - \ln a$	117
Hình 5.10. Đường nhiễu xạ của vật liệu crôm	119
Hình 5.11. Nội suy đường cong Gauss cho lớp mạ crôm.....	121
Hình 5.12. Đồ thị $d - \sin^2 \psi$ của các mẫu mạ crôm	123

Hình 5.13. <i>Nội suy đường cong Gauss cho nền thép sau khi xả crôm</i>	125
Hình 5.14. <i>Đồ thị $d\text{-Sin}^2\psi$ của các mẫu nền thép</i>	128
Hình 5.15. <i>Mật độ vết nứt tế vi ứng với các chiều dày lớp crôm</i>	130
Hình 5.16. <i>Ảnh mật độ vết nứt tế vi chuyển thành ảnh trắng đen 8 bit</i>	131
Hình 5.17. <i>Trường ứng suất dư ứng với các chiều dày crôm</i>	132
Hình 5.18. <i>Biểu đồ đường cong mỏi thực nghiệm cho các chiều dày mạ crôm</i>	137
Hình 5.19. <i>Mẫu gãy mỏi mạ crôm (60 μm) tại ứng suất $\sigma = 450 \text{ MPa}$</i>	137
Hình 5.20. <i>Vết nứt tế vi trong lớp mạ crôm</i>	139
Hình 5.21. <i>Ảnh chụp SEM của lớp mạ crôm</i>	139
Hình 5.22. <i>Sự phát triển vết nứt mỏi của lớp mạ crôm</i>	140
Hình 5.23. <i>Đường nhiễu xạ của lớp phủ WC-10Co-4Cr</i>	141
Hình 5.24. <i>Cấu trúc tế vi của lớp phủ</i>	141
Hình 5.25. <i>Giao điểm (P_c, a_c) giữa đường thẳng $\ln P - \ln d$ và $\ln P - \ln a$</i>	143
Hình 5.26. <i>Đỉnh nhiễu xạ của pha WC tại mặt nhiễu xạ $\{201\}$</i>	144
Hình 5.27. <i>Nội suy đường cong Gauss cho lớp phủ carbide vonfram</i>	146
Hình 5.28. <i>Đồ thị $d\text{-Sin}^2\psi$ của các mẫu phủ carbide vonfram</i>	148
Hình 5.29. <i>Nội suy đường cong Gauss cho nền thép sau khi tách lớp carbide</i>	150
Hình 5.30. <i>Đồ thị $d\text{-Sin}^2\psi$ của các mẫu nền thép ứng với các chiều dày phủ</i>	152
Hình 5.31. <i>Phân bố ứng suất dư theo chiều dày lớp phủ carbide vonfram</i>	153
Hình 5.32. <i>Biểu đồ đường cong mỏi cho các chiều dày phủ carbide vonfram</i>	156
Hình 5.33. <i>Mẫu gãy mỏi phủ HVOF(60 μm) tại ứng suất $\sigma = 475 \text{ MPa}$</i>	156
Hình 5.34. <i>Ảnh chụp SEM của lớp phủ WC-10Co-4Cr khi chưa chịu tải</i>	158
Hình 5.35. <i>Ảnh chụp SEM của vết nứt trong lớp phủ WC-10Co-4Cr sau khi chịu tải</i>	

.....	158
Hình 5.36. <i>Sự phát triển vết nứt mỏi của lớp phủ WC-10Co-4Cr.....</i>	159
Hình 5.37. <i>Biểu đồ đường cong mỏi cho phương pháp mạ crôm và phủ HVOF ...</i>	160
Hình 5.38. <i>Giới hạn mỏi của phương pháp mạ crôm và phủ carbide vonfram</i>	161

DANH MỤC CÁC BẢNG

BẢNG	TRANG
Bảng 2.1. Số liệu N_0 của một số kim loại thường dùng	34
Bảng 2.2. Mối quan hệ giữa thành phần hóa học và đặc trưng cơ học của vật liệu.....	40
Bảng 3.1. Thành phần các nguyên tố của mẫu thép C45	69
Bảng 3.2. Các thành phần nguyên tố của carbide vonfram	70
Bảng 3.3. Thông số máy thí nghiệm môi uồn MU-2016.....	80
Bảng 3.4. Tỷ lệ chiều dày phủ/ đường kính mẫu (t/d)	87
Bảng 3.5. Chiều dày lớp crôm cứng cho các ứng dụng khác nhau	88
Bảng 3.6. Dung dịch mạ và chế độ mạ	90
Bảng 3.7. Thông số quá trình phun cát tạo nhám	92
Bảng 3.8. Thông số quá trình phủ HVOF.....	93
Bảng 4.1. Hàm hấp thu tia X cho phương pháp đo Ω và Ψ	105
Bảng 5.1. Chế độ ủ đề xuất cho xử lý thớ.....	110
Bảng 5.2. Chế độ thường hóa đề xuất cho xử lý thớ	111
Bảng 5.3. Bảng giá trị thực nghiệm độ bền kéo	114
Bảng 5.4. Kết quả đo độ nhám mẫu Ra (μm)	115
Bảng 5.5. Kết quả đo độ cứng của mẫu sau tôi.....	115
Bảng 5.6. Kết quả đo độ cứng của mẫu sau ram.....	115
Bảng 5.7. Bảng giá trị trung bình chiều dày mạ phủ	115
Bảng 5.8. Kết quả đo độ nhám mẫu Ra (μm)	116
Bảng 5.9. Kết quả đo độ cứng lớp crôm (HV)	116

Bảng 5.10. <i>Kết quả đo độ bám dính</i>	116
Bảng 5.11. <i>Điều kiện nhiễu xạ để đo ứng suất</i>	118
Bảng 5.12. <i>Khoảng cách mặt tinh thể d và góc $2\theta_{max}$</i>	121
Bảng 5.13. <i>Khoảng cách mặt tinh thể d và góc $2\theta_{max}$</i>	126
Bảng 5.14. <i>Bảng tổng hợp giá trị ứng suất dư các mẫu</i>	128
Bảng 5.15. <i>Mật độ vết nứt tế vi các mẫu</i>	131
Bảng 5.16. <i>Bảng số liệu kết quả thực nghiệm</i>	134
Bảng 5.17. <i>Thông số phương trình môi cho nền và mạ crôm</i>	136
Bảng 5.18. <i>Bảng giá trị trung bình chiều dày mạ phủ</i>	142
Bảng 5.19. <i>Kết quả đo độ nhám mẫu $Ra(\mu m)$</i>	142
Bảng 5.20. <i>Kết quả đo độ cứng lớp phủ carbide vonfram (HV)</i>	142
Bảng 5.21. <i>Kết quả đo độ bám dính</i>	142
Bảng 5.22. <i>Khoảng cách mặt tinh thể d và góc $2\theta_{max}$</i>	146
Bảng 5.23. <i>Khoảng cách mặt tinh thể d và góc $2\theta_{max}$</i>	150
Bảng 5.24. <i>Bảng tổng hợp đo ứng suất các mẫu</i>	152
Bảng 5.25. <i>Bảng số liệu kết quả thực nghiệm</i>	154
Bảng 5.26. <i>Thông số phương trình môi lớp phủ carbide vonfram</i>	155
Bảng 5.27. <i>So sánh giữa mạ crôm và phủ WC-10Co-4Cr</i>	162

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 hàn đắp ít được áp dụng vì chi tiết phải gia công lại sau hàn và bị biến dạng nhiệt nên cơ tính (độ bền, độ cứng,...) không còn bảo đảm như ban đầu. Phương pháp mạ phủ được nghiên cứu và ứng dụng khá rộng rãi, đặc biệt là trong các ngành ô tô, hàng không, thực phẩm, hóa dầu, tàu biển.... vì giúp tạo thành một lớp bề mặt phủ ngoài với các tính chất cơ học tốt hơn hẳn vật liệu nền ban đầu. 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 vận hành thiết bị mạ. Vì vậy, ở các nước tiên tiến trên thế giới đã triển khai nghiên cứu tìm kiếm những phương pháp phủ mới để dần thay thế cho phương pháp mạ crôm. Một trong những phương pháp tiên tiến hiện nay có khả năng thay thế cho mạ crôm là phương pháp phủ nhiệt khí tốc độ cao (High Velocity Oxygen Fuel - HVOF). Phương pháp HVOF có ưu điểm là độ xốp thấp, độ bền bám dính và độ cứng cao hơn so với phương pháp phun phủ nhiệt khác như phun hồ quang điện, phun plasma, phun khí cháy,... Tuy nhiên, một trở ngại lớn của phương pháp HVOF là giá thành khá cao so với mạ crôm. Với lý do trên, hiện nay ở nước ta vẫn dùng phương pháp mạ crôm là chủ yếu và một số cơ sở đã bắt đầu nghiên cứu ứng dụng phương pháp HVOF để đáp ứng các tiêu chí về môi trường. 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 (sau mạ phủ) 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]. Khi số chu kỳ làm việc của chi tiết tăng lên thì các vết nứt này cũng mở rộng dần và cuối cùng xảy ra gãy hỏng [1]. Điều này cho thấy chất lượng bề mặt của chi tiết máy đóng một vai trò quan trọng, trong đó sự tồn tại của vết nứt tế vi trên bề mặt là một trong các yếu tố chính ảnh hưởng đến độ bền mỏi, quyết định đến tuổi thọ và độ tin cậy trong quá trình làm việc của chúng [1]. Và thực tiễn đã cho thấy, khoảng 90% các tổn thất của chi tiết (gãy, phá hủy) là do các vết nứt mỏi gây ra [2]. Vì thế, việc phân tích - đánh giá khả năng làm việc của lớp phủ bề mặt qua thông số độ bền mỏi có ý nghĩa quan trọng giúp dự đoán tuổi thọ chi tiết để có cơ sở xây dựng kế hoạch sản xuất, kế hoạch bảo trì. 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 được 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 phủ 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 dẫn 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 phun phủ tiên tiến, có 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, ứng dụng 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 mài đối với 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);
 - + Carbide vonfram (WC-10Co-4Cr) (phun phủ HVOF).
- Chiều dày lớp phủ: 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; quy 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

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

- **Nội dung 1:** *Nghiên cứu tổng quan về công nghệ, kỹ thuật chế tạo chi tiết máy dạng trục có mạ phủ.*
- **Nội dung 2:** *Nghiên cứu đề xuất kết cấu, kích thước và quy trình chế tạo chi tiết mẫu, mô hình toán đường cong mài. Thiết lập hàm hấp thụ tia X và cách tính sai số đo ứng suất dư.*

Các nội dung chính được khảo sát đến gồm:

- Nghiên cứu quy trình xử lý thô và làm đồng đều hạt, quy trình nhiệt luyện cho chi tiết dạng trục chế tạo từ thép C45;
- Đề xuất chi tiết mẫu thí nghiệm mài theo tiêu chuẩn ISO;
- Đánh giá các thông số thành phần vật liệu, cơ tính, chất lượng bề mặt của chi tiết mẫu.

- Thiết lập mô hình toán đường cong mài và thiết kế thí nghiệm dựa trên lý thuyết quy hoạch thực nghiệm.

- Xây dựng hàm hấp thụ tia X để hiệu chỉnh đường nhiễu xạ và cách tính sai số khi đo ứng suất dư bằng nhiễu xạ tia X.

• **Nội dung 3:** *Nghiên cứu ảnh hưởng của chiều dày lớp mạ crôm đến độ bền mỏi của chi tiết máy dạng trục*

Các nội dung chính được khảo sát đến gồm:

- Tìm hiểu các tính chất của lớp mạ crôm và đề xuất chiều dày mạ phù;
- Nghiên cứu quy trình mạ crôm cứng cho chi tiết dạng trục;
- Thực hiện chế tạo chi tiết mẫu mạ crôm cứng với các chiều dày khác nhau;
- Đánh giá chất lượng bề mặt và khảo sát mật độ vết nứt tế vi lớp mạ crôm;
- Tiến hành đo nhiễu xạ tia X và tính toán ứng suất dư cho lớp mạ crôm và chi tiết nền C45;

- Tiến hành thí nghiệm mỏi lấy số liệu tải trọng, số chu kỳ mỏi để phân tích và đánh giá ảnh hưởng của chiều dày lớp mạ crôm đến độ bền mỏi của chi tiết máy dạng trục.

- Đánh giá bề mặt gãy mỏi của lớp mạ crôm bằng kính hiển vi điện tử quét.

• **Nội dung 4:** *Nghiên cứu, đánh giá ảnh hưởng của lớp phủ carbide vonfram (WC-10Co-4Cr) đến độ bền mỏi của chi tiết máy dạng trục*

Các nội dung chính được khảo sát đến gồm:

- Tìm hiểu các tính chất của carbide vonfram;
- Nghiên cứu quy trình phủ carbide vonfram cho chi tiết dạng trục;
- Thực hiện chế tạo chi tiết mẫu phủ carbide vonfram với các chiều dày khác nhau;

- Đánh giá chất lượng bề mặt lớp phủ;
- Tiến hành đo nhiễu xạ tia X và tính toán ứng suất dư cho lớp phủ carbide vonfram và chi tiết nền sau khi phủ;

- Tiến hành thí nghiệm mỏi lấy số liệu tải trọng, số chu kỳ mỏi để phân tích và đánh giá ảnh hưởng của chiều dày lớp phủ carbide vonfram đến độ bền mỏi của

chi tiết máy dạng trục.

- Đánh giá bề mặt gây mòn của lớp phủ carbide vonfram bằng kính hiển vi điện tử quét.

- 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

5.2.1 Phương pháp kế thừa

Kế thừa các công trình, kết quả nghiên cứu đã công bố của các tác giả trong và ngoài nước về lĩnh vực nghiên cứu ảnh hưởng của lớp mạ phủ đến độ bền mỏi của chi tiết máy.

5.2.2 Phương pháp thu thập thông tin

Tiếp cận các tài liệu nghiên cứu, các thông tin cần thiết có liên quan đến đề tài có trên các tạp chí khoa học, tài liệu chuyên ngành, qua các nguồn tin từ internet... Tham khảo kỹ thuật phun phủ HVOF từ các chuyên gia và doanh nghiệp nước ngoài tại Việt Nam.

5.2.3 Phương pháp nghiên cứu thực nghiệm

Thực hiện tiến hành thực nghiệm một cách chủ động, để có thể tối thiểu hóa số thí nghiệm cần thiết mà vẫn đảm bảo mức tin cậy.

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 kỹ thuật mạ và phủ, đặc biệt là kỹ thuật HVOF ở trong và ngoài nước, các nghiên cứu về mỏi của lớp màng mỏng. 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 trong phạm vi của đề tài.

- 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 mỏi cho từng phương pháp phủ ứng với các chiều dày khác nhau nhằm xác định được phương pháp phủ và chiều dày phủ hợp lý.

7. Các đóng góp mới của luận án

- Đề xuất quy trình xử lý thớ và làm đồng đều hạt tinh thể cho thép C45 để chế tạo chi tiết mẫu phục vụ cho quá trình thí nghiệm mỏi.
- Xây dựng được hàm hấp thụ tia X tổng quát để hiệu chỉnh chính xác 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 mỏi 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, 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
Giới thiệu tính cấp thiết, nhu cầu từ thực tế và cơ sở lựa chọn đề tài, nội dung, phương pháp nghiên cứu, ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài.
- Chương 1: Tổng quan
Trình bày các nội dung liên quan đến độ bền mỏi. Các phương pháp xử lý bề mặt cũng được giới thiệu. Ngoài ra, các tồn tại của các công trình nghiên cứu trong và ngoài nước cũng được phân tích, đánh giá để xác định hướng nghiên cứu.
- Chương 2: Cơ sở lý thuyết
Trình bày lý thuyết về phá hủy mỏi, các yếu tố ảnh hưởng đến độ bền mỏi. Bên cạnh đó, một số tính chất của lớp mạ crôm và lớp phủ carbide vonfram cũng được trình bày trong chương này. Ngoài ra, lý thuyết về tính toán ứng suất dư dùng phương pháp nhiễu xạ tia X cũng được đề cập.
- Chương 3: Vật liệu - thiết bị và phương pháp thí nghiệm
Trình bày về vật liệu chế tạo mẫu, các thiết bị được sử dụng trong quá trình nghiên cứu, nghiên cứu đề xuất kết cấu và quy trình chế tạo chi tiết mẫu. Thiết kế thí nghiệm theo phương pháp quy hoạch thực nghiệm. Phân tích, xác định chiều dày mạ phủ cũng được trình bày.
- Chương 4: Kết quả nghiên cứu lý thuyết
Trình bày mô hình toán đường cong mỏi uốn cho chi tiết dạng trục. Bên cạnh đó, việc tính toán hàm hấp thụ tia X và sai số đo ứng suất dư bằng phương pháp đo nhiễu xạ tia X cũng được đề cập.
- Chương 5: Kết quả nghiên cứu thực nghiệm và bàn luận
Trình bày, phân tích, đánh giá các kết quả nghiên cứu thực nghiệm.
- Kết luận và kiến nghị
Tổng hợp các kết quả đạt được của luận án và kiến nghị về đề xuất hướng nghiên cứu tiếp theo.
- Tài liệu tham khảo.
- Danh mục các công trình đã công bố của luận án.
- Phụ lục.

Chương 1

TỔNG QUAN

1.1 Khái quát về hiện tượng mỏi

Phá hủy do mỏi chiếm tỷ lệ lớn trong các hư hỏng trong các hệ thống công nghiệp cơ khí, ảnh hưởng lớn đến sự an toàn của hệ thống máy móc, hiệu quả sản xuất và sức khỏe con người. Do đó, quá trình mỏi đã được nghiên cứu mạnh mẽ hơn một thế kỷ nay. Nhiều nhà nghiên cứu về mỏi như Schutz [3], Toth và Yarema [4] đã cung cấp một cái nhìn sâu sắc về phá hủy mỏi ngay từ đầu kỷ nguyên công nghiệp. Phá hủy mỏi trong kim loại được nghiên cứu từ thế kỷ thứ mười tám và là ngành được chú trọng nghiên cứu về mỏi là công nghiệp khai thác khoáng sản.

Các nghiên cứu về mỏi được tiến hành trên các trục toa xe lửa sau khi xảy ra hiện tượng các trục toa xe bị gãy hàng loạt với nghi ngờ là do mỏi [1, 3, 4] đã mang lại kết quả thuyết phục. Sau đó, lĩnh vực nghiên cứu về mỏi đã dần dần phát triển đến các lĩnh vực khác nhau như cơ khí chế tạo máy, ô tô, hàng không, vũ trụ, xây dựng,.... giúp xác định các phá hủy do mỏi trong vật liệu. Các công trình nghiên cứu này đã cung cấp các kiến thức thiết thực giúp các kỹ sư, các nhà thiết kế,... sử dụng trong thiết kế và chế tạo để tránh phá hủy mỏi cho các chi tiết máy, công trình.

1.1.1 Khái niệm

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 ở mức tế vi, sau đó các vết nứt mỏi đó phát triển và dẫn tới sự phá hủy của vật liệu. Sự phá hủy như vậy được gọi là sự phá hủy vì mỏi.

1.1.2 Bản chất

Phần lớn các chi tiết máy làm việc trong trạng thái ứng suất thay đổi theo thời gian, nó có thể bị hỏng khi chịu ứng suất thấp hơn nhiều so với trường hợp ứng suất không thay đổi. Tiến hành quan sát chi tiết máy khi chịu ứng suất thay đổi người ta thấy những vết nứt tế vi bắt đầu xuất hiện tại vùng chi tiết máy chịu ứng suất tương đối

lớn và khi số chu kỳ làm việc tăng lên thì các vết nứt này cũng mở rộng dần. Điều này làm cho chi tiết máy ngày càng bị yếu và cuối cùng xảy ra gãy hỏng, đó chính là sự phá hủy do mỏi. Khả năng của vật liệu ngăn cản lại sự phá hủy do mỏi (còn gọi là phá hủy mỏi) được gọi là độ bền mỏi hay sức bền mỏi [1].

Qua các nghiên cứu về sự phá hủy mỏi của vật liệu, có thể rút ra những kết luận sau đây [1]:

- Sự phá hủy mỏi bao giờ cũng bắt đầu từ những vết nứt rất nhỏ (vết nứt tế vi), không nhìn thấy được bằng mắt thường. Các vết nứt này phát triển dần cùng với sự gia tăng số chu trình ứng suất, đến một lúc nào đó chi tiết máy sẽ bị gãy hỏng hoàn toàn.

- Vật thể có thể bị phá hủy khi trị số ứng suất lớn nhất σ_{\max} không những thấp hơn nhiều so với giới hạn bền mà thậm chí có thể thấp hơn giới hạn chảy của vật liệu, nếu như số lần thay đổi ứng suất (số chu kỳ ứng suất) lớn.

- Đối với một số loại vật liệu, có tồn tại một trị số ứng suất giới hạn tác dụng vào vật liệu với số chu kỳ rất lớn mà không phá hỏng vật liệu.

1.1.3 Đặc điểm của bề mặt gãy mỏi

Sự phá hủy mỏi xảy ra khi trị số ứng suất không lớn lắm, khi đó chi tiết máy bị hỏng có thể dưới dạng gãy đứt hoàn toàn hoặc có vết nứt lớn khiến chi tiết máy không thể làm việc được nữa. Vết nứt mỏi thường phát triển ngấm ngấm và rất khó phát hiện bằng mắt thường nhưng sau đó đột nhiên xảy ra sự phá hủy tại một hoặc một vài tiết diện nào đó của chi tiết. Tại tiết diện này các vết nứt phát triển sâu, làm giảm diện tích phần làm việc tới mức chi tiết không còn đủ khả năng chịu tải nữa.

Tóm lại quá trình hỏng vì mỏi xảy ra từ từ và theo trình tự như sau:

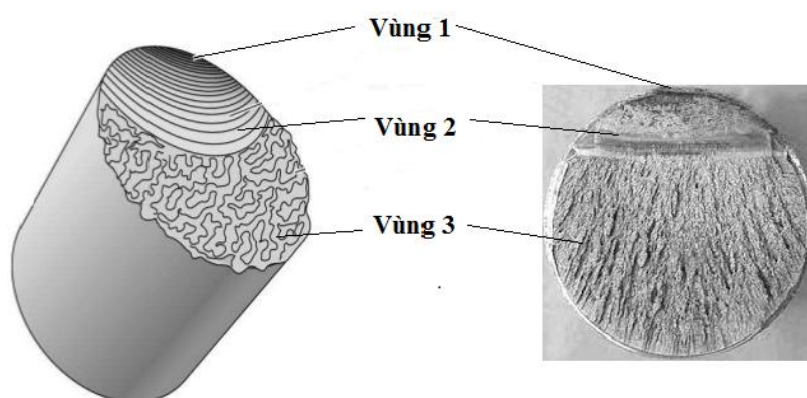
- Sau một số chu kỳ ứng suất nhất định, tại những chỗ có tập trung ứng suất trên chi tiết máy sẽ xuất hiện những vết nứt nhỏ.

- Vết nứt này phát triển lớn dần lên, làm giảm dần diện tích tiết diện chịu tải của chi tiết máy, do đó làm tăng giá trị ứng suất.

- Cho đến khi chi tiết máy không còn đủ sức bền mỏi thì nó bị phá hỏng.

Bề mặt phá hủy mỏi khác hẳn bề mặt phá hủy do tác dụng của tải trọng tĩnh. Đối với vật liệu dẻo, bề mặt phá hủy tĩnh có sự co thắt tại vùng bị phá hủy, còn đối với vật

liệu giòn thì bề mặt phá hủy tĩnh bằng phẳng và hầu như không có thay đổi hình dạng. Khi quan sát bề mặt phá hủy mỗi thấy rõ hai vùng (Hình 1.1): Vùng thứ nhất tương đối mịn, hạt nhỏ (giống như chỗ vỡ của mảnh sứ), đó là vùng các vết nứt mỗi dần dà phát triển. Vùng này được gọi là vùng hồng vì mỗi. Vùng thứ hai gồ ghề, có hạt to hoặc có các thớ. Vùng này được gọi là vùng hồng tĩnh. Tuy nhiên, cũng có trường hợp trên bề mặt gãy do mỗi thấy có ba vùng: (1) Vùng thứ nhất khá mịn, là vùng phát sinh và phát triển vết nứt với tốc độ chậm; (2) Vùng thứ hai thô hơn, tốc độ phát triển vết nứt trong vùng này nhanh hơn; (3) Vùng thứ ba gồ ghề là vùng hồng tĩnh.



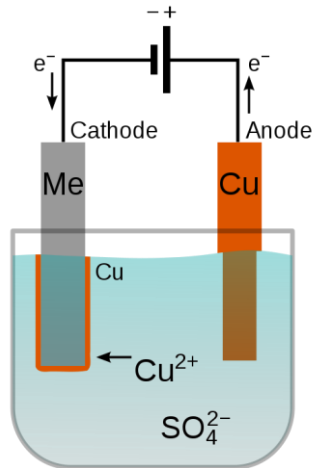
Hình 1.1. Bề mặt gãy mỗi

Xem xét hình dạng bề ngoài của vết gãy ta có thể biết được chi tiết máy đã làm việc quá tải nhiều hay ít. Nếu diện tích không hồng vì mỗi chiếm tỉ lệ lớn so với vùng hồng tĩnh, ta biết là chi tiết máy đã làm việc lâu dài với ứng suất lớn hơn giới hạn mỗi chút ít. Nếu diện tích vùng hồng tĩnh lớn, chi tiết máy rõ ràng đã chịu tải quá lớn trong thời gian ngắn với số chu kỳ ứng suất tương đối ít đã bị gãy hồng.

1.2 Mạ điện

Mạ điện được nhà hóa học Luigi V.Brugnatelli khai sinh vào năm 1805. Ông đã sử dụng thành quả của người đồng nghiệp Alessandro Volta là pin Volta để tạo ra lớp phủ điện hóa đầu tiên. Sau đó, mạ điện được nhiều nhà khoa học nghiên cứu và áp dụng rộng rãi trong cuộc sống. Nguyên lý của mạ điện thể hiện trên Hình 1.2. Vật cần mạ được gắn với cực âm cathode, kim loại mạ gắn với cực dương anode của nguồn điện trong dung dịch điện môi. Cực dương của nguồn điện sẽ hút các

electron trong quá trình ôxi hóa và giải phóng các ion kim loại dương, dưới tác dụng lực tĩnh điện các ion dương này sẽ di chuyển về cực âm, tại đây chúng nhận lại electron trong quá trình ôxi hóa khử hình thành lớp kim loại bám trên bề mặt của vật được mạ.



Hình 1.2. Nguyên lý mạ điện

Mục đích của mạ:

- Phục hồi chi tiết bị mài mòn
- Chống ăn mòn
- Phục hồi các mặt lắp ghép của chi tiết
- Tăng độ cứng
- Mạ trang sức và dụng cụ khác

Mạ vật liệu cứng là phương pháp kết tủa trên kim loại nền một lớp kim loại mỏng để chống sự ăn mòn, tăng độ cứng bề mặt, phục hồi chi tiết.... Hiện nay, công nghệ mạ được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực, đặc biệt là ngành cơ khí chế tạo máy. Có nhiều phương pháp mạ: mạ điện phân, mạ kim loại nóng, phun kim loại lạnh... Trong đó, mạ điện phân được áp dụng nhiều hơn cả.

Hiện nay, có nhiều vật liệu mạ được sử dụng rộng rãi ở nước ta và trên thế giới như mạ niken, kẽm, đồng... Trong đó, mạ crôm cứng được ứng dụng vào nhiều nhất với các mục đích trang trí - bảo vệ, tăng độ cứng, tăng độ bền mài mòn, độ bền hoá học, phục hồi các chi tiết máy đã bị mòn,... Lớp mạ crôm nhờ có lớp Cr_2O_3 trên bề mặt bền vững trong nhiều môi trường xâm thực, không bị ăn mòn trong khí

quyển và bền trong nhiều axit HCl.HNO₃ vì vậy có tính năng bảo vệ tốt. Ngoài ra, crôm còn có những tính chất sau:

- Crôm có độ cứng chỉ xếp sau kim cương và corundum (Al₂O₃);
- Chịu mài mòn, chịu ăn mòn;
- Độ ổn định hóa học cao, có thể chịu nhiệt đến 400-500°C.

Chính vì vậy mà lớp mạ crôm được đặc biệt ưu tiên sử dụng trong các chi tiết máy móc cơ khí với mục đích tăng cơ tính của bề mặt chi tiết, tăng độ chịu mài mòn cơ học. Các ứng dụng của lớp mạ crôm trải rộng trong nhiều ngành, nhiều lĩnh vực, từ các chi tiết chịu mài mòn, chịu ma sát như trục khuỷu (Hình 1.3), vòng bi, bánh răng, mũi khoan,... hay các chi tiết trong động cơ đốt trong như: piston, xilanh, trục quay,... cho đến các ứng dụng trong ngành công nghiệp hàng dệt phẩm, hóa chất, dầu khí, dệt may, in ấn, thực phẩm, hàng không, vũ trụ,....

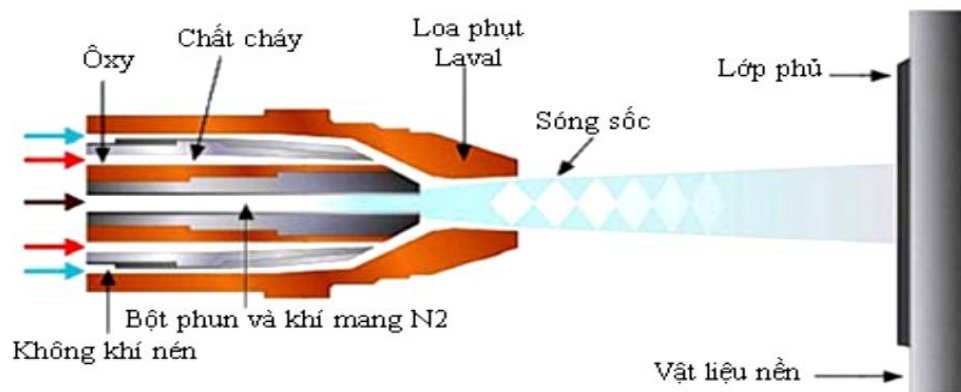


Hình 1.3. Mạ crôm trục khuỷu

Độ cứng của lớp mạ crôm cao có giá trị nằm trong khoảng 600-800 HV, tuy vậy trong nhiều trường hợp do những yêu cầu kỹ thuật đặc thù đòi hỏi vật liệu phải có độ cứng càng cao càng tốt. Vì vậy, hiện nay người ta đã tìm cách gia cường các hạt có độ cứng cao vào lớp mạ crôm để củng cố và tăng cường các ưu điểm vốn có của lớp mạ này. Việc gia cường các hạt có độ cứng cao như: TiN, TiO₂, Al₂O₃, kim cương... vào lớp mạ crôm để tạo thành lớp mạ crôm composit cũng, đã và đang nhận được sự quan tâm nghiên cứu trong và ngoài nước.

1.3 Phun phủ HVOF

Công nghệ phun phủ kim loại đã được Max Ulrich Schoop, một kỹ sư người Thụy Sĩ, phát minh ra từ những năm đầu của thế kỷ 20 [5]. Nguyên lý của công nghệ này được thể hiện trên Hình 1.4 là dùng nguồn nhiệt (hồ quang, khí cháy, plasma) làm nóng chảy kim loại hoặc hợp kim và được dòng không khí nén thổi mạnh làm phân tán thành các hạt rất nhỏ, bắn vào bề mặt chi tiết để tạo ra một lớp phủ kim loại có độ dày theo yêu cầu. Lúc đầu, phun phủ kim loại chỉ dùng cho mục đích trang trí và sau đó được ứng dụng nhiều trong các lĩnh vực như bảo vệ bề mặt, phục hồi, trang trí thay cho kim loại quý hiếm. Đến những năm 1980 phun phủ kim loại đã trở thành một lĩnh vực trong công nghệ xử lý bề mặt.



Hình 1.4. Nguyên lý phun phủ HVOF

Công nghệ phun kim loại ngày càng được quan tâm do có ý nghĩa quan trọng và quyết định đến tính chất của vật liệu lớp phủ vì nó tạo ra một lớp bề mặt có khả năng đáp ứng các điều kiện làm việc như chịu mài mòn, chống ăn mòn, chịu nhiệt,... Công nghệ phun phủ kim loại còn được sử dụng trong nhiều lĩnh vực với các mục đích khác nhau như:

- Bảo vệ chống gỉ, chống ăn mòn trong môi trường;
- Tạo ra lớp dẫn điện trên bề mặt không dẫn điện, dùng cho trang trí cho các công trình kỹ thuật;
- Phục hồi các chi tiết máy bị mài mòn;
- Sửa chữa khuyết tật cho vật đúc hoặc các khuyết tật xuất hiện khi gia công cơ khí, tiết kiệm được các kim loại quý hiếm;
- Cải thiện, tăng cường khả năng làm việc của chi tiết máy.

Hiện nay công nghệ phun phủ kim loại nói chung và phương pháp phun nhiệt khí nói riêng tuy còn rất mới so với các công nghệ bề mặt khác nhưng đã được nghiên cứu ứng dụng trong nhiều ngành công nghiệp, đặc biệt là trong cơ khí chế tạo máy, giao thông vận tải, dầu khí, hàng không... và đã trở thành một công nghệ không thể thiếu trong quá trình phục hồi chi tiết bị mài mòn.

Phun nhiệt khí tốc độ cao HVOF là phương pháp thích hợp để tạo lớp phủ với độ xốp thấp và độ bám dính cao, trong quá trình phun nhiệt khí tốc độ cao HVOF nhiên liệu và oxy được đưa vào buồng đốt cùng với phun bột tạo ra nhiệt độ và áp suất cao trong buồng thông qua các vòi phun tạo ra các dòng chảy siêu âm của khí. Nhiệt độ ngọn lửa nằm trong khoảng $2.500^{\circ}\text{C} - 3.100^{\circ}\text{C}$, phụ thuộc vào nhiên liệu, tỷ lệ nhiên liệu khí/oxy và áp suất khí và phụ thuộc vào thiết kế kết cấu súng phun của hệ thống phun nhiệt khí tốc độ cao HVOF [6,7]. Do có những ưu điểm vượt trội so với các phương pháp tạo lớp phủ khác về độ bám dính, độ xốp... Phun phủ nhiệt khí tốc độ cao HVOF không ngừng được phát triển và mở rộng về quy mô, cải thiện về chất lượng lớp phủ đã được ứng dụng rộng rãi trong nhiều ngành công nghiệp như Hình 1.5.



a) Trục quạt gió trong ngành luyện kim



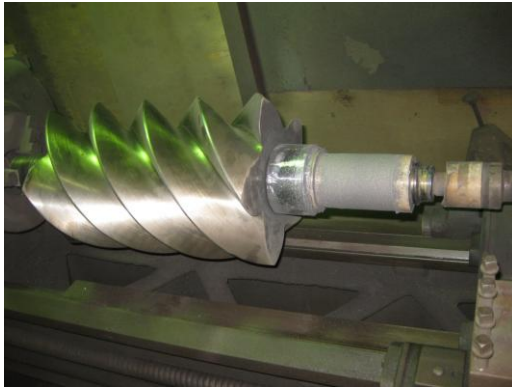
b) Trục cánh quạt đuôi trực thăng



c) Ống làm việc trong lĩnh vực dầu khí



d) Trục chân vịt trong tàu thủy



e) Trục vít máy nén khí



f) Trục tuabin

Hình 1.5. Một số chi tiết phủ bề mặt ứng dụng công nghệ HVOF

Phun phủ nhiệt khí có thể ứng dụng rộng rãi với bất kỳ vật liệu nào tan ra mà không phân hủy đều có thể được sử dụng. Thông thường, phương pháp phủ nhiệt khí được áp dụng cho 3 mục đích: bảo vệ chống ăn mòn, chức năng, phục hồi mài mòn.

1.3.1 Lớp phủ bảo vệ chống ăn mòn

Vật liệu phủ bảo vệ được chia làm 2 nhóm, bao gồm nhóm các lớp phủ có tác dụng như vật liệu anode hy sinh, tan dần ra để bảo vệ nền thép (Zn, Al, Mg và các hợp kim) và nhóm các lớp phủ có tác dụng như lớp màng barrier ngăn cản sự thâm nhập của các tác nhân ăn mòn tới bề mặt thép (thép không gỉ, hợp kim Ti, Mo, Pb, Sn,...). Các lớp phủ Zn-Al được đặc biệt chú ý nghiên cứu - ứng dụng do khả năng bảo vệ và ứng dụng đa dạng của chúng trong thực tế.

1.3.2 Lớp phủ chức năng

Nhu cầu về vật liệu rất đa dạng: chịu nhiệt, bền hóa chất, bền mài mòn, dẫn điện, khả năng chống nhiễu điện từ, trang trí,... Thông thường, tương tác giữa môi trường với vật liệu chủ yếu xảy ra ở lớp bề mặt. Trong nhiều trường hợp, vật liệu phải làm việc dưới tác động đồng thời của nhiều yếu tố: môi trường hóa chất kết hợp với các tác nhân gây mài mòn (erosion-corrosion), ăn mòn nhiệt độ cao,... Để đáp ứng yêu cầu làm việc của dạng chi tiết này, giải pháp đưa ra là tạo các lớp phủ chức năng lên bề mặt các vật liệu nền là gang thép rẻ tiền, dễ kiếm.

1.3.3 Lớp phủ phục hồi mài mòn

Các lớp phủ phục hồi mài mòn được đặc biệt quan tâm. Đây là một dạng đặc biệt trong nhóm các lớp phủ chức năng do chúng thường hay gặp nhất trong thực tế

đối với các chi tiết máy khai thác trong các điều kiện như mài mòn khô, mài mòn có bôi trơn, mài mòn dưới tải trọng lớn, mài mòn trượt tốc độ cao,... như trục khuỷu (Hình 1.6). Để phục hồi kích thước bị hao mòn, tùy theo điều kiện khai thác của chi tiết, sử dụng các vật liệu là một số mác thép cacbon, thép hợp kim.



Hình 1.6. Phun HVOF trục khuỷu

Hiện nay, có nhiều loại vật liệu được sử dụng trong công nghệ phun nhiệt HVOF. Dạng vật liệu được sử dụng công nghệ này thường ở dạng bột và có độ cứng rất cao: Kim loại ở dạng dây, que hoặc bột (Fe, Ni, Cr, Al, Mo, Co, Cu, Ti, W), bột gốm (các oxit Al_2O_3 , TiO_2 , Cr_2O_3 , ZrO_2 ,...), bột gốm kim loại (hỗn hợp cơ học giữa oxit với kim loại và hợp kim), bột hợp kim cứng (W, Cr, Ti,... và hỗn hợp chúng với Co, Ni),... Tùy theo yêu cầu làm việc của bề mặt mà có thể sử dụng các vật liệu khác nhau. Đối với hợp kim cứng carbide vonfram thường sử dụng 2 loại chính là không có crôm như WC-10Co, WC-12Co, WC-17Co và có crôm như WC-10Co-4Cr,.... Trong số đó, hợp kim gốm WC-10Co-4Cr có các tính chất: độ cứng cao, chống ăn mòn tốt,... được cho là vật liệu có thể thay thế cho crôm cứng. Do đó, vật liệu này được sử dụng để nghiên cứu trong luận án này.

Có 4 ưu điểm chính của phun nhiệt như sau:

- Tiết kiệm nguyên vật liệu quý.
- Tạo các lớp vật liệu phủ có độ dày theo ý muốn.
- Với khả năng cơ động cao và dễ dàng điều khiển tự động, phun nhiệt thích

hợp cho việc chế tạo mới cũng như phục hồi chi tiết cũ; cũng có thể ứng dụng để xử lý tại chỗ, cục bộ đối với các kết cấu lớn hoặc các chi tiết phức tạp.

- Công nghệ này thích hợp cho việc xử lý các chi tiết dễ biến dạng do nhiệt: trục khuỷu, trục động cơ, cánh bơm, cánh tuabin...

Ảnh hưởng của lớp mạ phủ đối với độ bền mỏi của chi tiết máy là một đặc tính quan trọng đòi hỏi sự nghiên cứu đặc biệt. Thậm chí khi phủ các lớp cùng một vật liệu nhưng ở điều kiện mạ phủ khác nhau, ảnh hưởng của lớp mạ phủ đối với độ bền mỏi cũng khác nhau. Nếu trong lớp phủ xuất hiện ứng suất dư nén thì thông thường độ bền mỏi khi uốn được cải thiện [8]. Vì vậy, nghiên cứu về lĩnh vực ảnh hưởng của mạ phủ đến độ bền mỏi của chi tiết máy đã được các nhà khoa học chú trọng nghiên cứu.

1.4 Thực trạng nghiên cứu về mỏi ở Việt Nam

Hiện nay, đánh giá độ bền mỏi là một tiêu chí đánh giá độ bền của chi tiết máy và được các nhà nghiên cứu trong nước chú trọng thực hiện. Một số công trình đã nghiên cứu độ bền mỏi như: nghiên cứu đánh giá độ bền, độ bền mỏi kết cấu bộ phận chạy đầu máy, toa xe sử dụng trong ngành đường sắt Việt Nam của Đỗ Đức Tuấn [9]; nghiên cứu đánh giá độ bền mỏi của trục bánh xe đầu máy xe lửa D19E của Phạm Lê Tiến [10] được thực hiện tại trường đại học Giao thông Vận tải; nghiên cứu nứt mỏi trên các chi tiết dạng trục và lò xo xoắn của Trần Hoài Bảo [11] được thực hiện tại trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. HCM,... Tuy nhiên, các công trình nghiên cứu trên chỉ đánh giá độ bền mỏi trên một vật liệu nền cụ thể.

Hiện nay, phương pháp mạ phủ được xem là một giải pháp để tăng bền bề mặt cho các chi tiết trục. Tuy nhiên, ở nước ta hiện nay chưa có công trình nào nghiên cứu về ảnh hưởng của lớp phủ đến độ bền mỏi của chi tiết dạng trục. Để đánh giá các công trình nghiên cứu trong lĩnh vực này, kết quả tổng hợp và phân tích các công trình nghiên cứu trong nước và trên thế giới được thể hiện ở mục sau đây.

1.5 Tình hình nghiên cứu trong và ngoài nước

1.5.1 Các nghiên cứu của nước ngoài

Trong những năm gần đây cho thấy rằng lớp phủ bằng các vật liệu như niken,

crôm, vonfram cacbua, Zn-Ni, Zn-Co và Zn-Fe có hiệu quả để tăng sự mài mòn và sự ăn mòn của các chi tiết máy khi làm việc trong môi trường ăn mòn: dầu khí, chế biến thực phẩm, in ấn, phục hồi các chi tiết dạng trục, khuôn mẫu,...đặc biệt là trong ngành hàng không, khi không khí ăn mòn tua-bin làm việc ở tốc độ và nhiệt độ cao có thể xảy ra sự ăn mòn nghiêm trọng đến một số chi tiết, dẫn đến sự mài mòn và phá hủy. Một trong những kỹ thuật được sử dụng tốt nhất để cải thiện sự ăn mòn và chịu mài mòn trong điều kiện như vậy là mạ phủ một lớp mỏng một số vật liệu chống ăn mòn. Vì vậy, việc nghiên cứu các tính chất của lớp phủ là cần thiết để nâng cao độ bền của chi tiết máy.

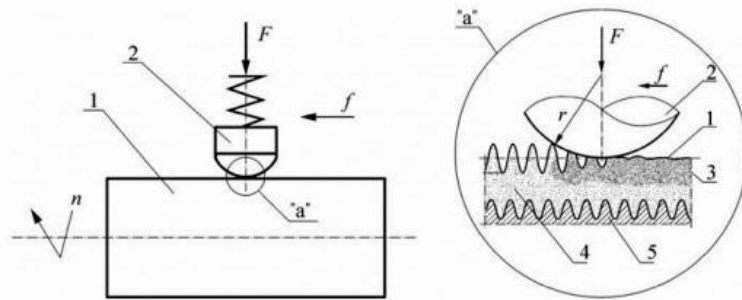
Trong kỹ thuật mạ điện, mạ crôm được sử dụng nhiều nhất để tăng độ cứng, khả năng chống mài mòn, ăn mòn và hệ số ma sát thấp để ứng dụng trong các lĩnh vực hàng không vũ trụ, ô tô và hóa dầu [12]. Để nghiên cứu và nâng cao chất lượng lớp mạ crôm, Julieta Torres-González và cộng sự [13] cũng đã nghiên cứu ứng suất dư và độ cứng tế vi của lớp mạ crôm trên nền thép AISI 1080. Các phương pháp được sử dụng để tiến hành nghiên cứu các thông số trên bao gồm: kỹ thuật nhiễu xạ tia X (*X-ray Diffraction* - XRD) để đo ứng suất dư của lớp nền và lớp phủ bề mặt, dùng thang đo Vicker để đo độ cứng và kính hiển vi điện tử quét (*Scanning Electron Microscopy* - SEM) để khảo sát cấu trúc nguyên tử lớp mạ. Ning Zhang [14] đã chỉ ra khả năng chống mài mòn rất tốt của lớp mạ crôm cho chi tiết piston thủy lực. Bên cạnh đó, tác giả Almotairi [15] và các cộng sự đã đánh giá tính chất cơ học và ứng suất dư của lớp mạ crôm trên nền thép không gỉ 416. Kết quả cho thấy lớp crôm có độ bám dính rất tốt trên nền thép, ứng suất dư kéo và vết nứt tế vi luôn tồn tại trong lớp mạ. Mật độ vết nứt tế vi tăng khi tăng chiều dày lớp mạ từ 10 đến 125 μm . Tuy nhiên, việc xác định mật độ vết nứt tế vi của hầu hết các nghiên cứu chỉ dựa vào ảnh chụp tế vi và đánh giá một cách định tính. Với sự ra đời của công nghệ xử lý ảnh, tác giả Nascimento và M. Vidal đã ứng dụng công nghệ này để xác định chính xác mật độ vết nứt tế vi của crôm [15-16]. Bên cạnh những nghiên cứu về các yếu tố ảnh hưởng đến các thông số của lớp mạ: ứng suất dư, độ cứng, độ bám dính, kích thước hạt,...để nâng cao chất lượng của chi tiết mạ thì

nghiên cứu về ảnh hưởng của lớp mạ đến độ bền mỏi của chi tiết được mạ cũng được quan tâm. Một tính năng quan trọng của mạ điện crôm là tồn tại ứng suất dư kéo cao, dẫn đến sự xuất hiện của vết nứt tế vi [17], phát sinh từ sự phân hủy của hidrua crôm trong quá trình mạ điện [18]. Trong điều kiện chịu tải kéo - nén chu kỳ thì những vết nứt tế vi này sẽ lan truyền, xuyên qua bề mặt lớp phủ dẫn đến giảm độ bền mỏi của chi tiết. Do đó, việc sử dụng hiệu quả phương pháp mạ điện crôm để cải thiện sức bền mỏi phải được nghiên cứu [18]. Theo nghiên cứu của Voorwald và các cộng sự [19] cho thấy rằng khi mạ crôm cứng lên thép AISI 4340 thì độ bền mỏi sẽ giảm đi 47% so với chi tiết không mạ crôm. Zeyad và cộng sự [20] đã nghiên cứu ảnh hưởng của lớp mạ crôm trên nền thép AISI 1039 với chiều dày từ 13-32 μm , kết quả cho thấy độ bền mỏi sau khi mạ crôm đều giảm và nguyên nhân chính gây giảm độ bền mỏi là trong lớp mạ crôm tồn tại nhiều vết nứt tế vi.

Để làm tăng độ bền mỏi của lớp mạ crôm, các nghiên cứu cũng đã áp dụng các phương pháp tăng bền trước khi mạ. Theo đó, Carvalho và cộng sự [21] nghiên cứu tác dụng của phun bi bề mặt chi tiết bằng vật liệu hợp kim nhôm 7050-T7451 trước khi mạ crôm với chiều dày lớp mạ là 100 μm và cho kết quả độ bền mỏi được tăng lên so với chi tiết không phun bi trước khi mạ crôm. Voorwald cùng với cộng sự cũng đã nghiên cứu tương tự cho thép AISI 4340 và cho kết quả là độ bền mỏi cũng tăng lên [22].

Nghiên cứu về công nghệ tăng bền mỏi này, Fouad và Mostafa [23] khảo sát ảnh hưởng của phun bi đến độ bền mỏi mẫu hợp kim nhôm Al 2024-T4 được sử dụng trong ngành hàng không. Ở đây các tác giả đã sử dụng phương pháp khoan lỗ để xác định ứng suất dư, đo độ cứng,...sau khi phun bi. Đặc biệt, kết quả bài báo cho thấy độ bền mỏi tăng lên sau khi phun bi. Soady và cộng sự [24] cũng đã nghiên cứu công nghệ này áp dụng cho cánh tuabin với vật liệu 12CrMoV. Kết quả cũng cho thấy, độ bền mỏi của cánh tuabin sau khi phun bi cũng tăng lên ở chế độ mỏi ở chu kỳ thấp (low cycle fatigue). Zeyad và các cộng sự [25] cũng áp dụng phương pháp này trên thép AISI 1039 khi mạ crôm với chiều dày 47,1 μm , kết quả độ bền mỏi khi mạ crôm giảm so với chi tiết không mạ và độ bền mỏi có cải thiện

khi áp dụng phun bi trước khi phủ crôm. Ngoài phương pháp phun bi, phương pháp miết bề mặt crôm sau khi mạ cũng nhằm nâng cao độ bền mỏi của chi tiết mạ, Korzynski và cộng sự [26] đã sử dụng một chày miết bằng kim cương (Hình 1.7) cho trượt lên bề mặt chi tiết mạ nhằm gây ra biến dạng dẻo và làm giảm chiều cao nhấp nhô cũng như tăng độ bóng của bề mặt.



1-phôi, 2-chày trượt, 3-vùng biến dạng dẻo, 4- lớp mạ crôm, 5-vật liệu nền thép, F-lực nén, f-tốc độ, n-tốc độ quay của phôi, r-bán kính của đầu dụng cụ

Hình 1.7. Miết bề mặt mạ crôm dùng dụng cụ kim cương [26]

Các tác giả đã thí nghiệm mạ crôm cho hai loại thép 42CrMo4 và 41Cr4 ứng với chiều dày lớp mạ là 25 μm và 50 μm . Kết quả nghiên cứu cho thấy giới hạn bền mỏi đã tăng lên tới 40% khi áp dụng phương pháp dùng chày kim cương để làm giảm nhấp nhô bề mặt. Bên cạnh đó, Voorwald cùng cộng sự [27] đã nghiên cứu phương pháp cải thiện độ bền mỏi của lớp mạ crôm bằng cách mạ một lớp trung gian với vật liệu niken. Nghiên cứu thực hiện trên thép AISI 4340 ứng với hai giá trị độ cứng của vật liệu nền tương ứng: 39-42 HRC và 50-52 HRC, kết quả cho thấy độ bền mỏi tăng lên đáng kể sau khi chi tiết được mạ lớp trung gian niken so với không mạ lớp lót niken. Cụ thể, độ bền mỏi tăng 60% ứng với độ cứng của nền 39-42 HRC, và tăng 77% ứng với độ cứng của nền 50-52 HRC.

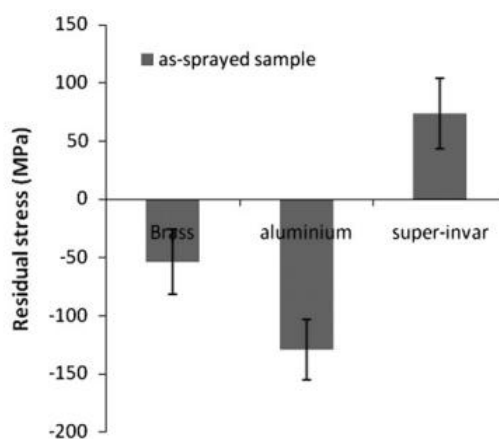
Trong thời gian gần đây, công nghệ phủ HVOF đã và đang được nghiên cứu. Phương pháp này có thể phủ với nhiều loại vật liệu. Tuy nhiên với vật liệu carbide vonfram với thành phần chủ yếu là pha WC và chất kết dính Co được chú trọng nghiên cứu nhiều nhất. Với tính chất ưu việt của loại vật liệu này, chúng 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 [12, 28-31]. Điều này cũng được chứng minh qua nghiên cứu của Peter Trebuña và cộng sự [32] khi đánh giá các phương pháp phủ hiện đại có thể thay thế mạ crôm và phương pháp phủ HVOF với vật liệu chứa thành phần carbide vonfram là cho kết quả tốt nhất.

Các tính chất cơ, lý, hóa của lớp phủ đã được chú trọng nghiên cứu trong thời gian gần đây. Pulsford và cộng sự [33] đã nghiên cứu tính chống mài mòn khi phủ HVOF với vật liệu WC-Co-Cr, kết quả cho thấy vật liệu này có khả năng chống mài mòn rất tốt. Về khả năng chống ăn mòn của vật liệu này cũng được Kaushal Kumar và cộng sự [34] đánh giá, kết quả là khả năng chống ăn mòn khi phủ tăng gấp 3,5 lần so với không phủ. Altuncu và İric [35] nghiên cứu ảnh hưởng lớp phủ này đến độ bền gãy (fracture toughness) trên nền vật liệu hợp kim nhôm, kết quả là chi tiết sau khi phủ đã làm chậm sự phát triển của vết nứt và tăng độ bền chi tiết.

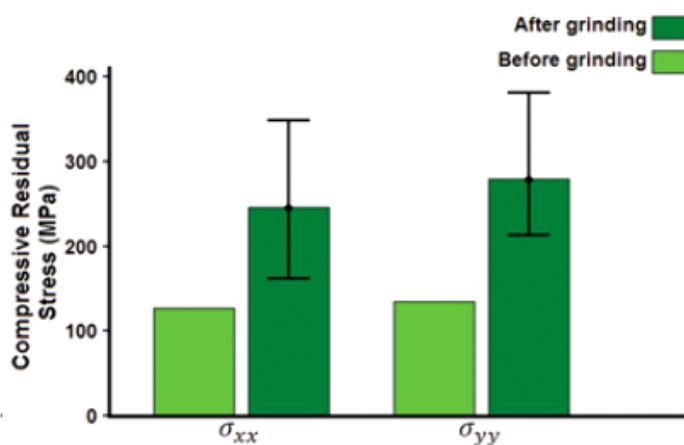
Trong các thông số của lớp phủ, ứng suất dư hình thành trong quá trình phủ là yếu tố quan trọng nhất, ảnh hưởng rất lớn đến độ bền và đặc biệt là độ bền mỏi của chi tiết sau phủ. Vì vậy, việc áp dụng các phương pháp đo hiện đại để đo giá trị ứng suất dư của lớp phủ được quan tâm nghiên cứu.

Oladijo cùng cộng sự đã nghiên cứu phương pháp nhiễu xạ tia X (tia Co-K α) để đo ứng suất dư của lớp phủ WC-17Co [36]. Tác giả cho rằng ứng suất dư của lớp phủ hình thành qua ba giai đoạn: sự va chạm cơ học giữa các hạt của lớp phủ và nền, quá trình nóng lên của nền và lớp phủ khi phủ, quá trình nguội của nền và lớp phủ. Hai quá trình sau phụ thuộc và hệ số giãn nở nhiệt α , nếu hệ số giãn nở nhiệt của vật liệu lớp phủ lớn hơn hệ số giãn nở nhiệt của vật liệu nền thì sinh ra ứng suất dư kéo và ngược lại thì sinh ra ứng suất dư nén. Thử nghiệm trên ba vật liệu nền là đồng, nhôm và thép hợp kim có hệ số giãn nở nhiệt rất nhỏ (*super-invar*). Kết quả thể hiện trên Hình 1.8 cho thấy: ứng suất dư nén của đồng là -50 MPa, nhôm là -150MPa, và của hợp kim là ứng suất kéo của hợp kim là 160 MPa



Hình 1.8. Ứng suất dư với các vật liệu phủ khác nhau [36]

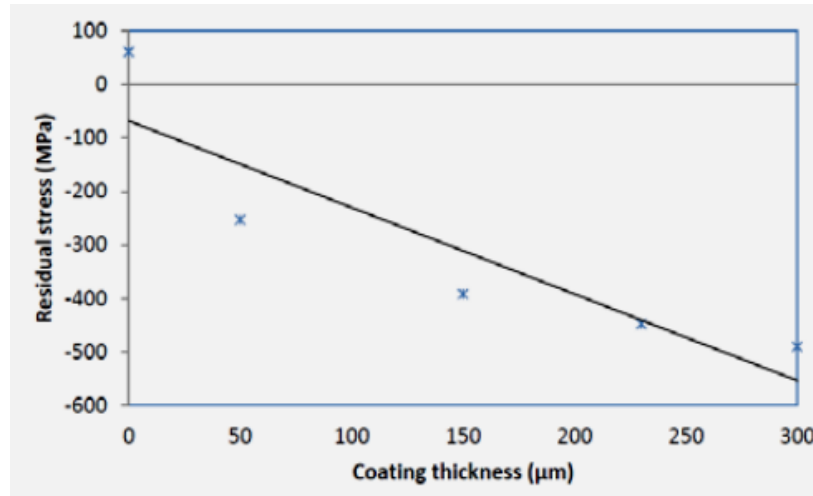
Hamed Masoumi [37] cùng cộng sự đã nghiên cứu ảnh hưởng của quá trình mài đến ứng suất dư và độ bám dính của lớp phủ WC-10Co-4Cr trên thép cacbon trung bình và sử dụng phương pháp đo nhiễu xạ tia X (tia Cu-K α) để tính toán ứng suất dư. Lớp phủ WC-10Co-4Cr là vật liệu nhiều pha, nhưng pha carbide vonfram là chiếm chủ yếu nên chỉ tính ứng suất cho pha này. Kết quả trên Hình 1.9 cho thấy: ứng suất dư tồn tại trong lớp phủ là ứng suất nén $\sigma_{xx} = -125,8$ MPa và $\sigma_{yy} = -133,4$ MPa. Sau khi mài, ứng suất dư có xu hướng tăng lên.



Hình 1.9. Ứng suất dư của vật liệu WC-10Co-4Cr [37]

Tương tự, Jalali Azizpour và Mohammadi Majd [38] đã tính toán ứng suất dư của lớp phủ WC-12Co trên nền thép AISI 1045 sử dụng phương pháp nhiễu xạ tia X để đo ứng suất và chỉ tính cho pha chiếm đa số carbide vonfram. Kết quả cho thấy ứng suất dư nén luôn tồn tại trong lớp phủ và có xu hướng tăng theo chiều dày

lớp phủ (Hình 1.10).

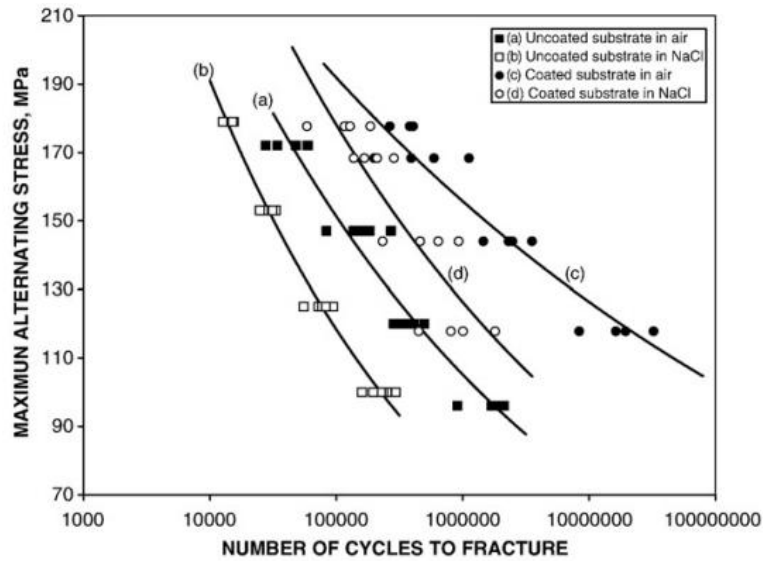


Hình 1.10. Ứng suất dư nén tăng theo chiều dày lớp phủ WC-12Co [38]

Gần đây nhất, Zoei [39] cùng cộng sự đã đánh giá trường ứng suất dư của lớp phủ WC-10Co-4Cr trên nền thép AISI 1010. Tác giả sử dụng phương pháp $\sin^2\psi$ với kỹ thuật nhiễu xạ tia X để đo ứng suất dư của lớp phủ. Kết quả cho thấy, ứng suất dư nén luôn tồn tại trong lớp phủ và có xu hướng tăng từ bề mặt lớp phủ đến lớp tiếp giáp (*interface*).

Ngoài xác định thông số quan trọng nhất của lớp phủ, đánh giá về các tính chất cơ học của lớp phủ ảnh hưởng đến khả năng làm việc của trục như độ bám dính, độ cứng, độ bền mỏi,... cũng được chú trọng nghiên cứu. Trong các vật liệu carbide vonfram, hai mác vật liệu được chú trọng nghiên cứu và có khả năng thay thế cho mạ crôm là WC-17Co và WC-10Co-4Cr. Trong đó WC-10Co-4Cr được chú trọng hơn vì có thành phần crôm nên có khả năng chống ăn mòn tốt hơn [40]. Cũng trong nghiên cứu này, độ bền mỏi và độ bền mỏi do ăn mòn (*corrosion fatigue*) của lớp phủ WC-10Co-4Cr trên nền hợp kim nhôm AA6063-T6 được tác giả thực hiện. Kết quả trên Hình 1.11 cho thấy độ bền mỏi tăng rất lớn khi phủ lớp WC-10Co-4Cr so với mẫu nền trong môi trường không khí và cả trong môi trường ăn mòn NaCl 3%. Trong môi trường không khí, độ bền mỏi tăng 540-4300%, trong khi độ bền mỏi tăng 620-1460% trong môi trường NaCl 3%. Trong nghiên cứu này, tác giả cho rằng nguyên nhân tăng độ bền mỏi là do ứng suất dư nén trong lớp phủ đã ngăn

chặn sự lan truyền vết nứt. Tuy nhiên ứng suất dư đã không được xác định.



Hình 1.11. Độ bền mỏi của lớp phủ WC-10Co-4Cr [40]

Costa và cộng sự [41] đã đánh giá ảnh hưởng lớp phủ WC-10Co-4Cr trên nền thép Ti-6Al-4V, kết quả cho thấy lớp phủ WC-10Co-4Cr làm giảm độ bền mỏi. Giới hạn mỏi của nền đạt 900 MPa ứng với 10^7 chu kỳ, trong khi có lớp phủ lại giảm chỉ đạt 400 MPa ứng với 10^7 chu kỳ. Tác giả cho rằng nguyên nhân chính gây giảm độ bền mỏi là do quá trình phun cát để tăng độ bám dính của lớp phủ đã làm tăng độ nhấp nhô bề mặt và các vết nứt nhỏ xuất hiện trong quá trình phủ.

Voorwald và các cộng sự [42] đã đánh giá ảnh hưởng của lớp phủ WC-17Co và WC-10Co-4Cr trên nền thép AISI 4340. Chi tiết mẫu trước khi phủ được tiến hành nhiệt luyện tôi và ram trước khi được phủ với chiều dày 150 μm . Kết quả cho thấy, độ bền mỏi của cả 2 lớp phủ đều làm giảm độ bền mỏi. Đối với lớp phủ WC-17Co, giới hạn mỏi đạt 55,5%, và lớp phủ WC-10Co-4Cr đạt 49% ứng suất giới hạn chảy. Tuy nhiên trong nghiên cứu, các tác giả không đề cập đến thông số của quá trình phủ. Tác giả kết luận rằng nguyên nhân chính gây giảm độ bền mỏi là do lớp phủ có độ xốp cao và tồn tại tạp chất, từ đó tạo mầm sinh các vết nứt mặc dù ứng suất dư nén luôn tồn tại trong lớp phủ.

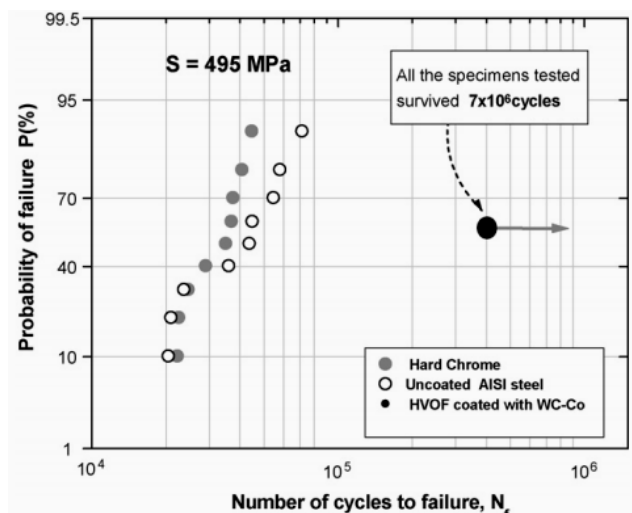
La Barbera-Sosa cùng cộng sự [43] đã nghiên cứu lớp phủ hỗn hợp WC-10Co-4Cr/Colmonoy 88 (NiCrBSiW). Tác giả đã trộn hai loại bột WC-10Co-4Cr

(50%) và Colmonoy 88 (50%), sau đó phủ lên vật liệu AISI 4340 với chiều dày 130 μm . Kết quả độ bền mỏi giảm 30% và nghiên cứu cũng cho thấy vết nứt mỏi hình thành ở bề mặt của lớp phủ và cả ở bề mặt tiếp giáp của lớp phủ và chi tiết nền. Tại ranh giới nền/lớp phủ là do quá trình phun cát gây ra độ nhấp nhô bề mặt. Còn tại bề mặt lớp phủ là do quá trình phun và độ nhám của bề mặt phủ gây ra vết nứt mỏi. Các vết nứt lan truyền qua chiều dày lớp phủ, đặc biệt là thông qua các hạt niken, sau đó phát triển dọc theo biên giới nền/lớp phủ.

Các nghiên cứu đánh giá các tính chất cơ học giữa mạ crôm cứng với vật liệu carbide vonfram (phủ HVOF) cũng được chú trọng. Krelling cùng cộng sự [44] đã đánh giá khả năng chống mòn và ăn mòn của WC-10Co-4Cr so với crôm. Nghiên cứu thực hiện trên thép AISI 4140 với chiều dày phủ 120 μm . Kết quả cho thấy vật liệu carbide vonfram có khả năng chống mòn gấp 250 lần và chống ăn mòn tốt hơn crôm. Độ cứng của carbide vonfram cũng cao hơn hẳn crôm. Đây là một phương pháp thay thế tốt cho mạ crôm.

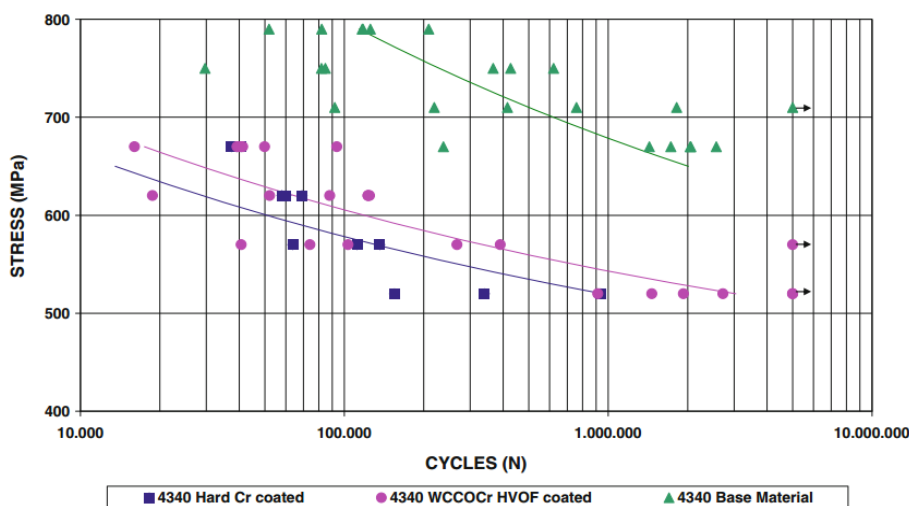
Đánh giá về độ bền mỏi của hai loại vật liệu này, A. Ibrahim và C. C. Berndt [45] đã nghiên cứu bền mỏi và độ biến dạng của lớp phủ WC-17Co và mạ crôm trên nền thép AISI 4340 không áp dụng qui trình nhiệt luyện với chiều dày 100 μm . Trước khi phủ, chi tiết mẫu được phun cát với hạt oxit nhôm và không mài sau khi phủ. Thí nghiệm được thực hiện trong môi trường không khí, kết quả nghiên cứu cho thấy độ bền mỏi của lớp phủ WC-17Co sử dụng công nghệ HVOF tăng rất lớn so với chi tiết nền trong khi lớp mạ crôm làm giảm độ độ bền mỏi.

Nghiên cứu kết luận rằng, lớp phủ sử dụng công nghệ HVOF tồn tại ứng suất dư nén và có môđun đàn hồi cao hơn nền thép nên làm tăng độ bền mỏi. Với lớp mạ crôm luôn tồn tại ứng suất kéo nên làm giảm độ bền mỏi. Tuy nhiên, giá trị ứng suất dư không được tính toán trong công trình này mà chỉ dựa vào các công trình trích dẫn để kết luận. Bên cạnh đó, nghiên cứu chỉ đánh giá độ bền mỏi tại một điểm ứng suất $S = 495 \text{ MPa}$ mà không khảo sát toàn miền ứng suất để xác định đường cong mỏi của chi tiết phủ (Hình 1.12).



Hình 1.12. Độ bền mỏi của lớp phủ WC-17Co tại ứng suất $S = 495$ MPa [45]

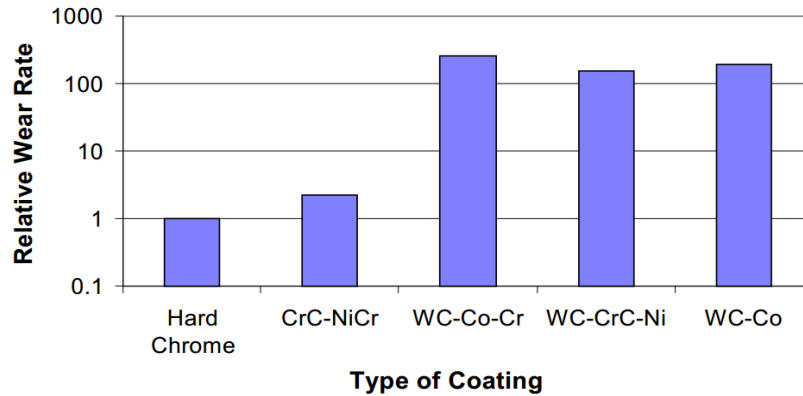
Aguero và cộng sự [46] đã nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của lớp phủ WCCoCr và mạ crôm cứng trên các chi tiết với nền thép AISI 4340 không áp dụng quy trình nhiệt luyện sử dụng trong ngành hàng không để khảo sát độ bám dính, chống ăn mòn, độ cứng và độ bền mỏi. Kết quả trên Hình 1.13 cho thấy: độ bền mỏi khi mạ crôm giảm rất lớn so với không mạ, trong khi phủ lớp WCCoCr cho thấy độ bền mỏi giảm so với chi tiết nền nhưng giảm ít hơn mạ crôm.



Hình 1.13. Độ bền mỏi khi phủ WCCoCr, crôm cứng trên nền thép AISI 4340 [46]

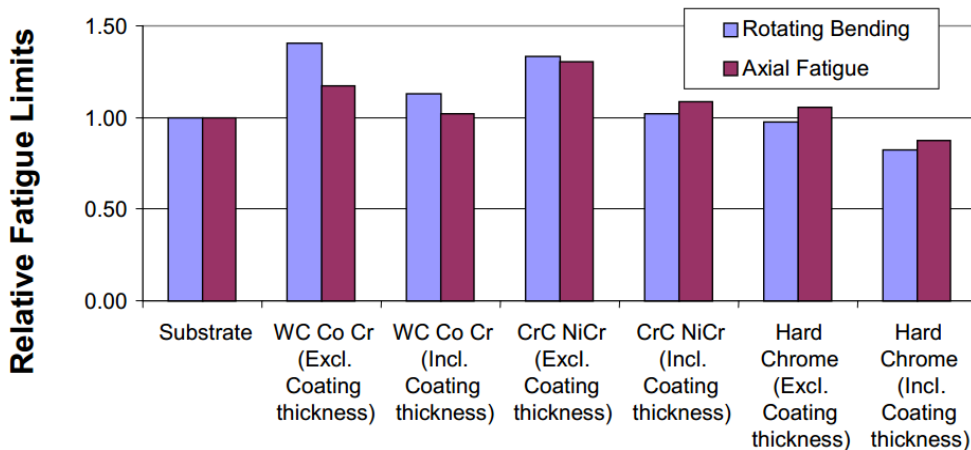
Poh Koon và cộng sự [47] đã nghiên cứu đánh giá so sánh độ bền mỏi và khả năng chống mòn của một số loại vật liệu phủ HVOF và mạ crôm. Nghiên cứu được thực hiện trên nền thép không gỉ austenite 316, kết quả cho thấy khả năng chống

mòn của vật liệu WCCoCr là cao nhất (Hình 1.14).



Hình 1.14. Độ chống mòn của một số lớp phủ [47]

Về độ bền mỏi, tác giả chỉ khảo sát tại điểm giới hạn mỏi (10^7 chu kỳ) của các loại vật liệu. Kết quả khảo sát trên Hình 1.15 cho thấy: giới hạn mỏi của lớp phủ HVOF và đặc biệt là của vật liệu WCCoCr đều tăng so với chi tiết nền. Trong khi lớp mạ crôm đều làm giảm độ bền mỏi.



Hình 1.15. Giới hạn mỏi của một số lớp phủ trên nền thép không gỉ 316 [47]

Silva Junior và cộng sự [48] đã đánh giá độ bền mỏi của lớp phủ WC-13Co-4Cr và mạ crôm cứng trên nền thép không gỉ 15-5PH (ASTM A 564) được nhiệt luyện tôi và ram để đạt cơ tính tổng hợp cao nhất. Với chiều dày lớp phủ khảo sát là 150 μm và thông số của quá trình mạ crôm áp dụng theo quy trình chuẩn trong mạ công nghiệp. Kết quả cho thấy lớp phủ WC-13Co-4Cr gây giảm độ bền mỏi 28,9% tại mức ứng suất 656 MPa và giảm 42% tại mức ứng suất 596 MPa. Trong khi đó, độ bền mỏi khi mạ crôm cứng giảm tới 76,4% tại mức ứng suất 656 MPa và 58% tại

mức ứng suất 596 MPa.

Các nghiên cứu ảnh hưởng của lớp phủ đối với nền thép AISI 1045 (C45) cũng rất khiêm tốn. Azizpour và cộng sự [49] đã nghiên cứu áp dụng công nghệ HVOF trong phục hồi trục máy nén khí tốc độ cao. Nghiên cứu được thực hiện trên thép AISI 1045 và được phủ với vật liệu WC-12Co. Kết quả cho thấy lớp phủ có độ bám dính và liên kết rất cao, trong lớp phủ luôn tồn tại ứng suất dư nén và tác giả cho rằng phương pháp này là lựa chọn tốt nhất để phục hồi trục mài mòn. Tuy nhiên trong nghiên cứu này, vật liệu thép AISI 1045 không được xử lý và nhiệt luyện trước khi phủ và tính chất môi cũng không được đề cập. Nhóm tác giả này cũng nghiên cứu về ảnh hưởng của lớp phủ WC-12Co đến ứng suất dư, độ bám dính và độ bền mỏi [50] trên nền thép AISI 1045 có độ nhám đạt 4 μm sau khi phủ. Kết quả cho thấy độ bám dính của lớp phủ là 64,55 MPa, trong lớp phủ luôn tồn tại ứng suất nén và đạt giá trị 156 - 257 MPa. Độ bền mỏi của lớp phủ có kết quả giảm so với chi tiết nền do quá trình phun cát trước khi phủ làm tăng độ nhám nhô và là nguyên nhân gây giảm độ bền mỏi. Tuy nhiên cũng giống công trình ở trên, tác giả dùng thép AISI 1045 để nghiên cứu nhưng không áp dụng quy trình nhiệt luyện. Vì vậy độ bền của mẫu theo trong nghiên cứu chỉ đạt độ bền chảy 278,5 MPa, độ bền đứt là 547 MPa. Puchi-Cabrera cùng cộng sự [51] cũng đã nghiên cứu ảnh hưởng của lớp phủ Colmonoy 88 (NiCrBSiW) đến độ bền mỏi trên nền thép AISI 1045 không áp dụng quy trình nhiệt luyện trong quá trình nghiên cứu. Kết quả cho thấy lớp phủ làm giảm độ bền mỏi so với vật liệu nền trong môi trường không khí. Tuy nhiên trong môi trường ăn mòn NaCl 3%, lớp phủ có khả năng chống ăn mòn tốt hơn nên độ bền mỏi lại tăng rất nhiều so với chi tiết nền. Cụ thể, tại mức ứng suất 300 MPa, độ bền mỏi tăng 1450% so với chi tiết nền trong môi trường ăn mòn. González-Hermosilla cùng cộng sự [52] đã nghiên cứu ảnh hưởng của độ nhám bề mặt trước khi phủ lớp WC-10Co-4Cr đến độ bền mỏi trên nền thép AISI 1045 không áp dụng quy trình nhiệt luyện với lớp phủ có chiều dày gần 200 μm . Kết quả cho thấy, tại mức ứng suất thấp, nhóm chi tiết phủ trên nền thép được đánh bóng có độ bền mỏi cao hơn nhóm chi tiết được phun cát để tạo nhám trước khi phủ. Tuy nhiên, điều

này xảy ra ngược lại với các mức ứng suất cao. Nguyên nhân là do độ bám dính của lớp phủ trên nền thép đánh bóng không cao so với trường hợp có tạo nhám và trong quá trình làm việc xảy ra hiện tượng tách lớp phủ với chi tiết nền.

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, đặt 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,... nên đây sẽ là một công nghệ nhiều hứa hẹn và là lĩnh vực được chú trọng nghiên cứu trong thời gian tới.

Luận án tiến sĩ của Trương Đức Thiệp [53] đã nghiên cứu công nghệ mạ composite và mạ thử nghiệm trên một số chi tiết máy. Trong nghiên cứu tác giả đã tiến hành mạ hạt composite Al_2O_3 trên nền niken. Tác giả đã đưa ra một số thông số hợp lý về mạ composite Al_2O_3 trên nền niken và chứng minh được ưu điểm của nó so với mạ niken thông thường.

Luận án tiến sĩ của Đào Khánh Du [54] đã nghiên cứu nâng cao tính năng ma sát của lớp mạ xoa đồng và niken. Tác giả đã nghiên cứu về công nghệ mạ xoa, ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến lớp mạ xoa Cu và Ni. Nghiên cứu thực nghiệm tính năng ma sát của lớp mạ xoa Cu và Ni ứng dụng để phục hồi chi tiết máy.

Luận án tiến sĩ của Nguyễn Duy Kết [55] đã nghiên cứu công nghệ mạ hợp kim vàng hai nguyên tố. Tác giả đã nghiên cứu quá trình phóng điện đồng thời tạo hợp kim vàng trong các dung dịch phức. Từ đó làm cơ sở để ổn định công nghệ mạ hợp kim vàng hai nguyên tố.

Luận văn thạc sĩ của Thân Xuân Tình [56] đã nghiên cứu chế tạo lớp mạ Crôm gia cường bằng ống nano cacbon(CNTs). Tác giả sử dụng phương pháp mạ điện để nghiên cứu và chế tạo lớp mạ crôm gia cường các loại CNTs, đồng thời đánh giá ảnh hưởng của CNTs đến cơ tính của lớp mạ composite thu được.

Hiện nay, công nghệ phun phủ nhiệt được nghiên cứu và ứng dụng vào nhiều lĩnh vực vì có thể lựa chọn vật liệu phun và vật liệu nền trong phạm vi rộng. Vật liệu được sử dụng chủ yếu trong phun nhiệt là kim loại và carbide. Lớp phủ phun nhiệt chủ yếu được sử dụng để bảo vệ bề mặt chi tiết trong ngành khai thác dầu mỏ,

công nghiệp ô tô, công nghiệp hàng không và vũ trụ,... và đặc biệt là trong công nghệ phục hồi. Vì vậy các nghiên cứu gần đây cũng bắt đầu nghiên cứu theo xu thế này.

Luận án tiến sĩ của Trần Văn Dũng [57] đã nghiên cứu sử dụng công nghệ phủ plasma sử dụng hợp kim 67Ni18Cr5Si4B để phục hồi chi tiết trục tàu, trục động cơ và các trục khác bằng thép C45. Kết quả cho thấy, chi tiết sau khi phủ có chất lượng tương đương với nhập ngoại và đã áp dụng phục hồi các chi tiết trục trong nhà máy xi măng Sông Gianh, công ty sản xuất nhôm Quảng Bình...

Luận án tiến sĩ của Phạm Văn Liệu [58] đã nghiên cứu ảnh hưởng của một số thông số công nghệ như khoảng cách phun, tốc độ dòng phun... khi phun HVOF bột hợp kim 67Ni18Cr5Si4B trên nền trục thép C45 đến chất lượng lớp phủ.

Luận án tiến sĩ của Nguyễn Chí Bảo [59] đã nghiên cứu ảnh hưởng và tốc độ chuyển động tương đối giữa đầu phun với chi tiết đến chất lượng bề mặt phủ bằng công nghệ HVOF. Tác giả thực hiện phủ hợp kim Cr_3C_2 -NiCr trên nền thép làm trục 40Cr. Tác giả đã xây dựng phương trình hàm bậc hai về mối quan hệ giữa độ bám dính và độ xốp của lớp phủ với các thông số: lưu lượng cấp bột, tốc độ quay của chi tiết, lượng dịch chuyển đầu phun. Từ đó lựa chọn được thông số tối ưu.

Luận án tiến sĩ của Nguyễn Thanh Phú [60] đã nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số công nghệ: lưu lượng phun, khoảng cách phun, tỷ lệ oxy/propan khi phủ vật liệu carbide vonfram. Luận án đã tìm ra chế độ phủ tối ưu dựa trên tiêu chí về độ cứng, độ xốp và độ bám dính của lớp phủ.

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 tác giả đã tập trung vào việc nâng cao chất lượng lớp bề mặt của chi tiết bằng cách phủ lên bề mặt của chi tiết một lớp vật liệu có tính chịu nhiệt, chịu mài mòn cao, nhằm đáp ứng các điều kiện làm việc khác nhau của chi tiết. Bên cạnh đó, thông số của lớp phủ: độ bám dính, ứng suất dư... và đặc biệt là độ bền mỏi của lớp phủ cũng được quan tâm nghiên cứu.

Các tác giả cũng đã đánh giá độ bền mỏi của phương pháp HVOF và mạ crôm

cứng nhưng chỉ tập trung trên nền thép có độ bền cao AISI 4340 hoặc thép không gỉ. Các nghiên cứu của các tác giả chỉ thực hiện trên một chiều dày phủ cụ thể. Điều này cũng chưa thể hiện sự ảnh hưởng của biến thiên chiều dày mạ phủ và các tính chất thay đổi theo chiều dày phủ ảnh hưởng đến độ bền mỏi. Bên cạnh đó, các nghiên cứu chỉ tập trung nghiên cứu mạ phủ trên vật liệu nền không áp dụng chế độ nhiệt luyện trong khi quy trình nhiệt luyện là quy trình bắt buộc cho chi tiết dạng trục đặc biệt là trục làm từ thép C45.

Qua khảo sát cho thấy chưa tìm thấy nghiên cứu nào về ảnh hưởng của lớp phủ bột carbide vonfram WC-10Co-4Cr bằng công nghệ HVOF lên bề mặt thép C45 (thép trục) được nhiệt luyện theo chế độ chi tiết trục và so sánh với mạ crôm với các chiều dày lớp mạ phủ khác nhau để đánh giá mức độ ảnh hưởng các thông số của lớp phủ đến độ bền mỏi. Hơn nữa, trong các ngành công nghiệp có rất nhiều chi tiết bị mòn, đặc biệt là các chi tiết dạng trục được chế tạo từ thép C45 cần được phục hồi. Vì vậy, nghiên cứu, đánh giá độ bền mỏi của lớp phủ trên nền thép C45 (đã được nhiệt luyện theo chế độ trục) là có ý nghĩa. Đặc biệt, trong bối cảnh nước ta chưa có công trình nào đánh giá về ảnh hưởng của lớp mạ phủ đến độ bền mỏi các chi tiết trục làm bằng thép C45.

1.6.2 Định hướng nghiên cứu

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

- 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 được chế tạo từ 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.
- Đo lường và đánh giá sự thay đổi của ứng suất dư và mật độ tế vi khi mạ phủ với các chiều dày khác nhau.
- Đánh giá và so sánh ảnh hưởng của chiều dày lớp mạ crôm cứng và phủ carbide vonfram WC-10Co-4Cr đến độ bền mỏi của chi tiết trục C45.

Chương 2

CƠ SỞ LÝ THUYẾT

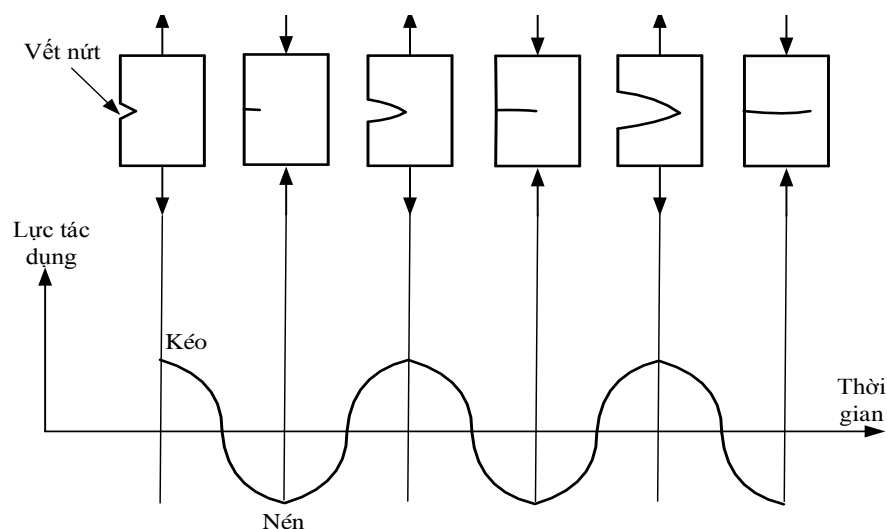
2.1 Lý thuyết mỏi và những khái niệm cơ bản

Lý thuyết mỏi là một nhánh của cơ học phá hủy chuyên nghiên cứu về ứng xử của vật liệu và chi tiết dưới tác động của ứng suất thay đổi theo thời gian có kể tới ảnh hưởng của hàng loạt các yếu tố, đồng thời nêu ra phương pháp tính toán và những giải pháp kỹ thuật nhằm nâng cao độ bền mỏi. Các nhà nghiên cứu đã chia lý thuyết mỏi thành hai nhánh nhỏ: mỏi ngắn hạn và mỏi dài hạn.

Mỏi ngắn hạn là hiện tượng mỏi xảy ra khi số chu trình ứng suất nhỏ hơn hoặc bằng 10^4 . Ngược lại, mỏi dài hạn là hiện tượng mỏi xảy ra khi số chu trình ứng suất lớn hơn 10^4 .

2.1.1 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 (Hình 2.1). 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 như vậy được gọi là sự phá hủy vì mỏi.



Hình 2.1. Sự tích lũy phá hủy mỏi ở kim loại

2.1.2 Giới hạn mỏi

Giới hạn mỏi của vật liệu là một trong số những đặc trưng cơ học. Cũng như

những đặc trưng cơ học khác, muốn xác định giới hạn mỏi của một vật liệu ở một điều kiện cụ thể, phải tiến hành thí nghiệm theo một quy chuẩn nhất định. Giới hạn mỏi của vật liệu ở một điều kiện nào đó là giá trị lớn nhất của ứng suất thay đổi theo thời gian ứng với một số chu trình ứng suất cơ sở mà mẫu chuẩn không bị phá hủy.

Mỗi một loại vật liệu quy định số chu trình ứng suất cơ sở riêng. Gọi N_0 là số chu trình ứng suất cơ sở. Trong những trường hợp đặc biệt, người ta lấy $N_0 = 10^7$ đối với vật liệu kim loại nói chung và $N_0 = 10^8$ đối với các hợp kim nhẹ có độ bền cao. Tùy theo đặc trưng của chu trình ứng suất, giới hạn mỏi có thể được xác định ở chu trình ứng suất đối xứng, chu trình ứng suất mạch động hoặc ở chu trình ứng suất phi đối xứng.

Bảng 2.1. Số liệu N_0 của một số kim loại thường dùng [1]

STT	Loại vật liệu	N_0
1	Thép cacbon thấp ($\sigma_b=40-60 \text{ kG/mm}^2$)	2.10^6
2	Thép cacbon trung bình ($\sigma_b=50-100 \text{ kG/mm}^2$)	2.10^6
3	Thép hợp kim ($\sigma_b=100-180 \text{ kG/mm}^2$)	2.10^6
4	Kim loại màu	5.10^6
5	Gang	$1,5.10^6$
6	Vật liệu composit	$1,5. 10^6$

2.1.3 Đường cong mỏi

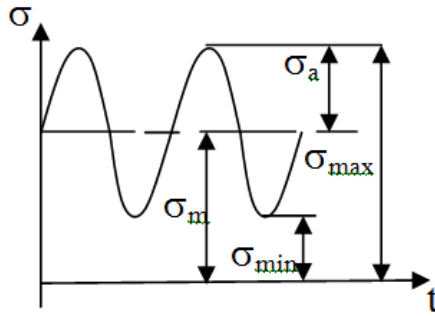
2.1.3.1 Trạng thái ứng suất

Các vật liệu làm việc trong điều kiện chất tải không ổn định thường gây ra những ứng suất khác nhau, dẫn đến sự phá hủy mỏi không theo quy luật tuyến tính.

Ứng xử của vật liệu đối với tải trọng rất khác nhau và việc đưa ra một quy luật chung cho mọi trường hợp là không thể thực hiện được.

Khi làm việc, tải trọng tác dụng lên chi tiết máy có thể gây nên các loại ứng suất: kéo, nén, uốn, xoắn, đập, cắt, tiếp xúc...

Ứng suất sinh ra trong chi tiết máy có thể thay đổi hoặc không thay đổi. Một vòng thay đổi ứng suất từ trị số giới hạn này đến trị số giới hạn khác rồi trở về giá trị ban đầu được gọi là chu trình ứng suất. Thời gian để thực hiện một chu trình ứng suất gọi là chu kỳ ứng suất. Một chu trình ứng suất được biểu diễn ở Hình 2.2.



Hình 2.2. Chu trình ứng suất

Trong đó:

- Biên độ ứng suất:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (2.1)$$

- Ứng suất trung bình:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (2.2)$$

- Hệ số tính chất chu trình:

$$r = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \quad (2.3)$$

Phần lớn chi tiết máy chịu ứng suất thay đổi theo chu trình không đối xứng, nghĩa là các giới hạn ứng suất (σ_{\max} , σ_{\min}) không bằng nhau về trị số. Ứng suất tác dụng lên chi tiết máy được chia thành 2 phần: thành phần ứng suất không đổi hay còn gọi là ứng suất trung bình σ_m là nguyên nhân chủ yếu gây nên sự mỏi, và thành phần ứng suất thay đổi có biên độ ứng suất σ_a . Qua đồ thị ở Hình 2.2 ta thấy nếu ứng suất trung bình σ_m là ứng suất kéo ($\sigma_m > 0$) càng lớn thì trị số giới hạn của biên độ ứng suất càng giảm xuống, nghĩa là khi ứng suất trung bình là kéo càng tăng lên, thì ứng suất biên độ σ_a tuy nhỏ nhưng cũng có thể gây ra sự phá hủy mỏi. Trong chu trình đối xứng với $\sigma_m = 0$ trị số giới hạn của biên độ ứng suất σ_a bằng giới hạn bền mỏi trong chu trình đối xứng σ_{-1} . Khi ứng suất trung bình là nén ($\sigma_m < 0$) trị số giới hạn của biên độ ứng suất σ_a tăng lên, nghĩa là nếu chi tiết máy chịu thành phần ứng suất tĩnh là nén thì giới hạn ứng suất biên độ σ_a có thể cao hơn giới hạn bền mỏi trong chu trình đối xứng σ_{-1} .

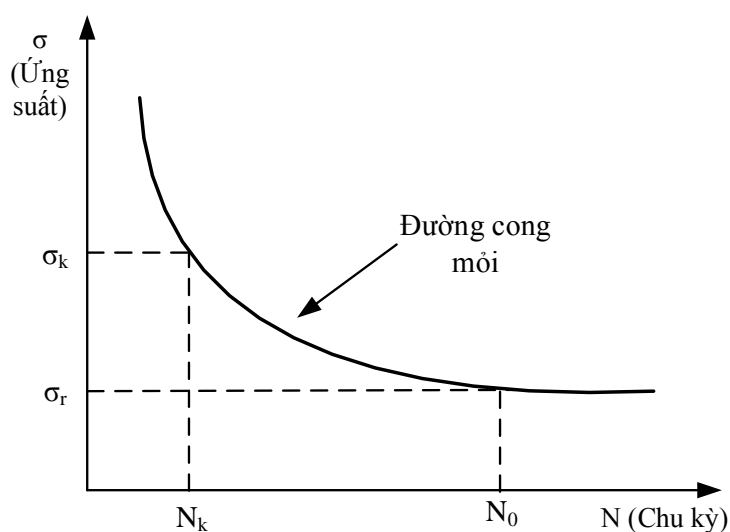
Trường hợp chi tiết máy chịu ứng suất phức tạp như vừa chịu uốn vừa chịu xoắn hoặc trong chi tiết máy có tác dụng của ứng suất thay đổi với biên độ ứng suất pháp σ_a và biên độ ứng suất tiếp τ_a . Để đánh giá độ bền mỏi của chi tiết máy trong những trường hợp này người ta dùng thuyết bền ứng suất tiếp lớn nhất hoặc thuyết bền thế năng biến đổi hình dạng để tính toán. Trong một số trường hợp người ta dùng hệ thức Gauss thực nghiệm:

$$\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_a}{\tau_{-1}}\right)^2 = 1 \quad (2.4)$$

Nghiên cứu thực nghiệm cho thấy rằng, cùng một loại vật liệu, cùng một điều kiện làm việc, độ bền mỏi khi chịu kéo-nén, uốn, xoắn là khác nhau. Thông thường, độ bền mỏi trong trường hợp chịu xoắn của vật liệu là kém nhất, điều này càng thể hiện rõ nét khi có môi trường ăn mòn.

2.1.3.2 Phương trình 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. 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 2.3.



Hình 2.3. Đường cong mỏi Wöhler [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 nhiều 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:

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

Trong đó C và m là hằng số, số mũ m 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 logarit $\lg\sigma - \lg N$ có nhánh riêng là đường thẳng có phương trình:

$$N^k \cdot 10^\sigma = B \quad (\text{trong đó } k \text{ và } B \text{ là hằng số}) \quad (2.7)$$

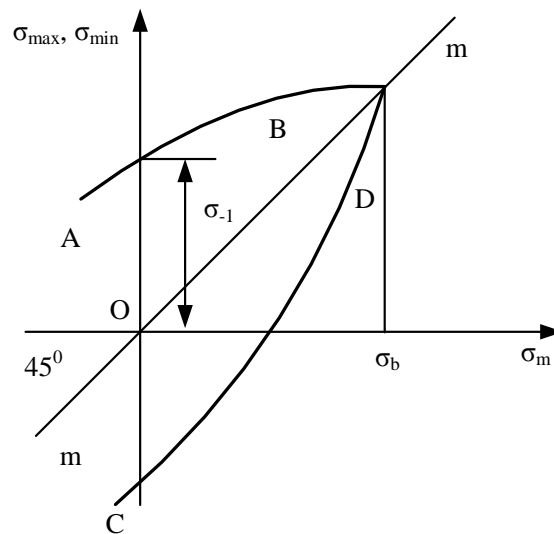
Ngoài ra, phương trình (2.5) có tiệm cận là trục hoành N , điều này không đúng với vật liệu gang hoặc thép vì đường cong mỏi của chúng tiệm cận song song với trục hoành và cách trục hoành một khoảng bằng trị số giới hạn bền mỏi dài hạn của vật liệu. Vì vậy, trên cơ sở của phân tích theo toán học thống 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 phương trình (2.8) ta thấy khi $\sigma \rightarrow \sigma_r$ thì $N \rightarrow \infty$ nghĩa là đường thẳng nằm ngang cách trục hoành bằng σ_r , lúc này σ_r là tiệm cận của đường cong mỏi.

2.1.3.3 Đồ thị các ứng suất giới hạn

Mặc dù phương pháp lập đồ thị đường cong mỏi Wöhler là phương pháp dùng phổ biến khi tiến hành các thí nghiệm mỏi của vật liệu, nhưng đường cong này không cho phép xác định giá trị ứng suất giới hạn nhỏ nhất và lớn nhất khi chu trình ứng suất thay đổi không đối xứng. Do đó hiện nay người ta còn sử dụng rộng rãi đồ thị các ứng suất giới hạn, biểu thị mối quan hệ giữa ứng suất lớn nhất σ_{\max} và ứng suất nhỏ nhất σ_{\min} của chu trình với ứng suất trung bình σ_m (Hình 2.4).



Hình 2.4. Đồ thị ứng suất giới hạn (đồ thị Smith) [61]

Tung độ một điểm nào đó trên nhánh AB cho trị số giới hạn σ_{\max} của chu trình, còn tung độ của nhánh CD ứng với trị số ứng suất giới hạn nhỏ nhất σ_{\min} của chu trình. Miền nằm giữa hai nhánh là những trị số ứng suất không làm phá hủy vật liệu. Các giao điểm của nhánh AB và CD với trục tung là các giá trị σ_{\max} và σ_{\min} của chu trình đối xứng.

Nếu đồ thị các ứng suất giới hạn của thép được lập khi số chu kỳ N bằng số chu kỳ cơ sở $N_0 = 5 \cdot 10^6 - 10^7$ chu kỳ, giao điểm này có trị số là giới hạn bền mỏi dài hạn σ_{-1} của vật liệu. Đường thẳng phân giác $m-m$ đi qua gốc tọa độ (hợp với trục hoành một góc 45°) là quỹ tích các điểm đặc trưng cho trị số ứng suất trung bình. Đoạn tung độ giữa đường $m-m$ và các nhánh AB hoặc CD cho giá trị biên độ ứng suất σ_a .

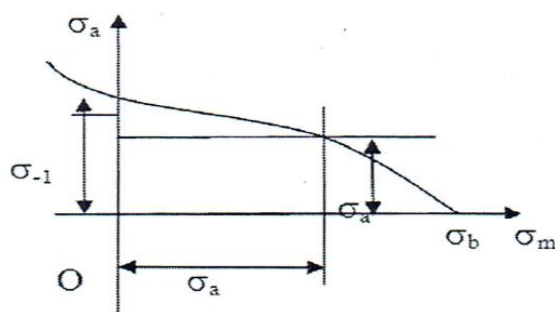
Với điều kiện chịu tải đã định, vị trí các đường trong đồ thị các ứng suất giới hạn được xác định theo số chu kỳ cơ sở N_0 chọn làm thí nghiệm. Nếu chọn số chu kỳ thí nghiệm của thép là $(5 - 10) \cdot 10^6$ thì kết quả thí nghiệm cho ta đồ thị các giới hạn bền mỗi dải hạn. Cũng có thể lập biểu đồ với các giới hạn bền mỗi ngắn hạn ứng với tuổi thọ N_k nào đó.

2.1.3.4 Đường cong thực nghiệm của các biên độ giới hạn trên tọa độ $\sigma_a - \sigma_m$

Ngoài ra, quan hệ giữa biên độ ứng suất σ_a và ứng suất trung bình σ_m còn được trình bày bằng đồ thị Hình 2.5. Tuy nhiên đồ thị này không rõ bằng các đồ thị trên vì muốn có giá trị σ_{\max} , σ_{\min} ta phải tính toán chúng qua các hệ thức:

$$\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a \quad (2.9)$$

$$\sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a$$



Hình 2.5. Đường cong thực nghiệm biểu diễn các biên độ giới hạn trên hệ tọa độ $\sigma_a - \sigma_m$ [61]

Do có sự phân tán tuổi thọ, nghĩa là trong cùng một điều kiện chịu tải của các mẫu thử giống nhau, kết quả thu được về tuổi thọ là khác nhau. Có nhiều nguyên nhân phức tạp gây nên phân tán tuổi thọ, trong đó có những nguyên nhân do yếu tố ngẫu nhiên về luyện kim, về phương pháp gia công để lại các khuyết tật không giống nhau trong các mẫu thử,...

2.1.4 Những yếu tố ảnh hưởng đến độ bền mỏi

2.1.4.1 Vật liệu

Vật liệu có ảnh hưởng lớn đến độ bền mỏi của chi tiết máy. Chi tiết máy được chế tạo bằng vật liệu có cơ tính cao, độ bền mỏi của chi tiết sẽ cao vì khả năng xuất hiện các vết nứt sẽ khó khăn hơn. Thép có hàm lượng cacbon tương đối cao thì giới

hạn bền mỗi sẽ cao hơn thép có hàm lượng cacbon thấp hơn. Thép hợp kim có độ bền mỗi cao hơn thép cacbon thông thường.

Bên cạnh đó, các thành phần hóa học là một trong những nhân tố quyết định bản chất vật liệu. Có thể xét ảnh hưởng của các thành phần hóa học tới độ bền mỗi theo quan điểm lý thuyết hệ thống. Bảng 2.2 trình bày ảnh hưởng của các thành phần nguyên tố hóa học chính của vật liệu đến một số đặc trưng cơ học và mã số tương ứng.

Bảng 2.2. Quan hệ giữa thành phần hóa học và đặc trưng cơ học của vật liệu [1]

STT	Thành phần hóa học (%)	Cu	Mg	Mn
	Mã	x_1	x_2	x_3
1	Mức cơ bản	4,25	1,45	0,80
2	Thay đổi	0,55	0,22	0,15
3	Mức trên	4,80	1,70	0,95
4	Mức dưới	3,70	1,25	0,65

Để có thể thấy rõ ảnh hưởng của thành phần hóa học tới giới hạn mỗi, một cách định lượng có thể xác định giới hạn mỗi theo công thức Roger:

$$\sigma_F = \sigma_{-1} = 0,4\sigma_Y + 0,25\sigma_T \quad (2.10)$$

Trong đó: σ_F - Giới hạn mỗi

σ_Y - Giới hạn chảy

σ_T - Giới hạn bền kéo

Với $\sigma_T = (\sigma_B) = 53,54 + 0,84x_1 + 0,25x_2 + 0,24x_3 + 0,30x_1x_2 + 0,20x_2x_3$

$$\sigma_Y = (\sigma_{0,2}) = 38,1 + 0,96x_1 + 0,50x_2 + 0,54x_3 + 0,40x_1x_2 + 0,30x_3x_1 - 0,70x_2x_3$$

2.1.4.2 Tổ chức tế vi-độ hạt

Tổ chức tế vi được quyết định bởi quá trình luyện kim, gia công và nhiệt luyện. Những quá trình này tạo ra những cấu trúc hạt khác nhau và ảnh hưởng trực tiếp đến độ bền mỗi của vật liệu. Kết quả của một số nghiên cứu cho thấy ảnh hưởng của cấu trúc tế vi theo chế độ nhiệt luyện có thể thay đổi từ 1,7 - 2 lần giới

hạn mỏi.

G. M. Sinclair và W. J. Craig [1] tìm ra mối quan hệ phản ánh ảnh hưởng của kích thước hạt đến độ bền mỏi như sau:

$$\sigma_F = \sigma_{iF} + K_F \cdot h_0^{1/2} \quad (2.11)$$

- Trong đó:
- σ_F, σ_{iF} là các hằng số vật liệu
 - K_F là hệ số ảnh hưởng tổng hợp ứng suất
 - h_0 là kích thước trung bình của hạt, mm

2.1.4.3 Kích thước tuyệt đối

Thực nghiệm cho thấy khi tăng kích thước tuyệt đối của chi tiết máy, giới hạn bền mỏi sẽ giảm xuống. Để xác định ảnh hưởng của yếu tố kích thước người ta dùng hệ số ảnh hưởng của kích thước tuyệt đối ε_σ (đối với ứng suất pháp) hoặc ε_τ (đối với ứng suất tiếp), là tỉ số giữa giới hạn bền mỏi (σ_{rd} và τ_{rd}) của chi tiết máy có đường kính d với giới hạn bền mỏi (σ_{rd0} và τ_{rd0}) của mẫu chuẩn có đường kính $d_0 = 7 - 10$ mm.

$$\varepsilon_\sigma = \frac{\sigma_{rd}}{\sigma_{rd0}} \text{ hoặc } \varepsilon_\tau = \frac{\tau_{rd}}{\tau_{rd0}} \quad (2.12)$$

Độ bền giảm khi tăng kích thước tuyệt đối ($\varepsilon_\sigma < 1$ hoặc $\varepsilon_\tau < 1$) là sự không đồng đều về cơ tính của vật liệu càng tăng khi kích thước càng tăng lên, chi tiết máy có nhiều khuyết tật hơn và chiều dày tương đối của lớp bề mặt tăng bền do gia công cơ hoặc nhiệt luyện giảm xuống.

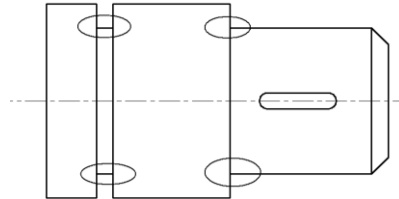
Hệ số ảnh hưởng của kích thước tuyệt đối được tra trong sổ tay chi tiết máy. Nghiên cứu cho thấy có thể tính hệ số ảnh hưởng của kích thước tuyệt đối theo công thức sau:

$$\text{- Đối với trục chịu uốn: } \varepsilon_\sigma = \left(\frac{d}{d_0} \right)^{0.12} \quad (2.13)$$

$$\text{- Đối với trục chịu xoắn: } \varepsilon_\tau = \left(\frac{d}{d_0} \right)^{-0.2} \quad (2.14)$$

2.1.4.4 Hình dạng kết cấu

Hình dạng kết cấu có ảnh hưởng lớn đến độ bền mỏi, nghĩa là ảnh hưởng đến khả năng làm việc của chi tiết máy khi chịu ứng suất thay đổi. Dưới tác dụng của tải trọng, ở những chỗ thay đổi tiết diện của chi tiết máy như góc lượn, rãnh then, lỗ,... có sự tập trung biến dạng và xảy ra tập trung ứng suất (Hình 2.6). Tại đây ứng suất thực tế lớn hơn ứng suất danh nghĩa, tính theo các công suất của sức bền vật liệu.



Hình 2.6. Những nơi tập trung ứng suất

Tỷ số giữa ứng suất lớn nhất tại chỗ tập trung ứng suất $\max \sigma$ (hoặc $\max \tau$) với ứng suất danh nghĩa σ (hoặc τ) tại điểm này, được gọi là hệ số tập trung ứng suất lý thuyết:

$$\alpha_{\sigma} = \max \frac{\sigma}{\sigma} \quad \text{hoặc} \quad \alpha_{\tau} = \max \frac{\tau}{\tau} \quad (2.15)$$

Trị số α_{σ} và α_{τ} phụ thuộc vào hình dạng kích thước chi tiết máy và chủ yếu là phụ thuộc vào hình dạng kích thước chỗ chuyển tiếp (bán kính góc lượn ρ), có khi α_{σ} và α_{τ} đạt trị số lớn từ 3 - 4 hoặc hơn nữa.

Tuy nhiên việc sử dụng trực tiếp các trị số α_{σ} và α_{τ} vào tính toán thực tế nhiều khi không thích hợp. Thí nghiệm chứng tỏ rằng do tại chỗ tập trung ứng suất xuất hiện trạng thái căng khối và do ảnh hưởng của biến dạng dẻo cho nên các đỉnh nhọn ứng suất cục bộ tùy theo điều kiện chịu tải, một phần nào được san bằng. Ngoài ra còn có hiện tượng tăng bền do hiện tượng cứng nguội trên lớp bề mặt khi gia công cơ khí cũng ảnh hưởng đến độ bền mỏi. Do vậy, để đánh giá sự giảm độ bền của chi tiết máy có tập trung ứng suất không thể dùng các trị số lý thuyết α_{σ} và α_{τ} mà phải dùng hệ số tập trung ứng suất thực tế k_{σ} và k_{τ} , là tỉ số giữa giới hạn bền mỏi α_{τ} của mẫu nhẵn không có tập trung ứng suất với giới hạn bền mỏi $\alpha_{\tau c}$ của chi tiết máy có tập trung ứng suất và có cùng kích thước tiết diện:

$$k_{\sigma} = \frac{\alpha_r}{\alpha_{rc}} \text{ hoặc } k_{\tau} = \frac{\tau_r}{\tau_{rc}} \quad (2.16)$$

Trong đó: α_r và τ_r là giới hạn bền mỗi của mẫu không có tập trung ứng suất.

α_{rc} và τ_{rc} là giới hạn bền mỗi của mẫu có tập trung ứng suất.

Thông thường hệ số tập trung ứng suất thực tế nhỏ hơn hệ số tập trung ứng suất lý thuyết ($k_{\sigma} < \alpha_{\sigma}$, $k_{\tau} < \alpha_{\tau}$).

Các chi tiết máy có hình dạng giống nhau có sự tập trung ứng suất như nhau tại chỗ chuyển tiếp, nghĩa là có cùng hệ số tập trung ứng suất lý thuyết tại đây là α_{σ} (hoặc α_{τ}) nhưng nếu làm bằng vật liệu khác nhau thì hệ số tập trung ứng suất thực tế sẽ khác nhau. Đối với vật liệu nhạy với sự tập trung ứng suất thì hệ số tập trung ứng suất thực tế sẽ lớn hơn.

Giá trị của hệ số k_{σ} , k_{τ} có thể tra ở các bảng số liệu trong sổ tay thiết kế cơ khí, theo hình dạng và kích thước cụ thể của những chỗ có tập trung ứng suất, trên từng loại chi tiết máy khác nhau.

2.1.4.5 Công nghệ gia công cơ

Chất lượng bề mặt chi tiết máy sau gia công cơ được đặc trưng bởi ứng suất dư và độ nhám của lớp bề mặt. Ứng suất dư luôn tồn tại trong lớp bề mặt sau gia công. Nếu ứng suất kéo tồn tại trong lớp bề mặt sẽ gây giảm độ bền mỗi, ngược lại ứng suất dư nén sẽ làm tăng độ bền mỗi của chi tiết.

Công nghệ gia công bề mặt quyết định trạng thái bề mặt chi tiết máy và ảnh hưởng quan trọng đến độ bền mỗi của chi tiết máy. Lớp bề mặt chi tiết máy thường là lớp chịu ứng suất lớn nhất vì các vết nứt mỗi thường sinh ra từ bề mặt của chi tiết máy. Mọi tổn hại trên bề mặt như các vết xước gia công, các khuyết tật kim loại, các vết gỉ,... đều gây tập trung ứng suất, có thể là nguồn phát sinh các vết nứt mỗi và làm giảm giới hạn bền mỗi.

2.1.5 Những chỉ tiêu phá hủy mỗi

2.1.5.1 Chỉ tiêu về ứng suất và biến dạng

Nếu gọi S là ứng suất, N là số chu kỳ ứng suất tương ứng thì chỉ tiêu về ứng

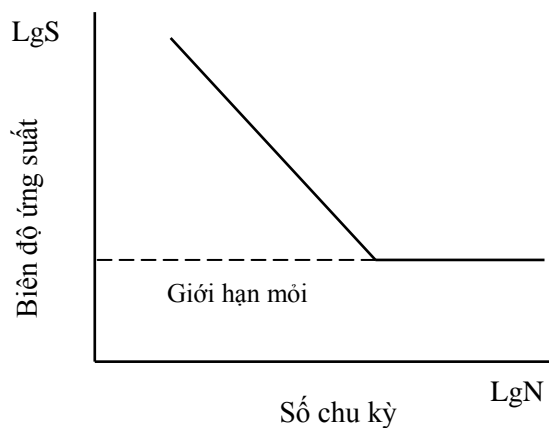
suất và biến dạng lần lượt là:

$$S_i^m \cdot N_i = \text{const} \quad \text{hay} \quad F_n = \left(\frac{N}{n}\right)^{K_n} \quad (2.17)$$

Trong đó: F_n - độ bền mỗi ứng với N chu kỳ.

S - ứng suất ứng với N chu kỳ.

K_n - số mũ của đường cong Wöhler.



Hình 2.7. Đường cong Wöhler trong hệ trục logarit

Chỉ tiêu biến dạng:

$$e_p \cdot N_p^k = C_e \quad (2.18)$$

Trong đó: e_p - độ dẫn dài tương ứng với lúc phá hủy.

N_p - số chu kỳ ứng suất ứng với lúc phá hủy.

k - số mũ ($\sim 0,01 \div 0,1$)

C_e - hằng số.

Tiêu chí này thường được áp dụng để so sánh, đánh giá độ bền mỏi của các chiều dày và phương pháp phủ. Dựa trên cùng ứng suất áp tải có thể đánh giá chu kỳ mỏi một cách chính xác (Hình 2.7).

2.1.5.2 Chỉ tiêu về năng lượng

C. E. Felner và J. D. Marrow [1] đã đưa ra chỉ tiêu với nội dung như sau: sự phá hủy mỏi bắt đầu xảy ra tại thời điểm khi mà tổng số năng lượng tản mát (quá trình này chỉ xảy ra một chiều) đạt tới giá trị đúng bằng công biến dạng riêng khi

chất tải tĩnh. Trị số tới hạn của năng lượng tản mát trong vật liệu sau N chu kỳ ứng suất là (xem mô tả ở Hình 2.8):

$$D_{sum} = 2N \int_0^{\Delta \varepsilon} \sigma \cdot d_{epI} \quad (2.19)$$

Số chu kỳ ứng suất (hay tuổi thọ) khi phá hủy N_p được xác định từ phương trình:

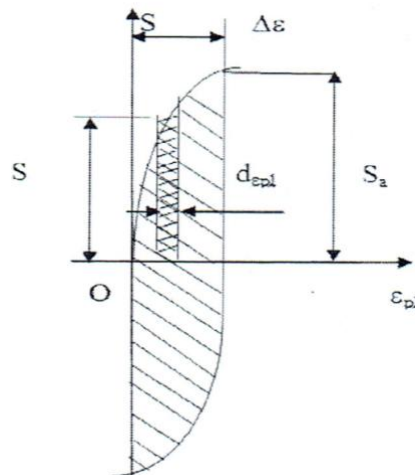
$$\lg \sigma_a = K_0 - \left(\frac{n}{n+1}\right) \lg N_p \quad (2.20)$$

Trong đó:

$$K_0 = \lg \left[\frac{D_{sum}(1+n)}{2K} \right]^{\frac{n}{n+1}}$$

n – hằng số tăng bền do biến dạng chu kỳ

K – hằng số phụ thuộc vật liệu



Hình 2.8. Xây dựng mối quan hệ giữa ứng suất và biến dạng dựa vào năng lượng

2.1.5.3 Chỉ tiêu về vết nứt mỏi

Động học quá trình phá hủy mỏi bao giờ cũng có các giai đoạn xuất hiện, hình thành và phát triển của vết nứt. Vết nứt mỏi lan truyền với tốc độ nhất định và khi đạt được mức độ lan truyền sâu trong vật liệu thì sự phá hủy hoàn toàn sẽ xảy ra. Sự tích lũy phá hủy mỏi là cả một quá trình trong một khoảng thời gian dài, còn sự phá

hủy xảy ra một cách tức thời. Gọi v là tốc độ lan truyền vết nứt, người ta xây dựng được mối quan hệ:

$$v = \frac{dl}{dt} = f(S, F, C) \quad (2.21)$$

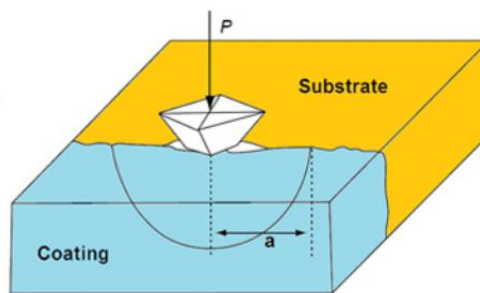
Trong đó: S - trạng thái ứng suất

F - đặc trưng hình học của chi tiết máy

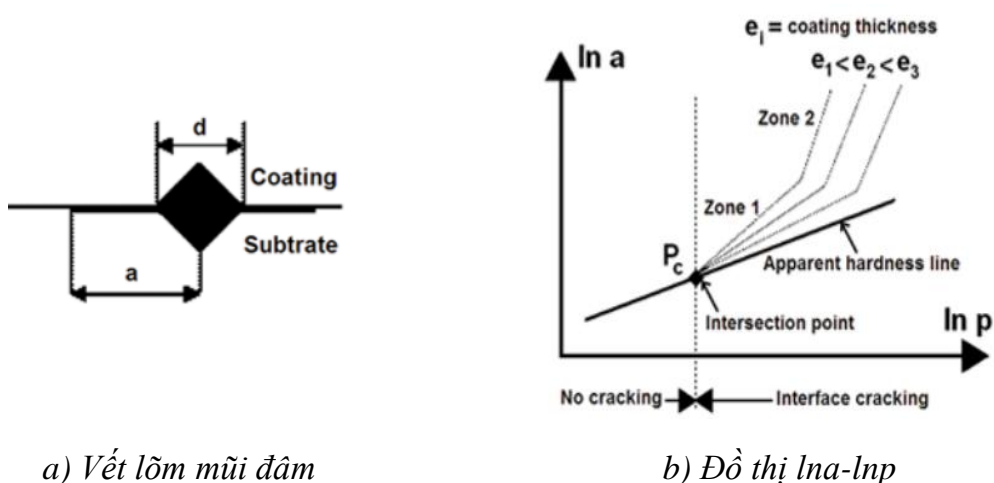
C - điều kiện vật liệu và điều kiện làm việc của chi tiết máy

2.2 Độ bám dính và phương pháp đánh giá

Độ bám dính của lớp phủ là tính chất quan trọng, bởi chúng là yếu tố quyết định đến độ bền làm việc của lớp phủ đặc biệt trong trường hợp làm việc có tải trọng tác dụng. Tiêu chuẩn ISO 19207-2016 [62] đã chỉ ra cách xác định độ bám dính của lớp phủ và nền dựa trên phương pháp đo Vicker.



Hình 2.9. Mũi đâm tại lớp tiếp giáp lớp phủ/nền [37]



a) Vết lõm mũi đâm

b) Đồ thị $\ln a - \ln p$

Hình 2.10. Vết lõm mũi đâm và đồ thị $\ln a - \ln p$ [37]

Nguyên lý đo là đặt mũi kim cương tại giao diện giữa lớp phủ và nền. Sau đó gia tải lực tác dụng P (Hình 2.9) đến khi xuất hiện vết nứt như Hình 2.10a. Các giá trị lực này, chiều dài vết nứt a và nửa đường chéo d/2 được đo chính xác qua kính hiển vi và các giá trị này cùng lực tác dụng P được thể hiện trong hệ tọa độ ln a-ln P như Hình 2.10b. Giao điểm giữa đường thẳng ln P-ln d và ln P-ln a có tọa độ là (P_c, a_c). Độ bền bám dính của lớp phủ K_{ca} (MPa.m^{1/2}) được tính qua công thức [62]:

$$K_{ca} = 0.015 \frac{P_c}{a_c^{3/2}} \left(\frac{E}{H} \right)^{1/2} \quad (2.22)$$

Với:

$$\left(\frac{E}{H} \right)^{1/2} = \frac{\left(\frac{E}{H} \right)_c^{1/2}}{1 + \left(\frac{H_c}{H_s} \right)^{1/2}} + \frac{\left(\frac{E}{H} \right)_s^{1/2}}{1 + \left(\frac{H_s}{H_c} \right)^{1/2}} \quad (2.23)$$

Trong đó H - độ cứng (GPa)

E - modul đàn hồi (GPa)

P - lực tác dụng (N)

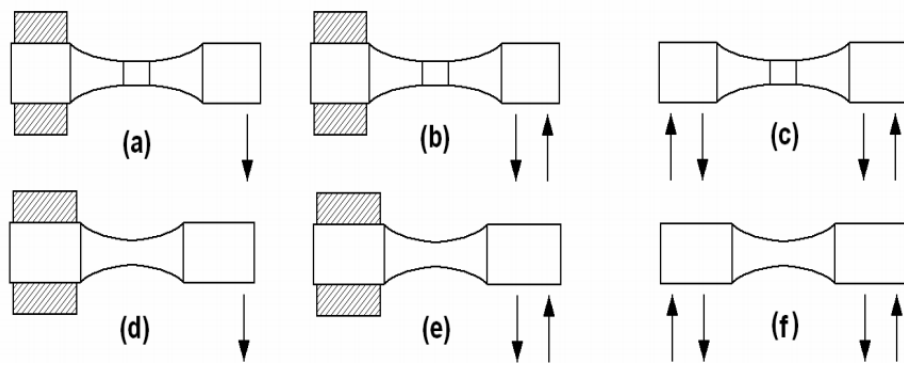
a - chiều dài vết nứt (μm)

Chỉ số c (coating) và s (substrate) tương ứng với lớp phủ và nền

2.3 Độ bền mỏi và phương pháp đánh giá

Trong quá trình thực hiện thí nghiệm độ bền mỏi cho vật liệu kim loại được tuân theo các tiêu chuẩn quốc tế. Hiện nay, có 3 tiêu chuẩn quốc tế JSME S002 (The Japan Society of Mechanical Engineers), ASTM E739 (American Society for Testing and Materials) và ISO 1143-2010 (International Organization for Standardization) được áp dụng trong thí nghiệm đánh giá độ bền mỏi. Tuy nhiên, tiêu chuẩn ISO 1143-2010 [63] được sử dụng nhiều hơn cả và tương thích với tiêu chuẩn Việt Nam (TCVN).

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



Hình 2.11. Các dạng mẫu thử nghiệm mỏi theo tiêu chuẩn ISO 1143-2010 [63]

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

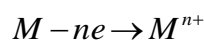
Mẫu dạng trụ 2.11c được sử dụng cho phương pháp thử mỏi uốn 4 điểm được thực hiện trong nghiên cứu này. Loại mẫu này thuận lợi cho quá trình đo chiều dày và ứng suất dư lớp phủ bằng phương pháp không phá hủy.

2.4 Nguyên lý mạ và tính chất của lớp phủ crôm

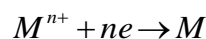
2.4.1 Nguyên lý của quá trình mạ crôm

Nguyên lý mạ crôm là quá trình mạ điện. Nó là một quá trình điện phân, trong đó anode xảy ra quá trình oxy hóa (hòa tan kim loại hay giải phóng khí oxy) còn cathode xảy ra quá trình khử (khử ion kim loại từ dung dịch thành lớp kim loại bám trên vật mạ hay quá trình phụ giải phóng hydro) khi có dòng điện một chiều đi qua dung dịch điện phân [64]. Điều kiện tạo thành lớp mạ điện:

- Trên anode xảy ra quá trình hòa tan kim loại anode:



- Trên cathode xảy ra quá trình cation phóng điện trở thành kim loại mạ:

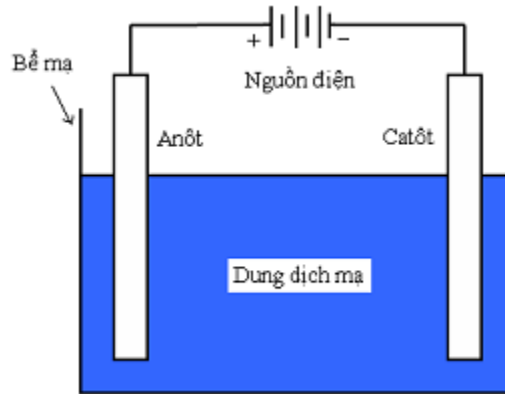


Mạ điện được dùng trong nhiều ngành công nghệ khác nhau để chống ăn mòn, phục hồi kích thước, trang sức, chống ăn mòn, tăng độ cứng, phản quang và nhiệt, dẫn điện, thấm dầu, dẫn nhiệt...

Một hệ mạ điện gồm các thành phần sau (Hình 2.12):

- Bể mạ, dung dịch mạ

- Cathode (vật cần mạ)
- Anode
- Nguồn điện một chiều.

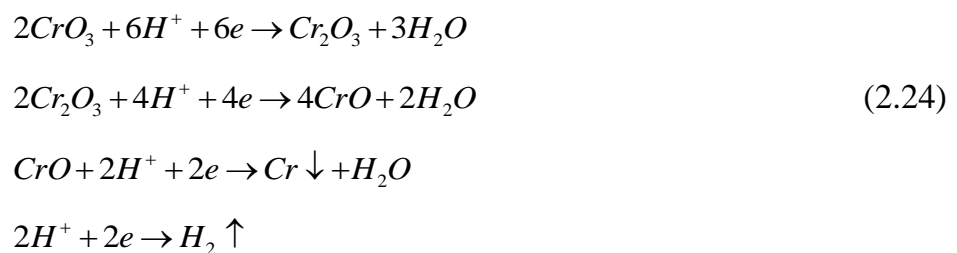


Hình 2.12. Sơ đồ hệ mạ điện

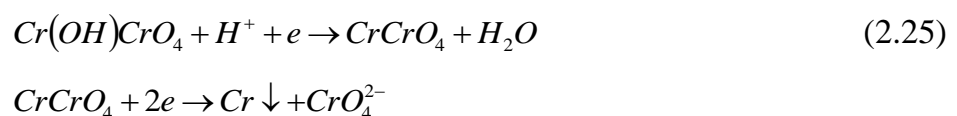
Tuy nhiên, mạ crôm có một số điểm khác biệt so với các phương pháp mạ khác như:

- Sự kết tủa của kim loại crôm từ dung dịch axit crômíc (H_2CrO_4) chứ không phải từ dung dịch muối hòa tan của kim loại.
- Dung dịch phải nhất thiết phải có anion hoạt hóa (còn gọi là anion xúc tác) thường là SO_4^{2-} , F^- , SiF_6^{2-} . Dung dịch mạ crôm rất nhạy với các chất bẩn.

Phản ứng diễn ra trên cathode theo từng nấc, từ crôm có số oxy hóa 6^+ (CrO_3) chuyển thành crôm có số oxy hóa 3^+ (Cr_2O_3) rồi crôm có số oxy hóa 2^+ (CrO) và cuối cùng thành crôm kim loại:



Thuyết Müller cho rằng, trong khoảng không gian sát cathode có hình thành hợp chất $Cr(OH)CrO_4$ và bị khử theo quá trình:



2.4.2 Tính chất của lớp mạ crôm

Crôm kim loại chế tạo bằng phương pháp hoàn nguyên chỉ tương đối cứng (cỡ 400 –500 kg/mm², theo độ cứng Brinell - HB), nhưng crôm mạ điện tùy theo điều kiện mạ điện lại có độ cứng rất cao (HB từ 900 - 1100 kg/mm²) và nhiều tính chất cơ lý cũng hoàn toàn khác hẳn crôm kim loại, lý do chủ yếu là vì lớp mạ crôm chứa khá nhiều oxy và hydro so với crôm kim loại. Lớp mạ crôm ngoài độ cứng cao còn có các đặc điểm nổi bật khác là hệ số ma sát bé ($f = 0,12$) nên rất bền mài mòn; chống chịu ăn mòn rất tốt; lớp oxit tự nhiên trên bề mặt rất kín sít giữ cho crôm luôn trắng xanh, không bị mờ đi theo thời gian; độ bám dính rất tốt với nhiều loại kim loại nền; làm việc tốt ở nhiệt độ cao đến 350⁰C. Tuy nhiên lớp mạ crôm cũng có những nhược điểm là độ giòn cao, ứng suất dư kéo lớn.

2.5 Phun phủ HVOF

2.5.1 Lý thuyết về sự hình thành lớp phủ

Trong quá trình phát triển công nghệ phun phủ nhiệt, nhiều nhà khoa học đã xây dựng các lý thuyết về sự hình thành lớp phủ, trong đó các lý thuyết đóng vai trò quan trọng như lý thuyết của Pospisil - SehyI, Schoop, Karg, Katsch, Reininger và Schenk [58, 59, 65].

Lý thuyết Pospisil - SehyI cho rằng: lớp phủ được hình thành do các giọt kim loại lỏng bị dòng khí nén thổi với một tốc độ rất cao (trung bình khoảng 200 m/s). Các giọt này bị phá vỡ thành nhiều hạt rất nhỏ dạng spherul mà có dạng là hình cầu hoặc dạng không đồng đều, đa dạng.

Sự oxy hóa kim loại thực chất bắt đầu từ quá trình chảy và tiếp tục diễn ra trong quá trình bay của các hạt cho đến khi va đập vào bề mặt phun, số lượng oxit nhiều hay ít là nhân tố ảnh hưởng đến chất lượng lớp phủ. Theo thuyết này các phần tử kim loại trong thời điểm va đập trên bề mặt phun là ở thể lỏng.

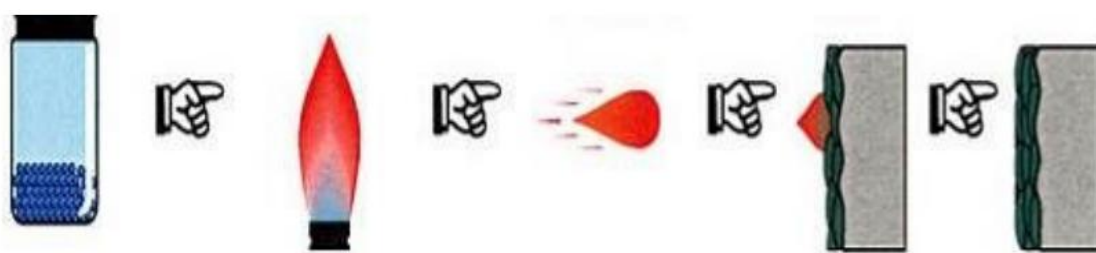
Lý thuyết Schoop cho rằng: khí nén cung cấp năng lượng cho các hạt kim loại khi va đập lên bề mặt bị phun có sự thay đổi nhiệt. Khi rời khỏi miệng phun bắt đầu bị nguội và đông đặc rất nhanh do tác dụng của dòng khí nén. Trong thời điểm va đập chúng sẽ biến dạng dẻo do vậy chúng liên kết với nhau thành những lớp liên kết

chắc chắn. Nhiệt độ của tia kim loại bị giảm xuống rất thấp còn khoảng 50°C đến 100°C nên có thể phủ lên chúng vật liệu dễ cháy mà không xảy ra sự cháy vật liệu nền [59].

Lý thuyết Karg, Katsch và Reiningger lại đưa ra quan điểm: những hạt kim loại bị nguội và đông đặc là do tác dụng của nguồn năng lượng động năng và khí nén. Mặt khác trong quá trình bay từ vòi phun các hạt đã ở trạng thái nguội nên không xảy ra sự biến dạng dẻo khi va đập [59].

Lý thuyết Schenk lại đưa ra nhìn nhận khác: tác giả cho rằng nhiệt độ của các hạt phun phải ở nhiệt độ chảy lỏng để xảy ra sự hàn chặt giữa chúng với nhau. Có nghĩa là, ở thời điểm va đập trên bề mặt bị phun sẽ bị đốt nóng đến nhiệt độ chảy để xảy ra sự hàn gắn giữa các phần tử phun với kim loại nền cơ sở, nhưng thực tế không hoàn toàn như vậy [59].

Từ những quan điểm lý thuyết về sự hình thành lớp phủ của các nhà khoa học trên thế giới đã cho thấy có những quan điểm khác nhau về trạng thái của các hạt phun tại thời điểm va đập. Lý thuyết mô tả được chấp nhận rộng rãi nhất về sự hình thành lớp phủ được đặc trưng bởi 4 giai đoạn thể hiện trên Hình 2.13, đó là: giai đoạn nung nóng và làm nóng chảy vật liệu phun, giai đoạn phân tán hình thành giọt kim loại lỏng, giai đoạn bay của các giọt kim loại, giai đoạn va đập của các giọt kim loại vào bề mặt kim loại nền để hình thành lớp phủ [65- 67].



Hình 2.13. Các giai đoạn quá trình phủ HVOF [65]

2.5.1.1 Giai đoạn nung nóng và nóng chảy vật liệu phun

Trong quá trình phun, khí cháy (axetylen, propan,...), oxy được đưa vào buồng đốt, tại đây chúng tạo thành hỗn hợp khí cháy. Khi được mồi cháy, khí nén được mở và được cấp vào buồng phun tạo ra sản phẩm cháy có nhiệt độ và áp suất cao. Sau đó bột phun được đưa vào buồng đốt bằng khí vận chuyển (nitơ), lúc này chúng

được gia nhiệt đến nóng hoặc nóng chảy và bị nén với áp suất cao. Các phần tử phun sau giai đoạn này sẽ được dịch chuyển theo dòng khí cháy với tốc độ siêu âm và vượt siêu âm nhờ kết cấu ống Laval, theo định luật bảo toàn lưu lượng.

2.5.1.2 Giai đoạn phân tán

Trong quá trình phun kim loại, vật liệu phun được nung nóng đến nhiệt độ cao hơn nhiệt độ chảy của chúng để tạo thành giọt. Giữa vật liệu phủ và môi trường khí xảy ra quá trình khuếch tán và sự tác dụng hóa lý với nhau. Ứng suất bề mặt, nội năng, nhiệt độ, hệ số dẫn nhiệt, khả năng co rút gây ảnh hưởng đến cấu trúc bên trong và các tính chất khác của vật liệu phủ. Trong quá trình chảy cũng xảy ra sự đốt cháy một số thành phần hóa học trong vật liệu phủ. Sự lớn lên của giọt kim loại nóng chảy tồn tại cho đến khi lực động học của dòng không khí nén lớn hơn ứng suất bề mặt kim loại phủ sẽ làm các giọt kim loại bị phân tán thành rất nhiều hạt nhỏ, những hạt này sẽ tạo nên những tia phun kim loại.

2.5.1.3 Giai đoạn bay

Tốc độ bay của các hạt tăng dần từ vùng đốt đến đầu ra của súng phun, nhưng khi ra khỏi nòng súng phun thì tốc độ giảm dần do ma sát với không khí. Các giọt kim loại nóng chảy ở nhiệt độ cao phân tán thành chùm hạt nhỏ tương tác với môi trường không khí, một phần vật liệu phun bị oxy hóa và hòa tan khí. Do vậy, các phần tử phun kim loại bị bao bọc bởi một lớp oxit, lớp oxit này sẽ lớn lên theo khoảng cách bay. Trong quá trình bay, do chênh lệch áp suất bên trong hạt với áp suất môi trường, các hạt tiếp tục vỡ phân tán thành nhiều hạt nhỏ. Dòng phun có dạng hình phễu, góc loe của phễu phụ thuộc góc mở của ống Laval, tốc độ phun và đường kính của đầu phun. Ngoài ra, các phần tử cũng bị ảnh hưởng của rất nhiều nhân tố và biểu thị ở những phản ứng không đồng nhất. Do đó khi phun kim loại phải tính toán đến các vấn đề:

- Các hạt kim loại tách ra ở trạng thái lỏng hay bán lỏng.
- Các phần tử phun luôn bị thay đổi tốc độ bay trong trường gia tốc.
- Các hạt luôn phản ứng với môi trường xung quanh chứa oxy, nitơ, hơi nước và các thành phần hoá học khác.

- Khả năng hoà tan của khí phụ thuộc vào nhiệt độ cũng như áp lực riêng của khí.

2.5.1.4 Giai đoạn va đập

Khi va đập với bề mặt nền, các hạt bị biến dạng, tuy nhiên để hình thành được lớp phủ thì hạt phun phải bám dính được trên nền phun. Sự bám dính của chất phủ lên trên nền phun phụ thuộc nhiều yếu tố: tốc độ va đập, nhiệt độ hay trạng thái của giọt vật liệu (nóng chảy, bán lỏng, rắn), thuộc tính vật lý của bột phun, trạng thái bề mặt của chi tiết được phun. Các giọt vật liệu phun, khi va đập với chi tiết nền bị biến dạng từ dạng cầu thành các phiến mỏng. Nhờ các lực va đập cơ học cũng như các lực liên kết giữa vật liệu phủ với nền, vật liệu phun bám dính lên trên bề mặt nền và bám dính với các lớp phun trước. Trong quá trình hình thành lớp phủ, do ở nhiệt độ cao nên xảy ra quá trình khuếch tán giữa các nguyên tử tạo thành khối vật liệu phủ tương đối đồng nhất. Sự truyền nhiệt làm cho các hạt phủ khi va đập bị nguội và kèm theo thể tích giảm.

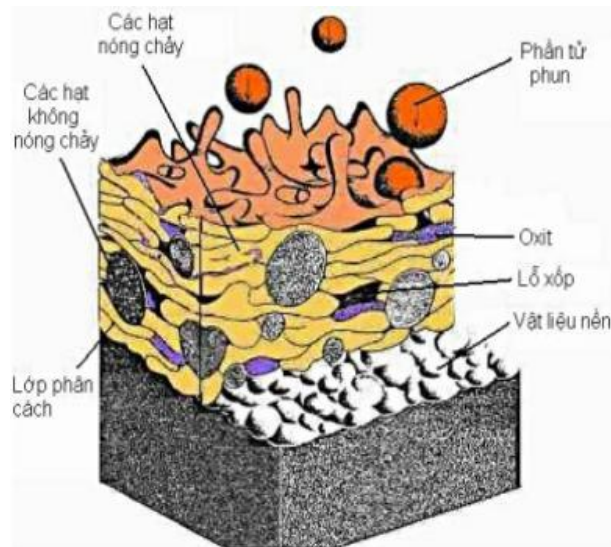
2.5.2 Tính chất của lớp phủ

Trong lớp phủ phun nhiệt tồn tại oxit và độ xốp. Trong quá trình bay từ súng đến bề mặt nền, các hạt có sự tương tác hóa học và vật lý với môi trường xung quanh. Lớp phủ phun nhiệt được cấu tạo gồm các lớp mỏng có đường biên nằm song song với bề mặt nền. Mỗi lượt phun thường có từ một đến nhiều lớp mỏng, tùy thuộc vào các thông số phun (lưu lượng cấp bột phun, khoảng cách phun, kích thước hạt bột phun, tốc độ di chuyển của đầu phun). Các điều kiện hình thành biên liên kết giữa các lớp và giữa các hạt được xác định bởi khoảng thời gian chúng tồn tại trong khí quyển.

Trong khi phun, thời gian tương tác giữa các hạt với môi trường xung quanh rất ngắn, sau đó bị đông đặc và nguội đi nhanh chóng làm mất khả năng tương tác. Do thời gian ngắn như vậy nên quá trình khuếch tán không sâu và ít ảnh hưởng tới độ bám của hạt. Sự gắn kết của hạt với nền, chủ yếu phụ thuộc vào mức độ liên kết vật lý, mà biểu hiện bề ngoài của nó là sự xuất hiện những khoảng bám dính trên mặt tiếp xúc. Sự hình thành lớp phun là quá trình xếp vô số và liên tiếp các hạt phun

bị biến dạng lên bề mặt nền, khi các các hạt phun tiếp xúc với nhau hoặc tiếp xúc với bề mặt mà không điền đầy khe hở không gian sẽ gây ra hiện tượng rỗ xốp trong lớp phủ. Quá trình tiếp xúc vật lý không hạn chế sự tương tác bởi vì dưới tác động xung lực thì các hạt nóng chảy sẽ nhanh chóng bị dàn mỏng ra và bị ép vào mặt lớp nền. Dưới đây là hình ảnh về hình thái của lớp kim loại mỏng và đập trên bề mặt kim loại nền được biểu diễn trong Hình 2.14, sơ đồ mặt cắt cấu trúc tế vi của lớp phủ phun nhiệt được thấy rõ.

Chất lượng và các tính chất của các lớp phun nhiệt chủ yếu phụ thuộc vào kích thước hạt phun, nhiệt độ hạt, tốc độ di chuyển giữa các giọt kim loại va chạm vào vật liệu nền và vào mức oxy hóa của các giọt kim loại với bề mặt vật liệu nền khi phun. Các yếu tố này rất khác nhau khi sử dụng các quy trình phun khác nhau. Các lớp phun kim loại và hợp kim tạo bởi bằng quá trình phun nhiệt khí tốc độ cao HVOF không còn giữ nguyên các thành phần hóa học ban đầu của chúng. Các tính chất lớp phun có thể thay đổi nhiều tùy thuộc vào quy trình phun.

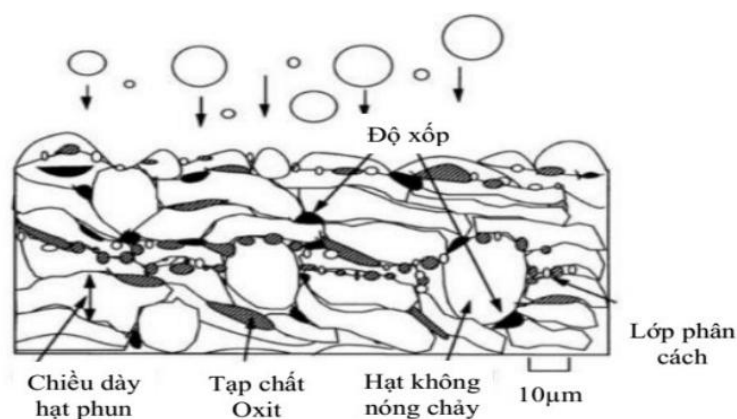


Hình 2.14. Sơ đồ mặt cắt cấu trúc của lớp phủ phun nhiệt [59]

2.5.2.1 Cấu trúc lớp phủ

Cấu trúc lớp phủ được hình thành từ những khối nhỏ kim loại phủ, được bồi đắp sát nhau và chồng chất lên nhau. Khi phun, dòng chất phun được gia tốc liên tục đến bề mặt kim loại nền, các phần tử phun khí va đập với kim loại nền, ở nhiệt độ nóng chảy, chúng bị biến dạng. Việc liên kết với vật liệu nền và với phần vật

chất đã được phủ từ trước, trước hết là sự bám dính cơ học, sau là nhờ nhiệt độ cao nên xảy ra quá trình khuếch tán, tạo thành khối vật liệu phủ tương đối đồng nhất. Trong lớp phủ luôn có lỗ xốp, ngậm khí và các tạp chất như ở Hình 2.15. Lỗ xốp hình thành do những khoảng trống không được điền đầy và do khí tích tụ. Các tạp chất chủ yếu là các oxit hình thành trong quá trình phun. Đặc trưng cấu trúc của lớp phủ là: do kim loại phun ở trạng thái lỏng khi va chạm với vật liệu nền bị nguội nhanh, nên tổ chức kim loại không phải tổ chức cân bằng. Nếu kim loại phủ là thép thì thường có tổ chức maxtenxit và bاینit. Chính vì vậy, lớp phủ thường có độ cứng bề mặt cao.



Hình 2.15. Cấu trúc lớp phủ nhiệt [59]

2.5.2.2 Ứng suất dư

Một trong những vấn đề quan trọng nhất trong việc hình thành của lớp phủ phun nhiệt là sự hình thành của ứng suất dư, đặc biệt là đối với lớp phủ có chiều dày lớn [68,69]. Trong quá trình phun nhiệt khí tốc độ cao HVOF, các hạt nóng chảy hoặc bán nóng chảy va đập vào bề mặt nền hoặc vật liệu nóng chảy trước đó với tốc độ cao. Vì thế, mặc dù các hạt phun có khối lượng nhỏ nhưng vẫn làm biến dạng nhất định đến bề mặt vật liệu có trước. Sự tác động của mỗi hạt chịu ảnh hưởng của các trường ứng suất. Các trường ứng suất này lại phụ thuộc vào trạng thái rắn của vật liệu có trước. Ngoài những tác động cơ học thì tác động nhiệt cũng ảnh hưởng đến việc tăng ứng suất. Các hạt được nung nóng trong buồng đốt của súng phun nhiệt khí tốc độ cao HVOF và được phun lên bề mặt vật liệu nền. Trong quá trình tác động lên bề mặt vật liệu nền, các hạt nóng chảy bị biến dạng thành các lớp

mỏng, nhiệt độ của chúng giảm xuống và đông đặc. Nhiệt độ giảm mạnh tạo ra ứng suất dư trong mỗi lớp mỏng. Trong quá trình phun HVOF, quá trình chuyển pha cũng có thể tạo ra ứng suất dư [70]. Có hai cơ chế chính tạo ra ứng suất dư trong lớp phủ là: sự tôi và làm nguội.

a. Ứng suất do tôi

Theo Pawlowski có từ 5 đến 15 lớp mỏng hình thành trong mỗi lần phun [68]. Khi đông đặc, các lớp phủ này co lại, chúng liên kết chặt chẽ với nhau và bám lấy bề mặt nền, tạo ra ứng suất kéo trong mỗi lớp phủ như Hình 2.16.

Ứng suất kéo do tôi là không thể tránh khỏi và có thể được tính như sau:

$$\sigma_q = \alpha_c (T_m - T_s) E_c \quad (2.26)$$

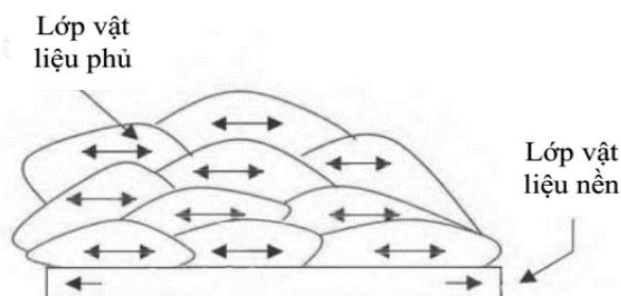
Trong đó: σ_q : Ứng suất do tôi (Pa);

E_c : Mô đun đàn hồi của lớp phủ (Pa);

α_c : hệ số giãn nở nhiệt của lớp phủ ($1/^\circ\text{C}$);

T_m : Nhiệt độ nóng chảy của một lớp mỏng ($^\circ\text{C}$);

T_s : Nhiệt độ của vật liệu nền ($^\circ\text{C}$).



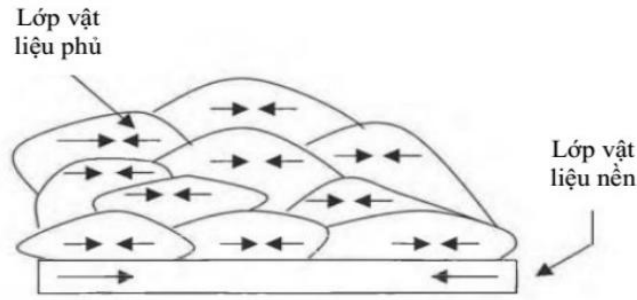
Hình 2.16. Ứng suất kéo do quá trình tôi

b. Ứng suất do làm nguội

Khi kết thúc quá trình lắng đọng hoặc trong quá trình phun bị gián đoạn sẽ sinh ra ứng suất như ở Hình 2.17. Hiện tượng này xảy ra chủ yếu do sự chênh lệch hệ số giãn nở nhiệt giữa kim loại nền và vật liệu lớp phủ. Nếu hệ số giãn nở nhiệt của lớp phủ lớn hơn hệ số giãn nở nhiệt của vật liệu nền ($\alpha_c > \alpha_s$) thì sẽ tạo ra ứng suất kéo bên trong lớp phủ [71, 72].

Điều này có thể làm giảm độ bám cũng như làm rạn nứt lớp phủ. Nếu các hệ số giãn nở cân bằng thì ứng suất sẽ không xảy ra. Còn nếu hệ số giãn nở nhiệt của lớp

phủ nhỏ hơn hệ số giãn nở nhiệt của vật liệu nền ($\alpha_c < \alpha_s$) thì sẽ tạo ra ứng suất nén.



Hình 2.17. Ứng suất nén trong quá trình phủ

Ứng suất nén được tính theo công thức sau:

$$\sigma_c = \left[\frac{E_c(T_f - T_R)(\alpha_c - \alpha_s)}{1 + 2 \frac{E_c t_c}{E_s t_s}} \right] \quad (2.27)$$

2.5.2.3 Độ bám dính

Sự bám dính của lớp phủ với vật liệu nền là một trong những yếu tố quan trọng được nhiều nhà khoa học nghiên cứu. Độ bám dính của lớp phủ bao gồm độ bền bám dính giữa lớp phủ với nền và giữa các phần tử bên trong lớp phủ. Trong đó, độ bám dính của lớp phủ với nền thường là yếu tố được chú trọng bởi chúng thường khác nhau về vật liệu, trạng thái, tính chất vật lý, hóa học,... nên khó khăn hơn để tạo ra liên kết bền chặt. Các liên kết tạo thành lớp phủ chủ yếu là liên kết cơ học, chúng được quyết định bởi mức độ va đập của hạt phun đối với nền [73]. Nhiều nghiên cứu cho thấy nhiệt độ hạt phun và độ nhấp nhô (độ nhám) của bề mặt chi tiết phun là hai thông số tạo điều kiện để sự bám dính lớp phủ được tốt nhất. Khi động năng của hạt càng lớn, hạt phun bị nóng chảy cục bộ hoặc toàn phần khi va đập sẽ bị biến dạng mạnh hơn, tăng diện tích tiếp xúc và tăng bám dính cơ học cũng như lực hấp dẫn giữa các lớp nguyên tử hai kim loại. Đối với nhóm hạt phun không bị nóng chảy hoặc đã bị nguội, khi đến bề mặt chúng chỉ có sự bám dính hoàn toàn bằng lực cơ học. Tốc độ va đập càng cao, năng lượng chuyển thành nhiệt năng càng lớn, vật liệu phun dễ bị nóng chảy hoặc chuyển thành trạng thái dẻo, hạt dễ biến dạng và bám lên bề mặt chi tiết phun [74]. Đây chính là ưu điểm của phương pháp

phun HVOF bởi vận tốc hạt cao, điều này giải thích tại sao lớp phủ HVOF thường có độ bền bám dính lớn hơn các phương pháp phun thông dụng khác, kể cả trường hợp phun cùng vật liệu.

Ngoài ra, theo nghiên cứu của tác giả D. Sen và các cộng sự [75] để đạt được độ bám dính tốt nhất giữa vật liệu phủ là WC-12Co và nền là thép cacbon trung bình thì độ nhám bề mặt chi tiết (sau phun hạt Al_2O_3) nền cần phải đạt $4 \mu m$.

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

2.6.1 Hiện tượng nhiễu xạ tia X

Một số định nghĩa:

- Phản xạ: tia tới bị phản xạ bởi một mặt phẳng; góc tới bằng góc phản xạ; năng lượng cũng như bước sóng không thay đổi.

- Tán xạ: tia tới va chạm với một điểm vật chất nào đó; điểm vật chất này trở thành một nguồn bức xạ thứ cấp phát bức xạ (tia tán xạ) ra các hướng khác nhau. Tia tán và tia tới có năng lượng có thể bằng nhau (tán xạ đàn hồi) hoặc khác nhau (tán xạ không đàn hồi).

- Giao thoa: là hiện tượng cộng hợp sóng. Có giao thoa tăng cường (các sóng tới cùng pha) và giao thoa triệt tiêu (các sóng tới ngược pha)

- Nhiễu xạ: là sự giao thoa tăng cường của nhiều hơn một sóng tán xạ

- Kết quả: thu được các đỉnh nhiễu xạ theo các phương mặt tinh thể xác định.

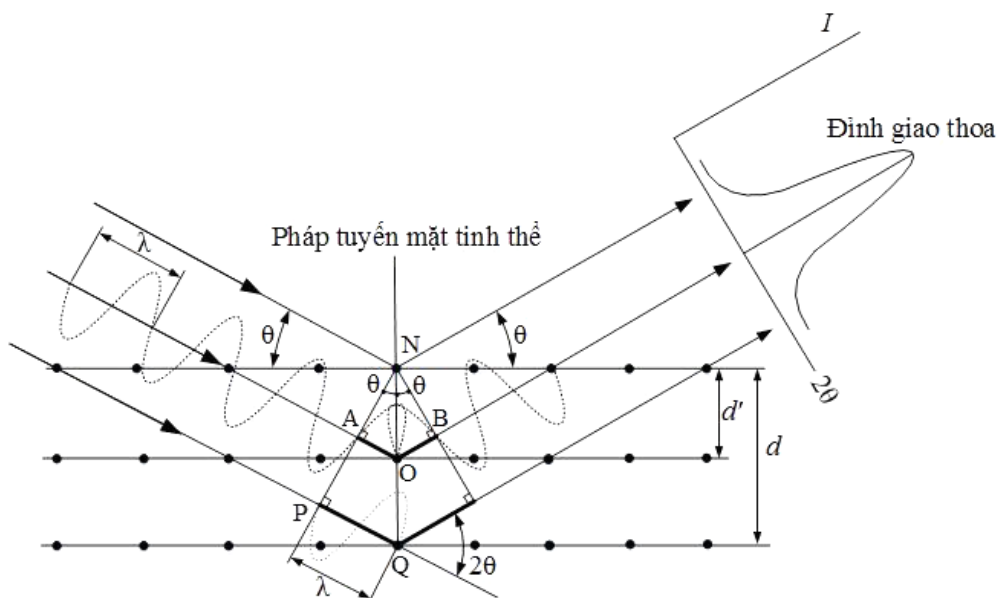
Các đỉnh nhiễu xạ này có thể được ghi lại dưới dạng ảnh nhiễu trên phim hoặc được vẽ thành giản đồ nhiễu xạ.

2.6.2 Định luật Bragg và điều kiện nhiễu xạ

Khi chiếu tia X có bước sóng ($10^{-4} - 10^2 \text{ \AA}$) tương ứng với khoảng cách giữa các mặt phẳng nguyên tử vào vật rắn tinh thể sẽ xuất hiện các tia nhiễu xạ với cường độ và các phương khác nhau, các phương nhiễu xạ phụ thuộc vào bước sóng của bức xạ tới và bản chất của mẫu tinh thể. Định luật Bragg thiết lập mối quan hệ giữa bước sóng tia X và khoảng cách giữa các mặt nguyên tử (Hình 2.18).

Các giả thuyết: Các mặt phẳng nguyên tử phản xạ các bức xạ tới phải độc lập, các tia tới phải tán xạ hoàn toàn.

Giả sử hai mặt phẳng nguyên tử song song A-A' và B-B' có cùng chỉ số Miller h,k,l và cách nhau bởi khoảng cách giữa hai mặt phẳng nguyên tử d_{hkl} , chúng ta xem mặt tinh thể của tâm tán xạ nguyên tử là các mặt tinh thể và phản xạ giống như gương đối với tia X.



Nhiều xạ X quang trên bề mặt tinh thể: cường độ cộng hưởng tại pháp tuyến ON

Hình 2.18. Định luật Bragg [76]

Giả sử hai tia 1 và 2 đơn sắc, song song và cùng pha với bước sóng λ chiếu vào hai mặt phẳng dưới góc θ . Hai tia này bị tán xạ bởi 2 nguyên tử P và Q và cho hai tia phản xạ 1' và 2' cũng tạo góc so với mặt phẳng ngang θ . Sự giao thoa của hai tia tán xạ xảy ra nếu thỏa mãn điều kiện sau: Hiệu quang đường 1-Q-1' và 2-P-2', $SQ + QT$ bằng số nguyên lần bước sóng. Tức là $n\lambda = SQ + QT$

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

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

Phương trình (2.28) chính là định luật Bragg biểu thị mối quan hệ đơn giản giữa góc của tia nhiễu xạ với bước sóng tia X tới và khoảng cách giữa các mặt phẳng nguyên tử d_{hkl} . Nếu định luật Bragg không được thỏa mãn thì sự giao thoa thực chất sẽ không có vì cường độ nhiễu xạ thu được là rất nhỏ.

Trong hầu hết các trường hợp, bậc phản xạ thứ nhất được sử dụng, $n = 1$, do

đó định luật Bragg được viết như sau :

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin\theta \quad (2.29)$$

Khi $n > 1$, các phản xạ được gọi là phản xạ bậc cao. Ta có thể viết phương trình (2.29) như sau :

$$\lambda = 2(d_{hkl}/n)\sin\theta \quad (2.30)$$

Trong đó d_{hkl}/n là khoảng cách giữa các mặt ($nh nk nl$). Vì thế, có thể xem phản xạ bậc cao là phản xạ bậc nhất từ các mặt đặt tại khoảng cách bằng $1/n$ khoảng cách d . Bằng cách đặt $d' = d/n$ và thay vào phương trình (2.30) ta có thể viết định luật Bragg theo cách thông thường là :

$$\lambda = 2d' \sin\theta \quad (2.31)$$

$$\text{hoặc } \lambda = 2d \sin\theta \quad (2.32)$$

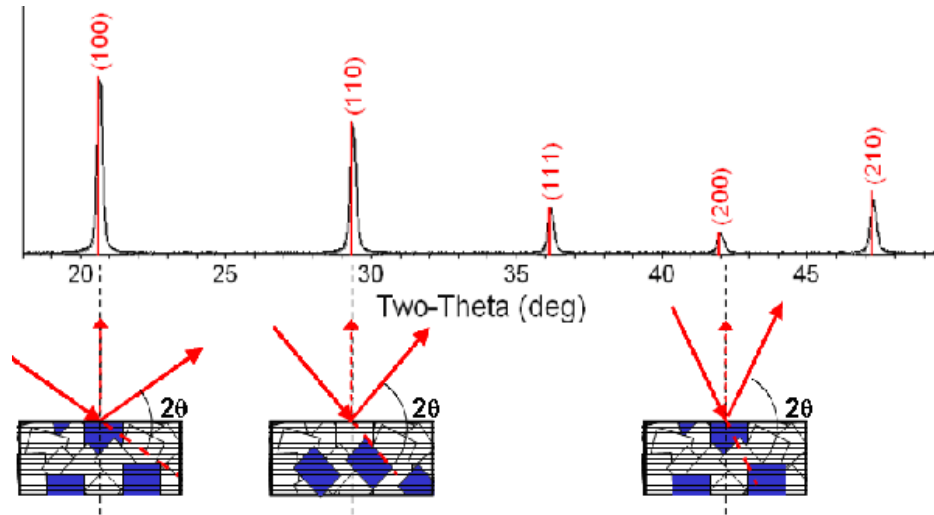
Khi chùm tia X có bước sóng đập vào một tinh thể, chùm tia bị phản xạ không chỉ từ các nguyên tử bề mặt mà còn từ các nguyên tử ở phía dưới lớp bề mặt với một chiều sâu đáng kể.

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

Việc xác định chính xác vị trí đỉnh nhiễu xạ là điều kiện tiên quyết để xác định ứng suất dư, vì khi thực hiện nhiễu xạ ứng với một mặt phẳng nguyên tử hkl (mặt phản xạ) và một góc nhiễu xạ 2θ sẽ cho một đường nhiễu xạ nhất định và đỉnh nhiễu xạ là vị trí có cường độ I cực đại (Hình 2.19). Bằng cách chúng ta thực hiện nhiễu xạ cho vật mẫu (là vật nhiễu xạ ở trạng thái tự nhiên không tồn tại ứng suất) với thiết bị có cùng công suất, bước sóng chùm tia tới, mặt phẳng nhiễu xạ có chỉ số Miller h,k,l , và cùng góc nhiễu xạ 2θ sẽ thu được đường nhiễu xạ có đỉnh nhiễu xạ.

Cùng với điều kiện như trên chúng ta thực hiện nhiễu xạ trên mẫu cần đo ứng suất và cũng thu được đường nhiễu xạ tương tự tuy nhiên đỉnh nhiễu xạ sẽ bị lệch đi $\varepsilon = (d - d_0)/d_0$ với d là khoảng cách của các mặt nhiễu xạ hkl của vật cần đo, d_0 là khoảng cách của mặt nhiễu xạ của mẫu.

Tuy nhiên cường độ nhiễu xạ còn phụ thuộc vào các yếu tố sau: hệ số hấp thụ (the absorption correction factor A), hệ số phân cực (the polarization factor $P(2\theta)$) và hệ số Lorentz (the Lorentz factor $L(2\theta)$).



Hình 2.19. Định nhiễu xạ có chỉ số Miller h,k,l, và góc nhiễu xạ 2θ [76]

2.6.4 Chiều sâu xuyên qua của tia X

Độ suy giảm cường độ làm giới hạn chiều sâu xuyên qua của tia X. Chiều sâu xuyên qua của tia X phụ thuộc vào hệ số suy giảm của vật liệu và kích cỡ chùm tia trên mặt mẫu. Độ suy giảm của tia tới tương ứng với bề dày vật liệu mà nó xuyên qua.

Lấy vi phân cường độ nhiễu xạ của một lớp mỏng cách bề mặt một khoảng “x” ta có:

$$dI_D = \frac{I_0 ab}{\sin(\theta + \psi)} \exp \left\{ -\mu x \left[\frac{1}{\sin(\theta + \psi)} + \frac{1}{\sin(\theta - \psi)} \right] \right\} dx \quad (2.33)$$

Tổng cường độ nhiễu xạ giữa lớp này và lớp bề mặt là:

$$G_x = \frac{\int_{x=0}^x dI_D}{\int_{x=0}^{\infty} dI_D} = 1 - \exp \left\{ -\mu x \left[\frac{1}{\sin(\theta + \psi)} + \frac{1}{\sin(\theta - \psi)} \right] \right\} \quad (2.34)$$

Khi $\psi = 0$ ta có:

$$G_x = 1 - \exp \left(-\frac{2\mu x}{\sin \theta} \right) \quad (2.35)$$

Công thức này cho thấy rằng ảnh hưởng của chiều sâu xuyên qua có thể được định nghĩa là bề dày mà nó góp phần cho 99% cường độ nhiễu xạ.

2.6.5 Tính ứng suất

Trong phương pháp dùng nhiễu xạ để đo ứng suất, ứng suất không được đo một cách trực tiếp mà nó được đo thông qua giá trị biến dạng.

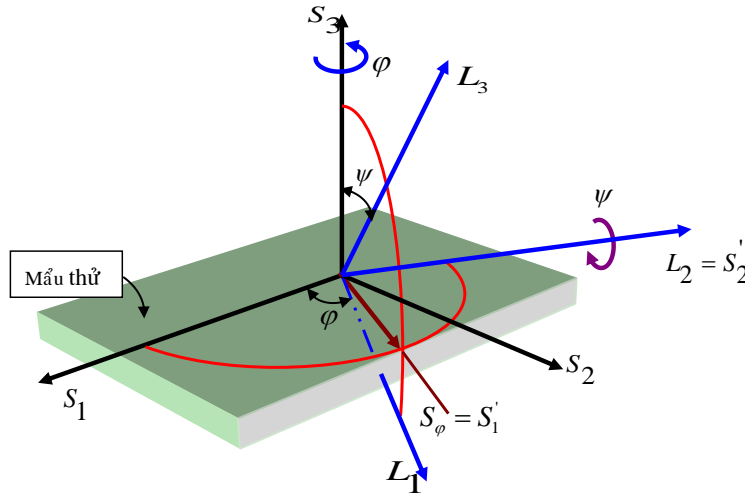
2.6.5.1 Xác định biến dạng

Cho hệ tọa độ như (Hình 2.20), trong đó S_i là hệ tọa độ gắn liền với mặt mẫu, trong đó S_1, S_2 nằm trên mặt mẫu, L_i là hệ tọa độ thí nghiệm (hệ đo), có L_3 vuông góc với họ mặt phẳng nguyên tử (hkl). L_2 nằm trong mặt phẳng tạo bởi S_1, S_2 , và làm với S_2 một góc φ .

Khi tính được khoảng cách $d_{\varphi, \psi}$ giữa các mặt phẳng (hkl) từ vị trí đỉnh nhiễu xạ, giá trị biến dạng dọc trục L_3 là:

$$(\varepsilon'_{33})_{\varphi, \psi} = \frac{d_{\varphi, \psi} - d_0}{d_0} \quad (2.36)$$

Trong đó: d_0 là khoảng cách giữa các mặt mạng khi chưa có ứng suất.



Hình 2.20. Hệ tọa độ thí nghiệm và hệ tọa độ mẫu

Dùng hệ thống ten xơ chuyển đổi tọa độ, phương trình (2.36) có thể viết:

$$(\varepsilon'_{33})_{\varphi, \psi} = a_{3k} a_{3l} \varepsilon_{kl} \quad (2.37)$$

Trong đó: a_{3k}, a_{3l} : cosin chỉ phương của L_3, S_k , và L_3, S_l

$$\text{Với: } a_{ik} = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \psi & \sin \varphi \cos \psi & -\sin \psi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ \cos \varphi \sin \psi & \sin \varphi \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Đây là ma trận chuyển đổi giữa hai hệ thống này

Thay a_{3k}, a_{3l} vào (2.37) ta được:

$$\begin{aligned} (\varepsilon)'_{\varphi\psi} = \frac{d_{\varphi\psi} - d_0}{d_0} = & \varepsilon_{11} \cos^2 \varphi \sin^2 \psi + \varepsilon_{12} \sin 2\varphi \sin^2 \psi + \varepsilon_{22} \sin^2 \varphi \sin^2 \psi \\ & + \varepsilon_{33} \cos^2 \psi + \varepsilon_{13} \cos \varphi \sin 2\psi + \varepsilon_{23} \sin \varphi \sin 2\psi \end{aligned} \quad (2.39)$$

Đây là hàm căn bản của phương pháp nhiễu xạ dùng để xác định biến dạng.

2.6.5.2 Xác định mối liên hệ ứng suất – biến dạng

Từ giá trị biến dạng đã xác định được, áp dụng định luật Hooke ta tính được ứng suất qua công thức sau [76]:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (2.40)$$

Trong đó:

C_{ijkl} là ten xơ độ cứng đàn hồi hạng tư, đã được chuyển đến hệ tọa độ Si .

Ứng suất trong hệ tọa độ nào cũng có thể được xác định bằng cách dùng luật chuyển đổi ten xơ hạng hai:

$$\sigma'_{mn} = a_{mi} a_{nj} \sigma_{ij} \quad (2.41)$$

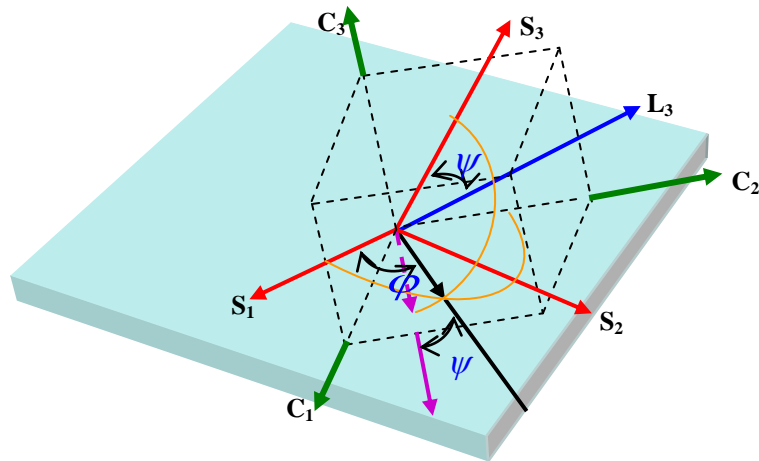
Trong đó: $a_{mi} a_{nj}$ là côsin chỉ phương

Ta nghịch đảo công thức (2.40), và được:

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (2.42)$$

Trong đó: S_{ijkl} là ten xơ kết hợp đơn tinh thể hạng tư.

Thay công thức (2.42) vào (2.39) ta sẽ tính được mối liên hệ giữa ứng suất và giá trị biến dạng. Vì mẫu đang xét là vật liệu đẳng hướng đàn hồi đồng nhất. Cho nên ta phải tính kết hợp đàn hồi thông qua các trục tinh thể với các trục được chuyển đổi ten xơ lần nữa dựa theo phương pháp Euler (Hình 2.21).



Hình 2.21. Trục tinh thể (C_i) và hướng của nó đối với hệ tọa độ mẫu (S_i) cùng hệ trục đo (L_i)

$$S_{ijkl} = a_{im} a_{in} a_{ko} a_{lp} S_{mnop} \quad (2.43)$$

Trong đó: - S_{mnop} là ten xơ kết hợp được tính trong các trục tinh thể.

- $a_{ko} a_{lp}$ là cosin chỉ phương.

Thay (2.43) vào (2.42) ta được:

$$\varepsilon_{ij} = a_{im} a_{in} a_{ko} a_{lp} S_{mnop} \sigma_{kl} \quad (2.44)$$

Từ (2.44) suy ra:

$$\varepsilon_{11} = a_{1m} a_{1n} a_{ko} a_{lp} S_{mnop} \sigma_{kl} \quad (2.45)$$

Tương tự, $\varepsilon_{12}, \varepsilon_{22}, \dots$

Thay công thức (2.45) vào (2.39) ta được công thức tính ứng suất theo định luật Hooke tổng quát:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} S_2 \sigma_{ij} - \delta_{ij} S_1 (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) \quad (2.46)$$

Trong đó:

- δ_{ij} là delta Kronecker, bằng 1 nếu $i=j$; và bằng 0 nếu $i \neq j$.
- σ_{ij} là ten xơ ứng suất. (i, j lấy từ 1 đến 3).

- ε_{ij} là giá trị biến dạng theo phương i, j

$S_1 = -\frac{\nu}{E}$ $\frac{1}{2}S_2 = \frac{1+\nu}{E}$ là hằng số đàn hồi tia X (XEC) của vật liệu đẳng

hướng.

- ν là hệ số Poisson; và E là mô đun đàn hồi của vật liệu.

- Nếu là vật liệu gần đẳng hướng thì nó phụ thuộc vào họ mặt phẳng nhiễu xạ $\{hkl\}$ và pha vật liệu. Khi đó: $S_1 \Rightarrow S_1^{hkl}$; và $\frac{1}{2}S_2 \Rightarrow \frac{1}{2}S_2^{hkl}$.

Nếu thay các giá trị của i và j tương ứng là $1, 2, 3$ vào công thức (2.46), ta có:

$$\begin{aligned} \varepsilon'_{\varphi, \psi} = \varepsilon_{33}^L &= \frac{1}{2} S_2 (\sigma_{11} \cos^2 \varphi + \sigma_{12} \sin 2\varphi + \sigma_{22} \sin^2 \varphi - \sigma_{33}) \sin^2 \psi \\ &+ \frac{1}{2} S_2 \sigma_{33} + S_1 (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) \\ &+ \frac{1}{2} S_2 (\sigma_{13} \cos \varphi + \sigma_{23} \sin \varphi) \sin 2\psi \end{aligned} \quad (2.47)$$

Với ε_{33}^L là biến dạng theo phương đo L_3 tương ứng với biến dạng theo phương φ, ψ .

Đây là công thức căn bản, là nền tảng tổng quát nhất của phương pháp nhiễu xạ dùng để xác định biến dạng. Là phương trình cơ bản liên hệ giữa ten xơ ứng suất và biến dạng áp dụng để tính toán đối với vật liệu đẳng hướng.

2.6.5.3 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. Từ định luật Hooke biến dạng đàn hồi đẳng hướng qua biến đổi có thể xác định thông qua công thức sau:

$$\varepsilon'_{\varphi, \psi} = \varepsilon_{33}^L = \frac{1+\nu}{E} (\sigma_{11} \cos^2 \varphi + \sigma_{12} \sin 2\varphi + \sigma_{22} \sin^2 \varphi - \sigma_{33}) \sin^2 \psi$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1+\nu}{E} \sigma_{33} - \frac{\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) \\
& + \frac{1+\nu}{E} (\sigma_{13} \cos \varphi + \sigma_{23} \sin \varphi) \sin 2\psi
\end{aligned} \tag{2.48}$$

Từ công thức (2.48) ta có:

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

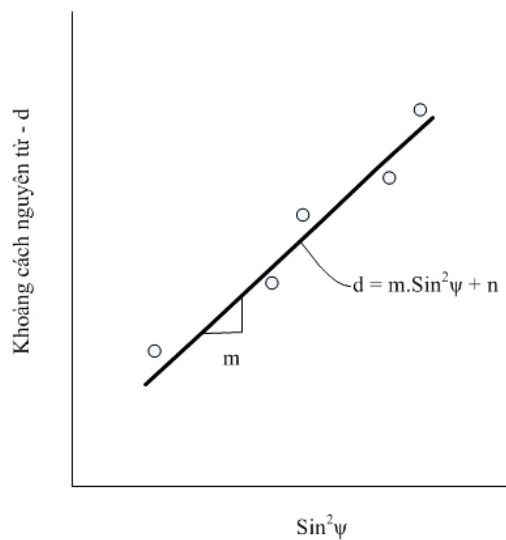
Trong đó $\sigma_{\varphi} = \sigma_{11} \cos^2 \varphi + \sigma_{12} \sin 2\varphi + \sigma_{22} \sin^2 \varphi$ là ứng suất thành phần trong hệ mẫu S_i ;

Phương trình (2.49) có thể viết lại:

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

Đây là phương trình thể hiện mối quan hệ $d_{\varphi\psi}$ - $\sin^2 \psi$ (Hình 2.22) có hệ số góc m là:

$$m = d_0 \frac{1+\nu}{E} \sigma_{\varphi} \tag{2.51}$$



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

Từ phương trình trên ứng suất dư có thể xác định thông qua hệ số góc m là:

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

Trong đó d_0 là khoảng cách mặt tinh thể ở trạng thái không ứng suất, vì mẫu là vật liệu đẳng hướng nên d_0 được tính như điểm không phụ thuộc vào ứng suất trên phương trình $d \cdot \sin^2 \psi$ sau đây:

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

Chương 3

VẬT LIỆU - THIẾT BỊ VÀ PHƯƠNG PHÁP THÍ NGHIỆM

3.1 Vật liệu thí nghiệm

3.1.1 Vật liệu nền

Thép C45 thuộc nhóm thép cacbon có hàm lượng cacbon từ 0,43 - 0,50% đảm bảo được các chỉ tiêu cơ tính tổng hợp như: độ bền, độ dẻo, độ dai, tính chịu lực, chịu uốn, chịu xoắn tốt. Với các tính chất này, thép C45 được sử dụng rộng rãi trong lĩnh vực cơ khí để chế tạo các chi tiết máy chịu mòn, chịu tải trọng tĩnh và va đập tương đối cao như trục, bánh răng,... Ngoài ra, trong quá trình chế tạo cơ khí, các chi tiết chế tạo từ thép C45 cũng có thể được xử lý nhiệt để đạt cơ tính tổng hợp cao nhất. Từ các cơ sở trên và thực tiễn chế tạo cơ khí tại Việt Nam, vật liệu thép (vật liệu nền) được lựa chọn cho việc chế tạo chi tiết mẫu để tiến hành các thí nghiệm để xác định độ bền mỏi là thép C45.

Nguồn thép C45 sử dụng trong nghiên cứu được sản xuất tại công ty Feng Hsin Iron & Steel Co. Ltd (Đài Loan) theo tiêu chuẩn Nhật Bản. Để xác định các thành phần hoá học của nguồn thép C45 này, các mẫu kiểm tra thành phần hoá học đã được chế tạo (Hình 3.1) và phân tích bằng quang phổ tại phòng thí nghiệm Chiếu xạ (Sở Khoa học và Công nghệ Đồng Nai). Kết quả phân tích được trình bày ở Bảng 3.1.



Hình 3.1. Mẫu kiểm tra thành phần vật liệu

Bảng 3.1. Thành phần các nguyên tố của mẫu thép C45

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

Kết quả cho thấy mẫu thép C45 sử dụng có các thành phần hóa học nằm trong phạm vi thành phần hóa học của mác thép C45 [77].

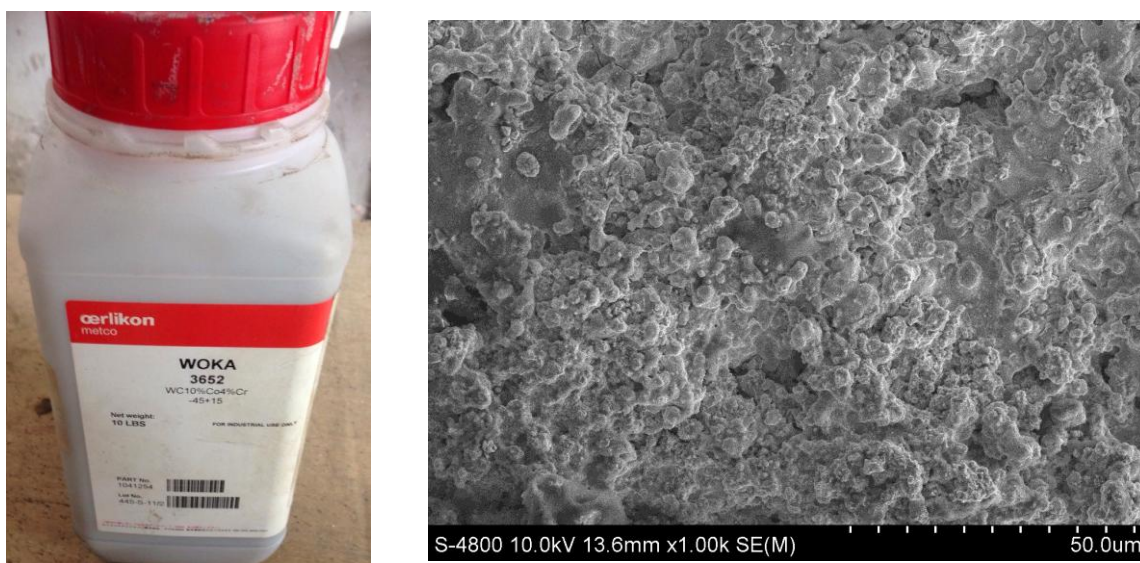
3.1.2 Vật liệu crôm cứng

Crôm là nguyên tố có ký hiệu là Cr, số nguyên tử 24, loại điện giải (mạ điện) có màu trắng bạc, ánh xanh. Tùy theo điều kiện điện phân khi mạ điện, crôm có độ cứng rất cao (65-70 HRC). Ngoài độ cứng cao, crôm còn có các đặc điểm nổi bật khác như là hệ số ma sát thấp ($f = 0,12$) nên rất bền mài mòn, khó thấm ướt, bám dính rất tốt với nhiều kim loại nền. Vì vậy, lớp mạ crôm được ứng dụng vào rất nhiều lĩnh vực để làm tăng độ cứng, tăng độ bền mài mòn, độ bền hóa học, phục hồi các chi tiết máy bị mài mòn... Tuy nhiên, lớp mạ crôm cũng có những nhược điểm là độ giòn cao, ứng suất dư lớn nên dễ bị rạn nứt [64, 78].

3.1.3 Vật liệu carbide vonfram

Đây là một loại bột phun phủ được sử dụng phổ biến trên thế giới với nhiều hãng sản xuất như Praxair (Mỹ), Orelikon Metco (Thụy Sĩ), MEC (Án Độ). Tùy thuộc vào mục đích sử dụng như chế tạo mới hay phục hồi bề mặt chi tiết máy mà có thể sử dụng các phương pháp phun phủ và chọn loại bột cho thích hợp. Từ kết quả của các công trình đã nghiên cứu và tài liệu của hãng Orelikon Metco [59] cho thấy chất phủ bột carbide WC-10Co-4Cr (Woka 3652) có cơ tính rất tốt và được sử dụng rộng rãi nhờ pha carbide vonfram WC có độ cứng rất cao và chất kết dính coban giúp giảm sự mài mòn và chống ăn mòn rất tốt. So với vật liệu phủ WC-Co thì WC-10Co-4Cr có khả năng chống ăn mòn cao hơn vì có thành phần crôm nên là vật liệu đang được sử dụng để thay thế mạ crôm cứng. Trong thực tế, loại bột này rất phù hợp để áp dụng phun nhiệt cho chế tạo mới hay phục hồi các chi tiết dạng trục chịu mài mòn. Đã có nhiều công trình lựa chọn WC-10Co-4Cr cho phun phủ nhiệt để nghiên cứu nâng cao cơ tính của chi tiết, trong đó có độ bền mỏi [40-44, 46-48]. Từ các đặc điểm phân tích trên, bột carbide WC-10Co-4Cr đã được lựa

chọn làm chất phun phủ nhiệt để nghiên cứu đánh giá độ bền mỏi của chi tiết được phun phủ. Hình 3.2 giới thiệu tổ chức hạt của loại bột carbide WC-10Co-4Cr.



Hình 3.2. Vật liệu WC-10Co-4Cr của hãng Orelikon Metco. Ltd. (Thụy sĩ)

Bảng 3.2. Các thành phần nguyên tố của carbide vonfram

Nguyên tố	W	Co	Cr	C (total)	Fe (max)
Thành phần (%)	Balance	8,5-11,5	3,4-4,6	4,8-5,6	0,2

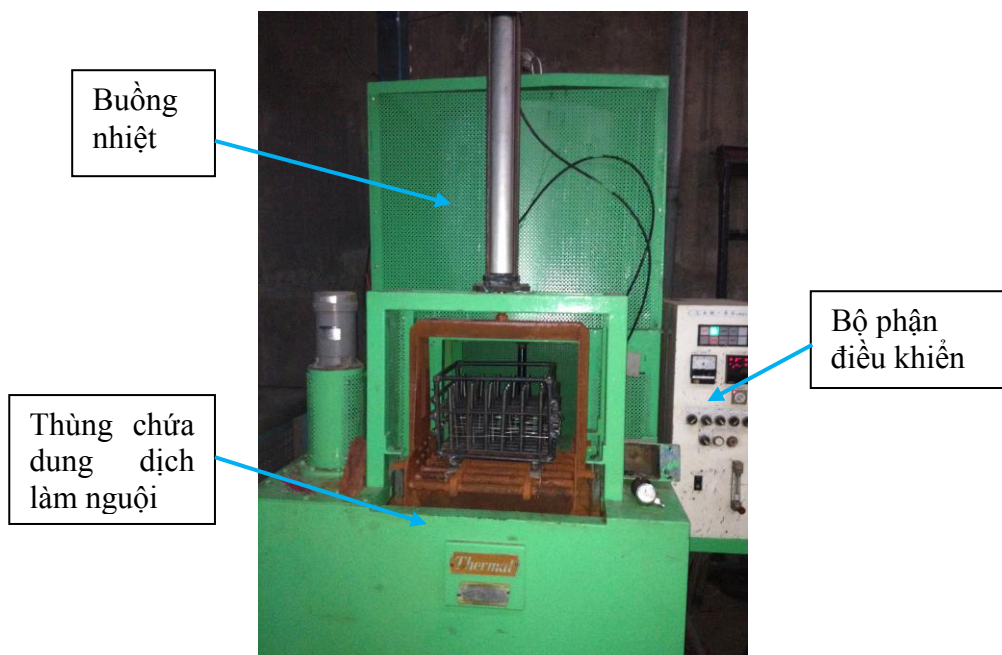
3.2 Thiết bị phục vụ thực nghiệm

3.2.1 Lò nung nhiệt

Xử lý thớ, nhiệt luyện tôi và ram cho các chi tiết mẫu được thực hiện trên lò nung Thermal Electric Furnace (Nhật) tại phân xưởng cơ khí Công ty Đăng Tấn (Thủ Dầu Một, Bình Dương).

Thông số cơ bản của lò nung:

- Nhiệt độ buồng nung: 600 - 1090⁰C
- Kích thước buồng nung: Ø 600 x H 300 mm
- Công suất: 19 kW, nguồn điện 3 pha 220 V



Hình 3.3. Lò nung Thermal Electric Furnace (Nhật)

Để các chi tiết mẫu trong quá trình xử lý thép, tôi không bị dính vào nhau do ảnh hưởng của nhiệt độ, một đồ gá hỗ trợ gá đặt các chi tiết mẫu đã được thiết kế và chế tạo (Hình 3.4).



a) Đồ gá xử lý thép

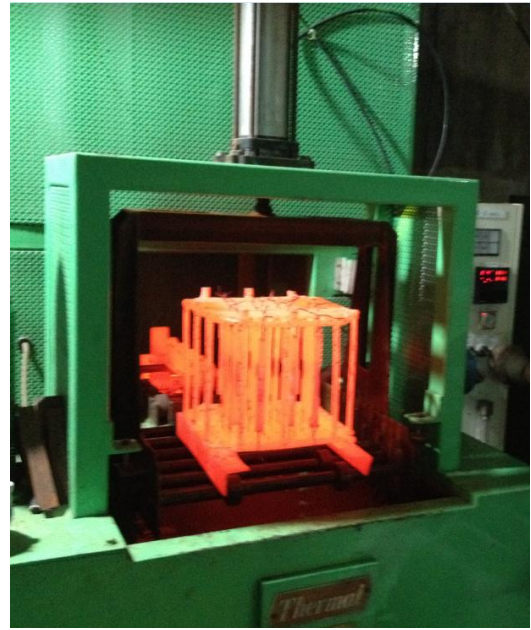


b) Đồ gá tôi

Hình 3.4. Đồ gá chi tiết mẫu khi xử lý nhiệt



a) Quá trình xử lý thô



b) Quá trình tôi

Hình 3.5. Quá trình nhiệt luyện

Sau quá trình tôi thể hiện trên Hình 3.5b, quá trình ram được thực hiện trên thiết bị S-now Industrial Furnace (Trung Quốc) tại phân xưởng cơ khí Công ty Đăng Tấn. Các thông số cơ bản của thiết bị:

- Nguồn điện: 3 pha 380 V
- Kích thước buồng nung: 500x350x350 mm
- Nhiệt độ lớn nhất: 650⁰C



Hình 3.6. Lò ram S-now Industrial Furnace (Trung Quốc)

3.2.2 Máy quang phổ xác định thành phần vật liệu

Thành phần của vật liệu được sử dụng để chế tạo chi tiết mẫu được phân tích, đánh giá bằng máy quang phổ GNR-F20 (Italia) tại Sở Khoa học và Công nghệ tỉnh Đồng Nai. Các thông số của máy quang phổ GNR-F20 (Hình 3.7):

- Nguồn điện: 220 V
- Công suất phóng (sparking): 3 kW
- Công suất hồ quang (arc): 3 kW

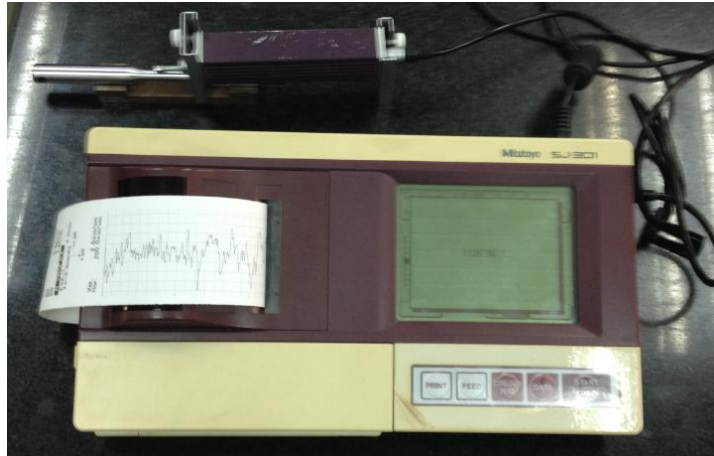


Hình 3.7. Máy quang phổ GNR-F20 (Italia)

3.2.3 Máy đo độ nhám

Độ nhám của chi tiết mẫu được đo trên máy Mitutoyo SJ-301 (Nhật). Công việc đo kiểm được thực hiện tại phòng thí nghiệm đo lường trường đại học Công Nghiệp Tp. HCM. Máy có các thông số cơ bản như sau:

- Màn hình: 14,5 cm
- Phương pháp đo: cảm ứng
- Bán kính trượt: 40 mm
- Lực đo: 0,75 mN
- Cổng giao tiếp: RS-232C
- Tiêu chuẩn chịu mài mòn: EN ISO, VDA, ANSI, JIS
- Bộ lọc kỹ thuật số: 2RC -75%



Hình 3.8. Máy đo độ nhám Mitutoyo SJ-301

3.2.4 Máy đo độ cứng HRC

Độ cứng của chi tiết mẫu được đo trên máy Mitutoyo ATK-600 (Nhật) thuộc phòng thí nghiệm đo lường Trường Đại học Công Nghiệp Tp. HCM. Máy đo độ cứng Mitutoyo ATK-600 (Hình 3.9) có các thông số cơ bản như sau:

- Mũi đâm kim cương và mũi đâm bi thép: 1/16"
- Tải thử: 588,4 N / 980,7N / 1471N
- Bàn gá: mặt phẳng hình tròn (ø64mm)
- Chiều cao mẫu lớn nhất: 140 mm
- Chiều sâu mẫu lớn nhất: 122 mm (từ tâm mũi đâm)



Hình 3.9. Đo độ cứng trên máy Mitutoyo ATK-600

3.2.5 Máy đo độ cứng HV (Vicker)

Độ cứng của lớp phủ được đo trên máy Meatall-HV5 (Trung Quốc) thuộc Trung tâm Kỹ thuật Tiêu chuẩn Đo lường Chất lượng 3 (Quatest 3). Máy đo độ cứng Meatall-HV5 (Hình 3.10) có các thông số cơ bản như sau:

- Tải thử: 2,942/ 4,903/ 9,807/ 29,42/ 49,03/ 98,07/ 196,1/ 294,2 N
- Bàn gá: mặt phẳng
- Chiều cao mẫu lớn nhất: 130 mm
- Khoảng cách từ tâm mũi đâm đến máy: 100 mm
- Độ phóng đại: 125/500 lần



Hình 3.10. Đo độ cứng Vicker Meatall-HV5

Máy đo độ cứng Vicker Meatall-HV5 sử dụng mũi thử (dạng chóp 4 cạnh) và hệ thống quang học phóng đại cỡ 100 – 500 lần để đo đường chéo của vết lõm, từ đó tính toán và quy đổi ra trị số độ cứng tương ứng. Một số máy hiện đại còn có thể hiển thị, đo và tính toán độ cứng trực tiếp trên máy tính giúp nâng cao độ chính xác của phép đo. Thiết bị này cũng được sử dụng để đo độ bám dính của lớp phủ theo tiêu chuẩn ISO 19207-2016.

3.2.6 Máy đo độ bền kéo - nén

Máy thí nghiệm xác định độ bền kéo - nén là máy kéo - nén WEW-1000B (Jingyuan - Trung Quốc) của công ty tư vấn kiểm định Hưng Thịnh. Một số thông số kỹ thuật của máy WEW-1000B (Hình 3.11) như sau:

- Lực thí nghiệm: 1000 kN
- Phạm vi tối đa thử nghiệm kéo: 620 mm
- Phạm vi tối đa thử nghiệm nén: 580 mm
- Kiểm soát độ chính xác của lực: $\leq \pm 1\%$
- Đường kính của kẹp mẫu tròn: $\text{Ø}14 - \text{Ø}45$ mm
- Độ dày của mẫu dẹt: 0 - 40 mm



Hình 3.11. Thiết bị đo độ bền kéo WEW-1000B (Trung Quốc)

3.2.7 Máy đo chiều dày lớp phủ

Chiều dày lớp phủ được đo bằng phương pháp dòng điện xoáy ET (Eddy Current Testing) với thiết bị đo MiNiTest 600B-Elektrophysik (CHLB Đức) thể hiện trên Hình 3.12. Sai số của phép đo trên máy MiNiTest 600B-Elektrophysik là 1% giá trị chiều dày thực. Công việc đo chiều dày lớp phủ được thực hiện tại công ty Vivablast Việt Nam.



Hình 3.12. Thiết bị đo chiều dày lớp phủ MiNiTest 600B-Elektrophysik

Các thông số cơ bản của thiết bị:

- Phạm vi đo: 1500 μm
- Độ phân giải: 1 / 5 / 10 μm
- Đầu đo: áp dụng cho vật liệu từ tính và không từ tính



a) Đo chiều dày lớp mạ crôm



b) Đo chiều dày lớp phủ carbide

Hình 3.13. Đo chiều dày lớp mạ phủ

Trước khi đo chiều dày lớp phủ, thiết bị được calip trên nền chi tiết phủ với miền đo từ 0 -100 μm và kiểm tra bằng các tấm film chuẩn tương ứng với chiều dày 12,3; 24,2; 52,0; và 74,5 μm . Sau đó, tiến hành đo chiều dày lớp phủ với 5 lần đo (Hình 3.13). Kết quả đo là giá trị trung bình sau 5 lần đo.

3.2.8. Thiết bị đánh giá tổ chức tế vi lớp phủ

Kính hiển vi IM 300 - Euromex (Hà Lan) trên Hình 3.14 được sử dụng để

đánh giá tổ chức tế vi của mẫu và khảo sát mật độ vết nứt tế vi của lớp phủ. Quá trình đánh giá tổ chức tế vi lớp phủ được thực hiện tại phòng thí nghiệm Vật liệu học (trường đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp. HCM). Các thông số cơ bản của kính hiển vi bao gồm:

- Độ phóng đại: 40, 100, 400 và 1000 lần (ứng với thị kính 10X).
- Khoảng cách điều chỉnh giữa hai mắt: 48 – 75 mm.
- Mâm gắn vật kính loại 5 vị trí, có thể xoay tròn 360°.



Hình 3.14. Kính hiển vi IMS 300

3.2.9 Máy nhiễu xạ tia X

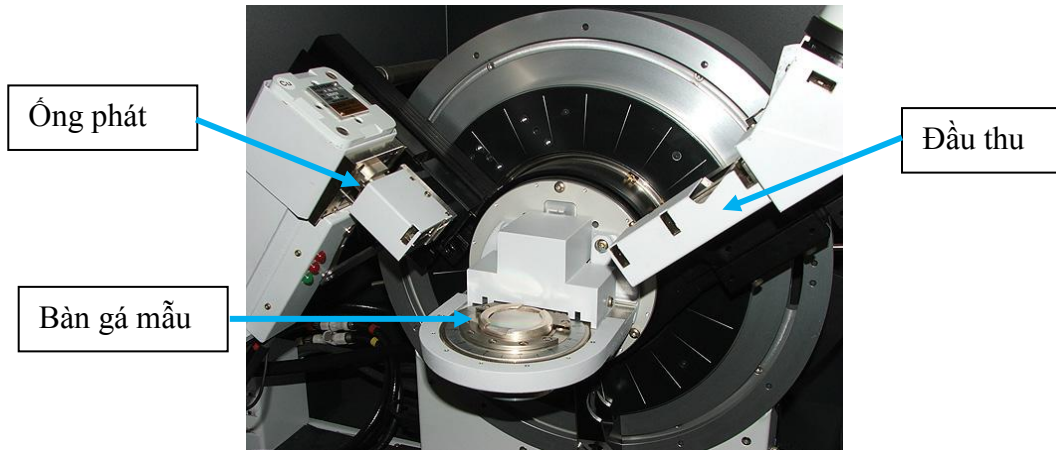
Quá trình đo ứng suất dư bằng phương pháp nhiễu xạ tia X được thực trên thiết bị nhiễu xạ tia X X'Pert Pro (Hình 3.15) tại Trung Tâm Hạt nhân Tp. Hồ Chí Minh.

Khi vận hành tăng giảm cường độ và điện thế cần tuân theo qui trình tăng/giảm dần một cách phù hợp để đảm bảo an toàn cho thiết bị. Sau khi mở máy ta tăng dần điện thế và cường độ, mỗi bước tăng phải chờ 3 phút; và ngược lại trước khi tắt máy ta phải hạ dòng điện và hiệu điện thế, mỗi bước giảm phải chờ 3 phút.

Sau khi đưa mẫu vào máy, ta thiết lập thông số đo trên X'Pert Collection Data gồm góc quét, bước quét, thời gian quét (các thông tin cần thống kê để phân tích, đánh giá). Sau đó, máy sẽ tự động thay đổi chế độ quét và nhận tín hiệu nhiễu xạ vào bộ nhớ.

Các thông số của cấu hình đo khảo sát mẫu như sau:

- Điện thế nguồn phát tia X: điện áp 45 kV; cường độ dòng điện 40 mA.
- Bước quét (step size): 0,03
- Góc quét 2θ : Từ $0,2^\circ$ - 160°

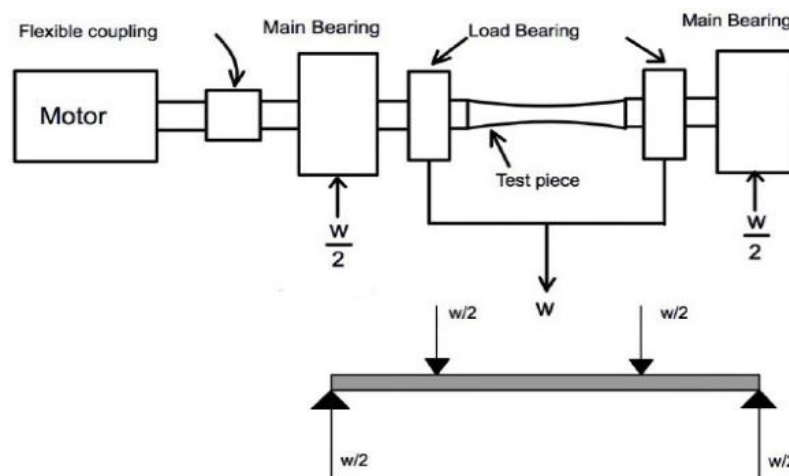


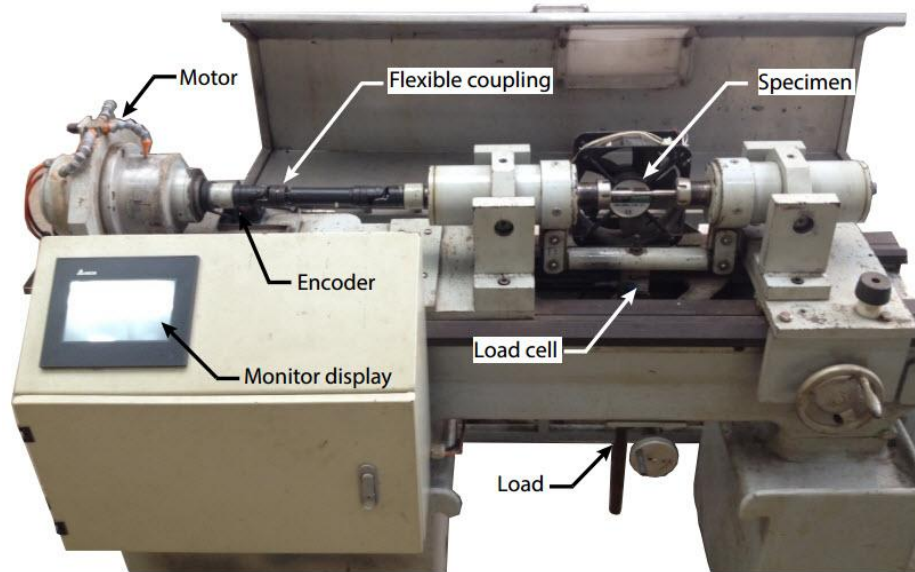
Hình 3.15. Máy nhiễu xạ tia X - X'Pert Pro

Kết quả thu được khi đo ứng suất bằng phương pháp nhiễu xạ tia X là đường nhiễu xạ ứng với mỗi giá trị $\text{Sin}^2\psi$. Từ kết quả này, sử dụng các phần mềm chuyên dụng để xác định vị trí đỉnh nhiễu xạ ứng với góc 2θ bằng phương pháp nội suy đường cong Gauss. Khoảng cách nguyên tử d được tính toán thông qua định luật Bragg. Từ đây, giá trị ứng suất được tính toán thông qua sự thay đổi của khoảng cách nguyên tử (biến dạng) của mạng tinh thể.

3.2.10 Máy thí nghiệm môi uốn 4 điểm MU-2016

Sơ đồ nguyên lý máy thí nghiệm môi uốn đa năng MU-2016 tại phòng thí nghiệm REME Lab (Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp. Hồ Chí Minh) được giới thiệu ở Hình 3.16.





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

Nguyên lý tạo mỏi uốn quay: động cơ truyền chuyển động cho chi tiết mẫu (specimen) thông qua khớp nối mềm (flexible coupling). Lực được tác dụng lên hai đầu kẹp theo phương pháp tuyến để tạo mỏi và được đo thông qua load cell. Hai cụm trục chủ động và bị động sẽ lắc khi mẫu thí nghiệm bị biến dạng hoặc gãy thông qua cơ cấu lắc. Số vòng quay của chi tiết được đo thông qua encoder. Dữ liệu thí nghiệm được hiển thị trên màn hình cảm ứng. Thông số của máy thí nghiệm mỏi uốn được thể hiện trong Bảng 3.3.

Bảng 3.3. Thông số máy thí nghiệm mỏi uốn MU-2016

Dạng thí nghiệm mỏi	Uốn quay bốn điểm
Tốc độ trục chính	500 – 10000 vòng/phút
Lực tác dụng vào hệ thống	20 – 2000 N
Kích thước mẫu thí nghiệm	ø12 – ø15 mm
Công suất máy	2 kW
Khối lượng máy	430 kg

3.2.11 Kính hiển vi điện tử quét

Kính hiển vi điện tử quét (Scanning Electron Microscope - SEM) là thiết bị hiện đại có khả năng quan sát đánh giá bề mặt của mẫu vật, bao gồm: súng điện tử,

tụ kính, buồng tiêu bản, hệ thống đầu dò điện tử, hệ thống khuếch đại - máy tính và màn hình để quan sát ảnh.

Hệ thống SEM-S4800 (Hitachi, Nhật) tại Trung tâm Công Nghệ Cao, sở Khoa học Công nghệ Tp. HCM được sử dụng để đánh giá bề mặt gãy mỏi và vết nứt tế vi.



Hình 3.17. Hệ thống SEM-S4800

Các thông số kỹ thuật của hệ thống SEM-S4800 (Hình 3.17):

- Đầu dò SE: 8 nm / 1,1 nm
- Điện áp Landing: 0,01 - 30 kV
- Độ phóng đại: 20 - 1.000.000 X
- Độ lặp lại bàn mẫu: $\pm 0.5\mu\text{m}$ hoặc nhỏ hơn

Chi tiết mẫu sau khi bị gãy do mỏi được cắt dây EDM với kích thước $L = 5$ mm để khảo sát bề mặt gãy do mỏi (Hình 3.18). Sau khi gá vào bàn máy, tiến hành điều chỉnh tiêu cự và chọn độ phóng đại phù hợp để có được hình ảnh rõ nét hiển thị lên màn hình.



a) Chi tiết mẫu gãy do mỏi



b) Mẫu chụp SEM

Hình 3.18. Mẫu mạ phủ để chụp SEM

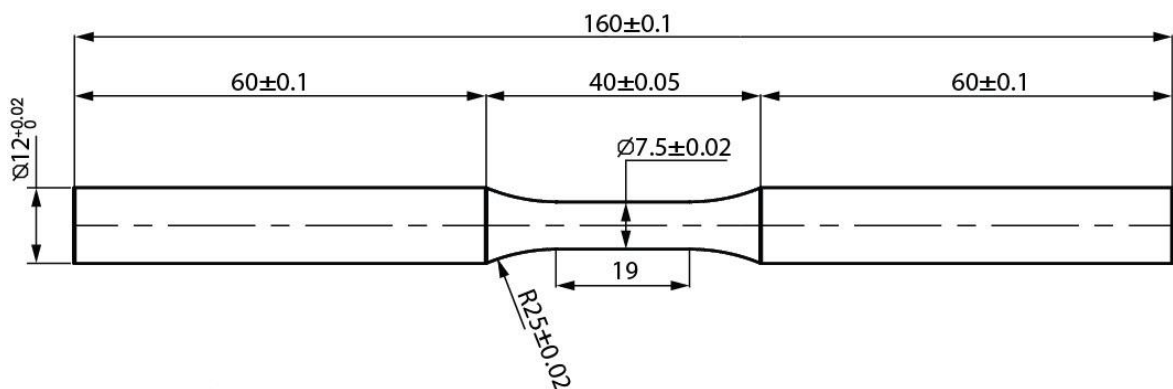
3.3 Nghiên cứu đề xuất kết cấu và quy trình chế tạo chi tiết mẫu

3.3.1. Kết cấu chi tiết mẫu

3.3.1.1 Đề xuất chi tiết mẫu thí nghiệm mỏi

Mẫu thí nghiệm phục vụ cho thử mỏi uốn xoay cần tuân thủ tiêu chuẩn ISO 1143:2010. Tiêu chuẩn qui định chi tiết làm mẫu thử mỏi uốn xoay có đường kính danh nghĩa từ 5 - 12,5 (mm) và cũng chỉ rõ quá trình gia công không tạo ra sự tập trung ứng suất lên mẫu thử. Mục đích của việc chế tạo mẫu thử mỏi uốn xoay là để xác định đặc tính mỏi của vật liệu được biểu diễn trên đường cong S-N (ứng suất – chu kỳ).

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.

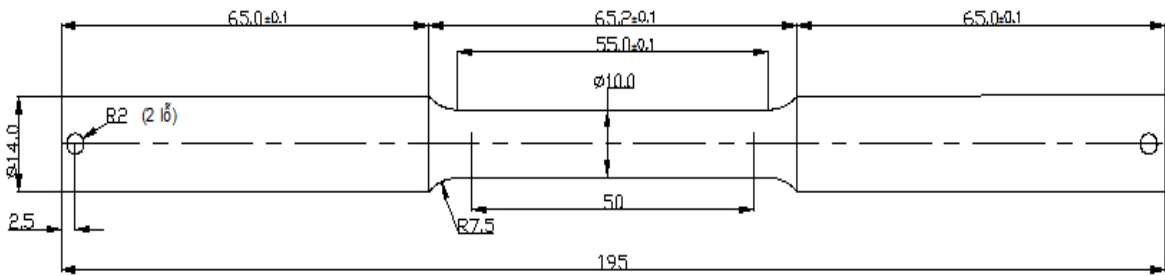


Hình 3.19. Bản vẽ thiết kế mẫu thí nghiệm mỏi theo tiêu chuẩn ISO 1143:2010

3.3.1.2 Đề xuất chi tiết mẫu thí nghiệm kéo nén

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. Mức ứng suất ban đầu này được dự đoán thông qua giới hạn chảy của vật liệu C45 nên cần phải tiến hành kiểm tra độ bền kéo. Do vậy cần phải thiết kế, chế tạo mẫu kiểm tra độ bền kéo.

Dựa vào tiêu chuẩn ISO 6892-1 (2009) và thông số kỹ thuật của máy kiểm tra độ bền kéo, mẫu chi tiết thí nghiệm kiểm tra độ bền kéo chế tạo từ thép C45 được đề xuất như ở Hình 3.20.

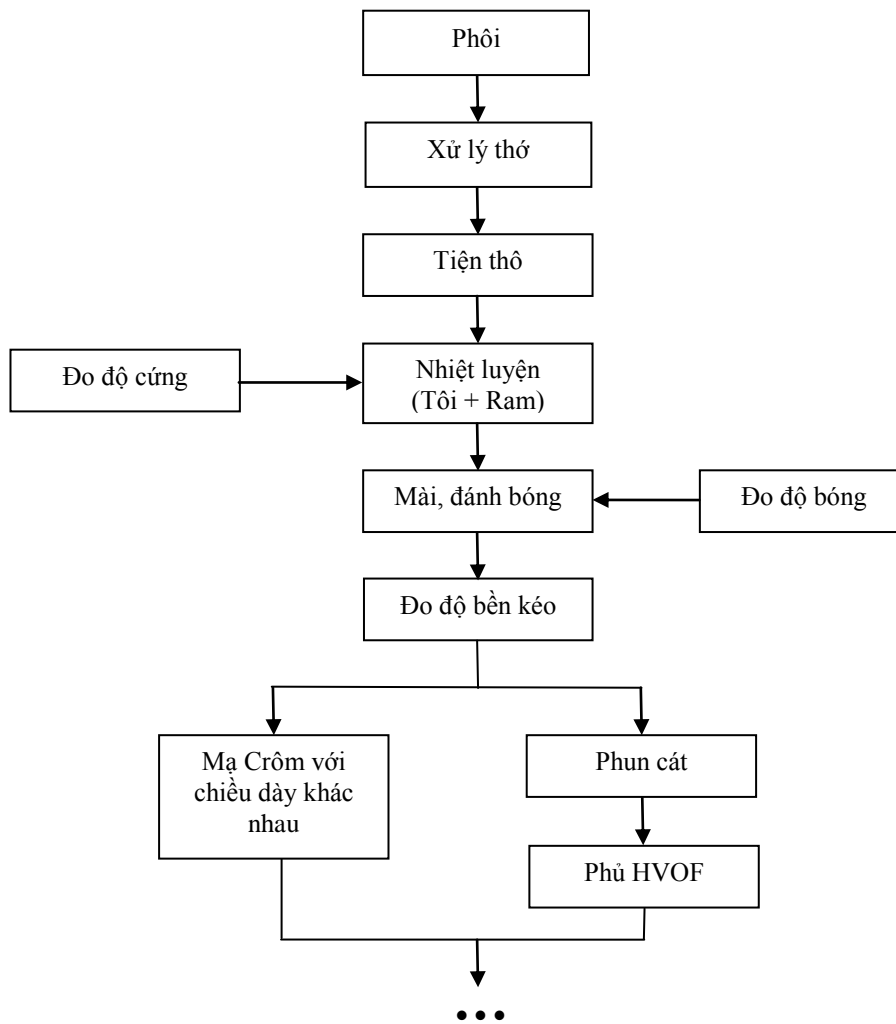


Hình 3.20. Bản vẽ thiết kế mẫu thử độ bền kéo

3.3.2 Quy trình chế tạo chi tiết mẫu

Đối tượng nghiên cứu của luận án là các chi tiết trục trong thực tế như: các loại trục chính, trục lắp bánh răng,... Các trục được chế tạo từ thép C45 thường áp dụng quy trình nhiệt luyện (tôi và ram) để nâng cao cơ tính tổng hợp (độ bền, độ cứng, độ dai va đập,...). Do đó quy trình nhiệt luyện này cũng phải được thể hiện trong quá trình chế tạo mẫu thí nghiệm mới. Như đã tổng hợp trong chương 1, các công trình đã công bố chỉ thực hiện nghiên cứu trên thép C45 nhưng không qua nhiệt luyện [49-52]. Trong khi quá trình nhiệt luyện ảnh hưởng rất lớn đến tổ chức tế vi, cơ tính và đặc biệt là độ bền mỏi của chi tiết nền (thép C45). Vì vậy, luận án thực hiện đánh giá ảnh hưởng của công nghệ mạ phủ đến độ bền mỏi của chi tiết mẫu (thép C45) đã được nhiệt luyện theo chế độ trục. Điều này là cần thiết khi các chi tiết trục làm từ thép C45 đều phải nhiệt luyện.

Một quy trình chế tạo các chi tiết mẫu phục vụ thực nghiệm được đề xuất như ở Hình 3.21.



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

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

3.4.1 Lựa chọn số lần thí nghiệm

Để xây dựng đường phương trình mô 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 là 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:

$$N = 2^1 + 2 \cdot 1 + 1 = 5$$

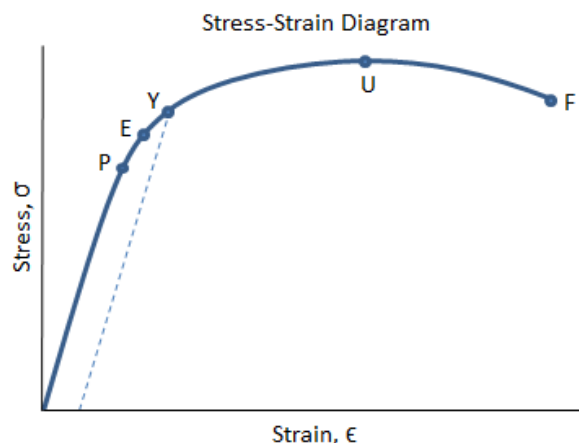
Để đáp ứng số liệu có độ tin cậy cao và mang ý nghĩa thống kê, số lần lặp lại của mỗi thí nghiệm là 3 lần [79 - 81].

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.

Ta biết rằng, quan hệ giữa ứng suất và biến dạng của vật liệu được biểu diễn ở Hình 3.22, trong đó:

- Điểm Y (Yield strength) là điểm giới hạn chảy của vật liệu.
- Điểm E (Elastic limit) là điểm giới hạn đàn hồi của vật liệu.
- Điểm P (Proportionality limit) là điểm đại diện cho giá trị tối đa của ứng suất mà tại đó đường cong ứng suất là tuyến tính [77].

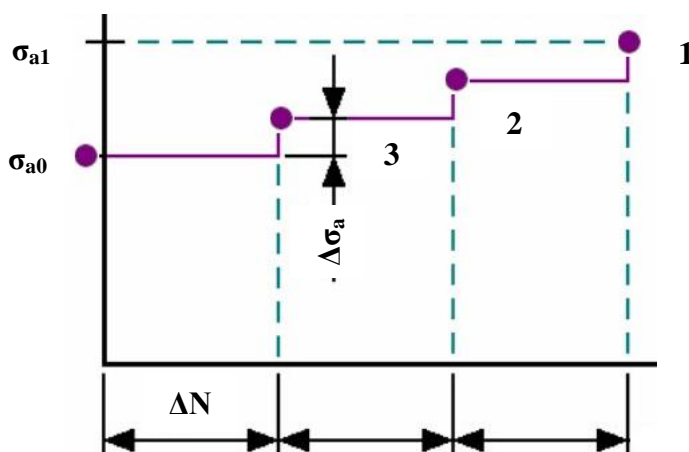


Hình 3.22. Đồ thị ứng suất biến dạng của vật liệu [77]

Trong thực tế, các chi tiết trục luôn làm việc trong miền đàn hồi tức là ứng với mức ứng suất dưới điểm P và phá hủy mỏi cũng xảy ra trong miền ứng suất này.

Như vậy, khi tiến hành chạy thí nghiệm mỏi, để chi tiết mẫu không bị biến dạng khi tác động lực thì ta cần phải chọn các mức ứng suất nằm trong vùng đàn hồi nhưng phải trên đường tuyến tính, nghĩa là chọn các mức ứng suất nhỏ hơn điểm P. Thông thường, điểm P có giá trị bằng 70% của điểm Y, kết hợp với kết quả thực nghiệm độ bền chảy σ_c ta lựa chọn các mức ứng suất sơ bộ để tiến hành chạy và nhằm xác định các mức ứng suất kế tiếp và ứng suất ứng với giới hạn mỏi có số chu kỳ hoạt động đạt được giá trị 10^7 chu kỳ theo phương pháp bậc thang “Staircase” [81, 82].

Mức ứng suất cơ sở được lựa chọn sơ bộ dựa vào 3 giá trị đầu tiên là (66%, 59%, 56%) σ_c [46]. Các giá trị sơ bộ σ'_f (hệ số độ bền mỏi) và b (hệ số mũ) 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 phụ thuộc vào yêu cầu làm việc và kích thước của của từng chi tiết cụ thể. Trong luận án, chi tiết mẫu thí nghiệm mỗi được thiết kế theo tiêu chuẩn ISO 1143:2010 có đường kính phần mạ phủ là $\varnothing 7,5$ mm nên chiều dày lớp mạ phủ crôm không thể quá lớn. Trong thực tế, kích thước của các trục lớn hơn nhiều nên lớp phủ sẽ có phạm vi biến động lớn hơn (dày hơn), do vậy cần xác định chiều dày lớp phủ trên chi tiết mẫu một cách phù hợp. Để đảm bảo tính đồng dạng về chiều dày lớp mạ phủ, tỷ lệ chiều dày phủ/đường kính trục (t/d) đã được xem xét.

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. Trên Bảng 3.4 trình bày tỷ lệ chiều dày phủ/ đường kính mẫu (t/d). Tỷ lệ này là cơ sở ban đầu để xác định chiều dày lớp mạ phủ ứng với mỗi một kích thước trục thực tế. Với đường kính nhỏ hơn 20 mm thì từ tỉ lệ t/d có thể chọn chiều dày mạ phủ tối đa lên đến 240 μm , đường kính lớn hơn 20 mm thì có thể chọn chiều dày phủ lớn tối đa lên đến 500 μm .

Bảng 3.4. Tỷ lệ chiều dày phủ/ đường kính mẫu (t/d)

Mẫu phủ		Tỷ lệ t/d
Chiều dày	10 μm	0,0013
	30 μm	0,004
	60 μm	0,008
	90 μm	0,012

Theo nghiên cứu của Tuominen, các trục thường được mạ crôm cứng với chiều dày từ 20-100 μm để tăng độ cứng và chống mài mòn [85]. Nghiên cứu về phá hủy mỏi của Ortiz-Mancilla [86] cũng chỉ thực hiện trên lớp phủ có chiều dày là 7 μm . J. Pina nghiên cứu ứng suất dư của lớp mạ crôm cho các chiều dày 10, 50 và 100 μm [87]. Các công trình nghiên cứu của Carvalho [21], Voorwald [22] về mỏi của lớp mạ crôm cũng chỉ thực hiện cho lớp mạ phủ có chiều dày đến 100 μm .

Một số công trình được công bố gần đây khi nghiên cứu về độ dày lớp phủ đến độ bền mỏi của chi tiết máy cũng cho thấy chiều dày lớp phủ được khảo sát dưới 100 μm như công trình của Kadhim và các cộng sự [20] đã đánh giá ảnh hưởng đến độ bền mỏi của lớp mạ crôm với chiều dày 13-32 μm ; Maleki và Reza Kashyzadeh [88] đánh giá lớp phủ Niken cứng với chiều dày 13 và 19 μm đến độ bền mỏi trên nền thép C45; Eder và các cộng sự [89] đánh giá ảnh hưởng của chiều dày lớp phủ mạ kẽm đến độ bền mỏi của chi tiết máy với chiều dày khảo sát là 30, 60, 90 μm ; Prosek và các cộng sự [90] đã khảo sát chiều dày lớp phủ kẽm với chiều dày 7-20 μm ; Dongxing Du và các cộng sự [91] cũng chỉ đánh giá ảnh hưởng của lớp phủ WC-10Co với chiều dày 55 μm trên chi tiết mẫu mỏi có đường kính $\text{Ø}6\text{ mm}$;...

Ngoài ra, kỹ thuật mạ crôm ngày nay cũng chỉ có thể mạ phủ đến chiều dày 500 μm [64, 78] và với chiều dày mạ phủ từ 100 μm trở lên sẽ được áp dụng cho chi tiết cần mài lại sau phủ. Bảng 3.5 giới thiệu về việc chọn chiều dày cần thiết của lớp crôm cứng cho các dụng cụ, chi tiết máy làm từ vật liệu thép [64].

Bảng 3.5. Chiều dày lớp crôm cứng cho các ứng dụng khác nhau [64]

Ứng dụng	Yêu cầu độ cứng (HRC)	Chiều dày lớp crôm (μm)
Mũi khoan	62-64	1,3-13
Mũi dao	62-64	2,5-13
Thanh cườm	60-62	13-75
Đầu chuốt dây	60-62	38-205
Khuôn chuốt dây	62 mặt trong	
	45 mặt ngoài	13-205
Khuôn đúc nhựa	55-60	5-50
Dưỡng đo	48-58	2,5-38
Trục máy bơm	55-62	13-75
Tang quay	-	6-305
Búa thủy lực	-	13-100
Bản in	-	5-13

Bảng 3.5 cho thấy, các loại trục sử dụng trong công nghiệp thường được mạ với chiều dày 13-300 μm . Và khi mạ càng dày thì sai số chiều dày càng lớn yêu cầu phải gia công mài lại sau mạ [64]. Như vậy, 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 $\text{Ø}7,5$ 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 môi 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 Al_2O_3 tạo nhám trước khi phủ, quá trình phủ không thể điều chỉnh lượng cấp bột quá ít trong một lần phủ. Vì vậy, đối với phương pháp phủ HVOF, lớp phủ được lựa chọn với ba chiều dày 30, 60, 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



a) Mẫu nền trước khi mạ



b) Mẫu sau khi mạ 60 μm



c) Mẫu sau khi phủ 60 μm

Hình 3.24. Mẫu trước và sau khi phủ

3.6 Quy trình mạ crôm và phủ carbide vonfram

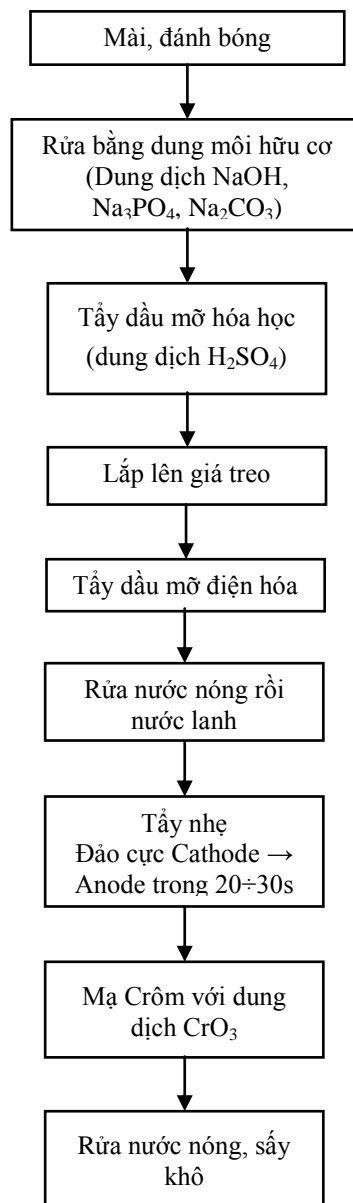
3.6.1. Quy trình mạ crôm

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 (Hình 3.25) và sử dụng dung dịch mạ chỉ 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_2SO_4	2.0
Nồng độ Cr^{3+}	3 - 6
Nhiệt độ, $^{\circ}\text{C}$	55
i_a (A/dm^2)	30
H (%)	12
Tỉ lệ $\text{CrO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$	100/1
Tỉ lệ diện tích các cực S_a/S_c	1/1 - 2/1
Tốc độ mạ, $\mu\text{m}/\text{ph}$	0.15 - 0.60

Quy trình mạ áp dụng được giới thiệu ở Hình 3.25.



Hình 3.25. Sơ đồ quy trình mạ

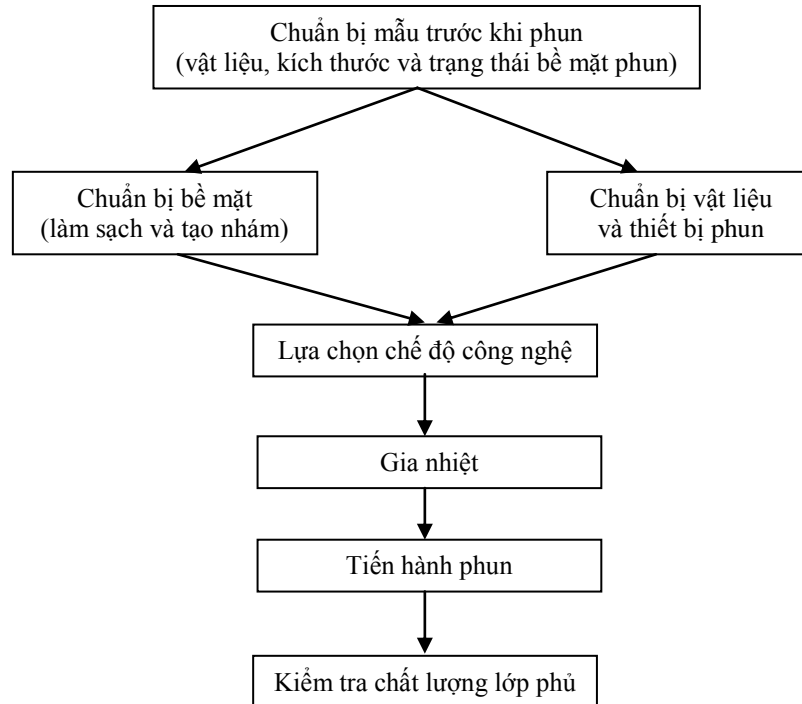
Trong quy trình mạ crôm cần phải tiến hành đảo cực giúp tăng cường chất lượng lớp mạ. Quá trình này làm cho dung dịch mạ không bị loãng dần giữa hai cực, tránh được hiện tượng ion H^+ làm cho bề mặt lớp mạ tăng cứng và cản trở quy trình mạ.



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). Quy trình phủ được thể hiện trong Hình 3.27



Hình 3.27. Quy trình phủ HVOF

Trước khi tiến hành phun phủ, mẫu được tiến hành gá đặt và gắn ống bảo vệ phần không phun và được tạo nhám bằng cách phun cát Al_2O_3 với các thông số như ở Bảng 3.7.

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	$R_a = 4,3 \mu m$

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 áp dụng trong nghiên cứu này 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]. Thông số này cũng phù hợp với chế độ phủ HVOF công nghiệp hiện nay trong các cơ sở mạ phủ.

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

Hình 3.28 và 3.29 thể hiện quá trình phủ HVOF và chi tiết mẫu sau khi phủ xong.



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

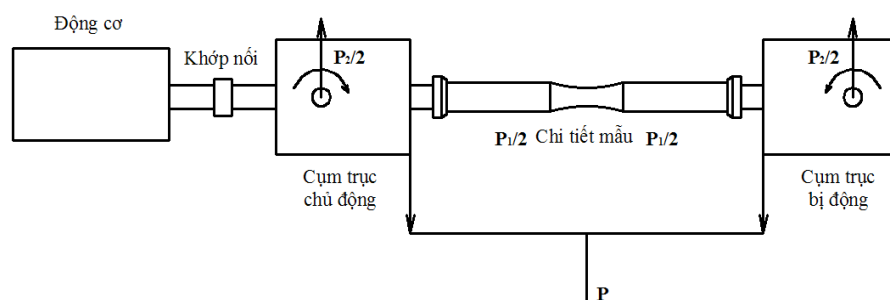
Để đánh giá được độ bền mỏi của lớp mạ phủ theo tiêu chí *ứng suất - biến dạng* ta cần phải xây dựng đường cong mỏi. Đường cong mỏi có thể được xây dựng từ mô hình toán Wöhler cùng với các mô hình toán mở rộng khác như Stussi, Weibull, Basquin là các mô hình toán đã và đang được sử dụng trong nghiên cứu mỏi. Trong chương này sẽ trình bày các nội dung nghiên cứu xác định mô hình toán phù hợp để đánh giá độ bền mỏi của lớp mạ phủ trên chi tiết trục chịu uốn xoay theo tiêu chí *ứng suất - biến dạng*. Ngoài ra, yếu tố ứng suất dư có ảnh hưởng lớn đến giá trị thực nghiệm độ bền mỏi cũng sẽ được xác định, tính toán bằng phương pháp nhiễu xạ tia X. Liên quan đến vấn đề này, yếu tố ảnh hưởng đến độ chính xác tính toán ứng suất bao gồm hệ số hấp thụ tia X và sai số ứng suất cũng sẽ được đề cập đến một cách cụ thể.

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

4.1.1 Sơ đồ mô hình thí nghiệm mỏi

Việc xác định mô hình thí nghiệm mỏi là bước quan trọng trong quá trình xây dựng mô hình toán cho đường cong mỏi. Tùy theo điều kiện làm việc và hình dáng chi tiết mẫu mà có mô hình thí nghiệm mỏi khác nhau: mỏi dạng tấm, mỏi dạng trục, mỏi kéo nén, mỏi uốn Với đối tượng nghiên cứu của luận án là chi tiết trục quay chịu uốn nên mô hình thí nghiệm mỏi uốn xoay là phù hợp để nghiên cứu.

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

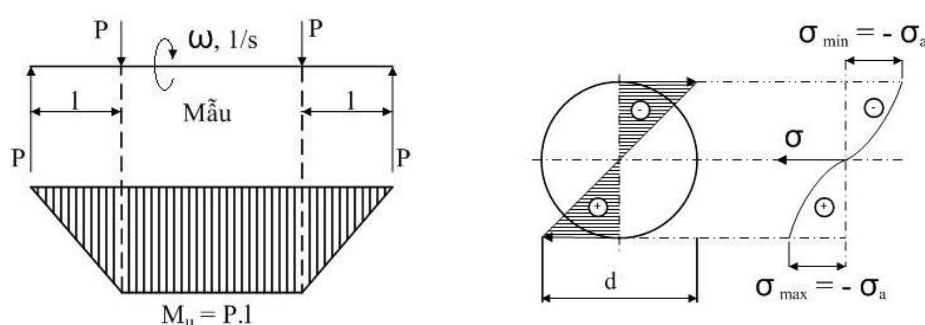


Hình 4.1. Sơ đồ nguyên lý tạo mỏi uốn quay 4 điểm

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 mô-men. Giá trị lực tác dụng sẽ được đo bằng cảm biến lực (loadcell). Số chu kỳ gây mô-men 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 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 P 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

- Mô-men 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 lắ
- + W_u (mm³) là mô-men 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 phương trình đường cong mỏi với mối quan hệ ứng suất áp tải σ 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 như 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 Trial-and-Error) để tìm trị số σ_F , và đây cũng chính là nhược điểm của phương pháp này. Để xác định đường cong mỏi, ta cần phải tiến hành nhiều phép thử với các giá trị σ_F khác nhau đến khi chọn được giá trị phù hợp.

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

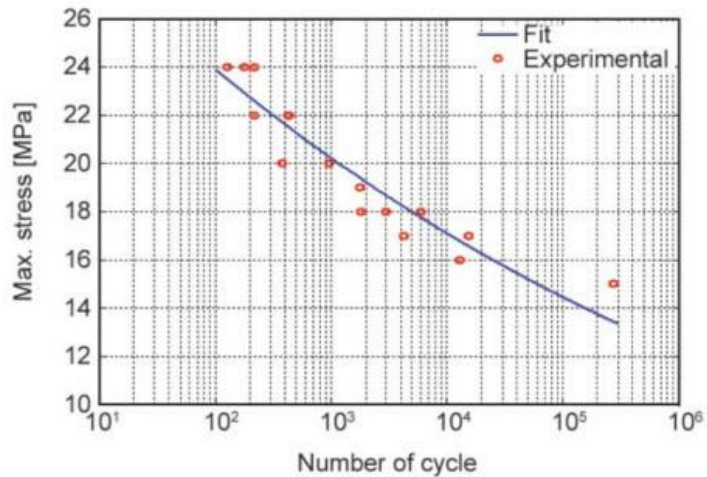
$2N_f$ - Số chu kỳ phá hủy

b - Hệ số mũ Basquin

Mô hình toán với phương trình mũ này được đánh giá là tương thích với phương trình 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 nên [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 nghiên cứu 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.

Tùy theo các dạng môi khác nhau, các thông số σ_a (biên độ ứng suất) và $2N_f$ (số chu kỳ tương ứng) là các biến. Các hệ số σ'_f và b phụ thuộc vào vật liệu, cũng như các tính chất của chi tiết mẫu. Để có được trị của các hệ số σ'_f và b , ta cần phải tiến hành thực nghiệm và xử lý số liệu để tính toán xác định. Từ đó đường cong mỏi được thành lập (Hình 4.3).



Hình 4.3. Đường cong mỏi được thành lập từ thực nghiệm [99]

Từ mô hình thí nghiệm mỏi 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:

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

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

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

...

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

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:

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

Từ các tính toán, phân tích trên, mô hình toán đường cong môi 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 thu tia X trong quá trình đo ứng suất

4.2.1 Giới thiệu về hàm hấp thu tia X

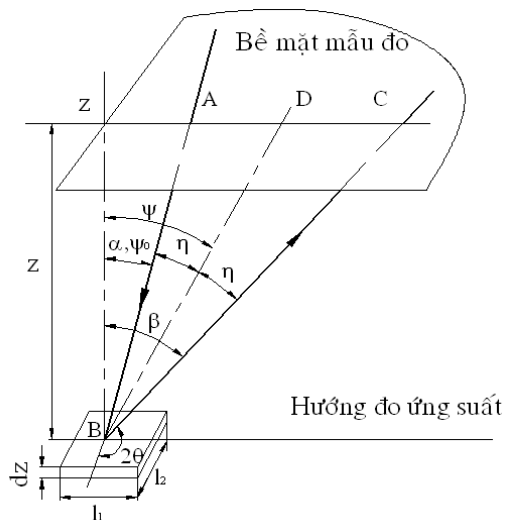
Kết quả khảo cứu trong chương 1 cho thấy ứng suất dư có ảnh hưởng rất lớn đến độ bền mỏi của chi tiết máy. Do vậy việc đo xác định chính xác giá trị ứng suất dư có ý nghĩa quan trọng trong việc đánh giá độ bền mỏi. Để đo ứng suất dư của vật liệu nói chung và lớp phủ mỏng nói riêng, phương pháp đo nhiễu xạ tia X là phương pháp hiện đại nhất hiện nay đang được áp dụng.

Ứng suất dư được tính thông qua vị trí của đỉnh nhiễu xạ tia X sau khi áp dụng các hàm toán học để nội suy đường cong nhiễu xạ từ dữ liệu máy đo. Do vậy, dữ liệu để nội suy càng chính xác sẽ cho kết quả đo ứng suất có độ tin cậy càng cao. Tuy nhiên, cường độ nhiễu xạ (dữ liệu từ máy đo) bị mất mát do hệ số phân cực và sự hấp thu của vật liệu LPA (*Lorentz-Polarization and Absorption*) dẫn đến ảnh hưởng kết quả đo ứng suất. Do vậy, vị trí đỉnh của đường nhiễu xạ phải được hiệu chỉnh bởi các hệ số này. Trong đó hàm hấp thu A là quan trọng nhất bởi vì có ảnh hưởng lớn nhất đến đỉnh đường nhiễu xạ. Hàm hấp thu cho phương pháp đo Ω cố định góc ψ đã được Koistinen [102] đề xuất. Tuy nhiên, trong một số trường hợp phương pháp đo Ψ lại hiệu quả hơn phương pháp Ω và nó có thể đo đường nhiễu xạ với góc nghiêng ψ lớn [103]. Do vậy, cần nghiên cứu thiết lập hàm hấp thu cho cả hai phương pháp đo trên để hiệu chỉnh đường nhiễu xạ tia X trong quá trình đo ứng suất để kết quả đo ứng suất sẽ có độ chính xác cao hơn.

4.2.2 Phương pháp đo kiểu Ω và kiểu Ψ

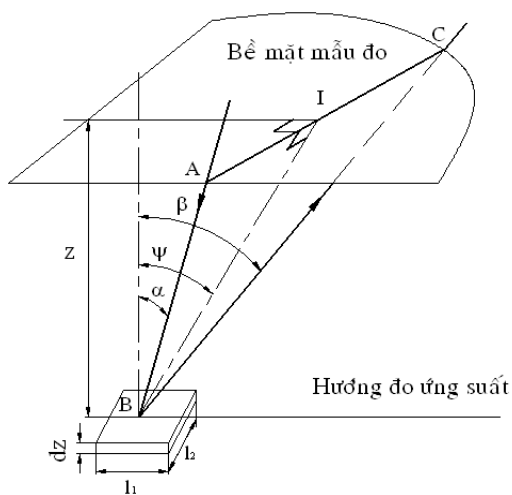
Phương pháp đo Ω (*Iso-Inclination method*) là phương pháp đo mà tia tới AB và tia nhiễu xạ BC đều nằm trong mặt phẳng đo ứng suất (Hình 4.4). Tia tới AB có cường độ nhiễu xạ là I_0 ứng với diện tích mặt cắt ngang là 1×1 (mm). Tia nhiễu xạ BC có cường độ là I thu được trên một thể tích tinh thể được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

nhieu 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).

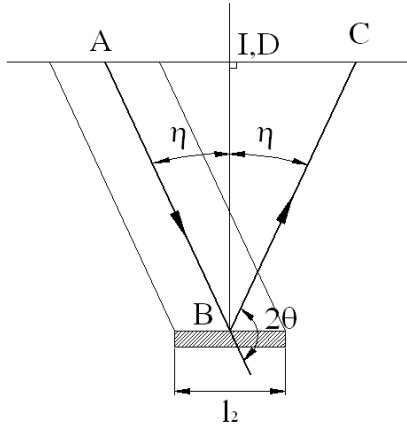


Hình 4.4. Phương pháp đo Ω

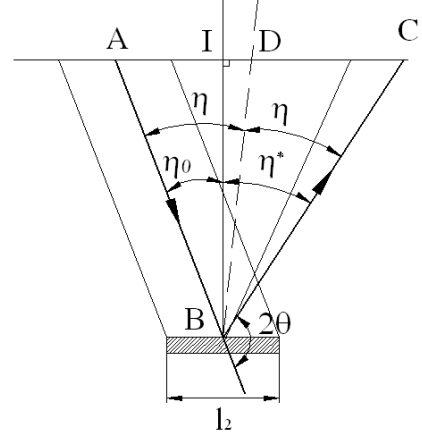
Đối với phương pháp đo Ψ (*Side-Inclination method*) tia tới AB và tia nhiễu xạ BC nằm trong mặt phẳng vuông góc với mặt phẳng đo ứng suất (Hình 4.5a).



Hình 4.5a. 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 (Hình 4.5b), 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. Trong khi phương pháp đo Ψ cố định góc η_0 (Hình 4.5c), 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 .

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]:

$$dI = aI_0 \exp[-\mu(AB + BC)]Sdz \quad (4.11)$$

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

$$I = \int_0^{\infty} I_0 a \exp \left[-\mu \left(\frac{z}{\cos \alpha} + \frac{z}{\cos \beta} \right) \right] l_1 l_2 dz$$

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

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 .

4.2.2.1 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 $\eta = 90^\circ - \theta$

$$\begin{aligned}
\text{Suy ra} \quad \cos \alpha &= \cos \psi_0 = \sin(\psi + \theta) \\
\cos \beta &= \cos(\psi + \eta) = \cos(\psi + 90^\circ - \theta) = -\sin(\psi - \theta)
\end{aligned} \quad (4.15)$$

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 $\eta_0 = 90^\circ - \theta_0$, $\eta^* = 180^\circ - 2\theta - \eta_0$

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

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

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

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

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

4.2.2.2 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:

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

Tương 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 :

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

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 tia X cho cả 2 phương pháp đo Ω và Ψ được tổng hợp ở 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
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	$\frac{-\sin(\psi - \theta)}{\sin(\psi + \theta) - \sin(\psi - \theta)}$	$\frac{\cos 2\psi - \cos 2\theta}{4 \cdot \sin \theta \cdot \cos \psi}$
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.

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

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

trong đó các v_i là các sai số.

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

$$S = \sum_{j=1}^n v_j^2 = (m \sin^2\psi_j + n - d_j) \rightarrow \min \quad (4.26)$$

Vậy m , n phải thỏa các phương trình:

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial m} = \sum_{j=1}^n \sin^2\psi_j (d_j - m \cdot \sin^2\psi_j - n) = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial n} = \sum_{j=1}^n (d_j - m \cdot \sin^2\psi_j - n) = 0 \end{cases} \quad (4.27)$$

Giải phương trình trên ta được:

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

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

$$\text{Với } A_j = \frac{n \times \sin^2 \psi_j - \sum_{j=1}^n \sin^2 \psi_j}{n \sum_{j=1}^n \sin^2 \psi_j - (\sum_{j=1}^n \sin^2 \psi_j)^2} \quad (4.28)$$

Từ công thức (2.52) ta có ứng suất có thể viết lại theo tính toán đỉnh nhiễu xạ:

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

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

$$\text{Sai số ứng suất } \sigma_s^2 = \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial \sigma_\varphi}{\partial p_j} \right)^2 \times \sigma_{p_j}^2 = K^2 \sum_{j=1}^n A_j^2 \sigma_{p_j}^2 \quad (4.29)$$

Trong đó: σ_{p_j} là sai số đỉnh nhiễu xạ được xác định qua dữ liệu đo.

Vậy sai số của ứng suất:

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

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

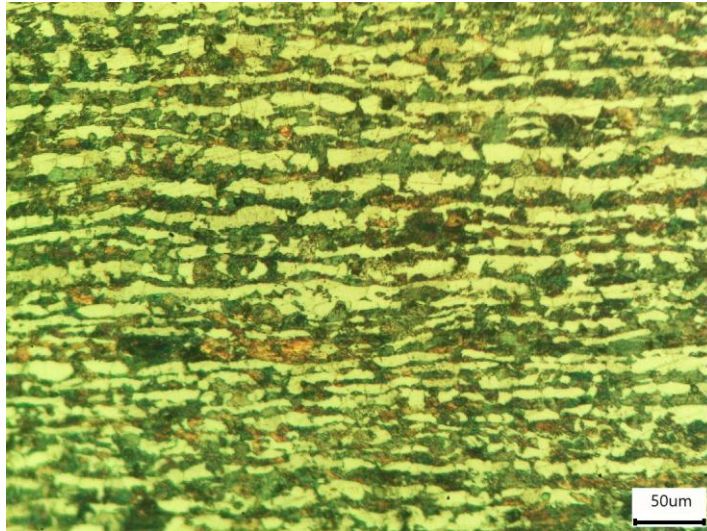
5.1 Nghiên cứu đề xuất quy trình xử lý nhiệt cho chi tiết mẫu

Theo tiêu chuẩn ISO 1143:2010, tiêu chuẩn về thí nghiệm mỏi uốn quay 4 điểm, để có thể có được kết quả thí nghiệm với độ tin cậy cao thì vật liệu chế tạo chi tiết mẫu thí nghiệm yêu cầu phải đạt được tính đẳng hướng, đồng nhất. Điều này có nghĩa là chi tiết mẫu cần được xử lý nhiệt. Do vậy, để đáp ứng các yêu cầu của tiêu chuẩn ISO 1143:2010 cũng như phản ánh thực tế chế tạo các chi tiết trực đang được sử dụng trong công nghiệp, phôi thanh thép C45 sử dụng để chế tạo chi tiết mẫu cần phải được xử lý nhiệt (xử lý thớ và làm hạt nhỏ lại, đồng đều) trước khi đưa vào gia công cơ khí.

5.1.1 Xử lý thớ

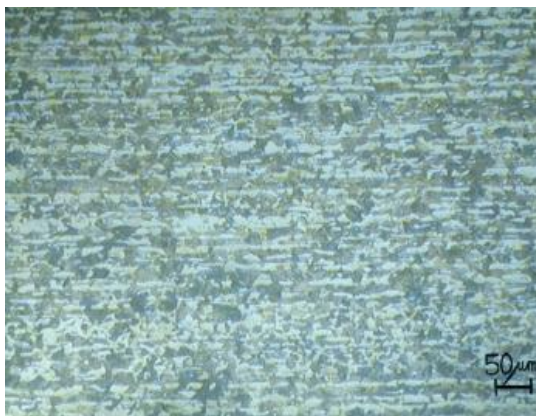
Mục đích của quá trình này là làm mất tổ chức thớ (*texture*) của phôi do quá trình kéo/cán gây ra, đồng thời làm nhỏ hạt và tạo tính đẳng hướng trong mẫu. Phôi thép được sử dụng trong nghiên cứu này là thép cán đường kính nhỏ ($\phi 14$ mm), do bản chất công nghệ sản xuất nên sau khi kéo/cán cấu trúc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

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). Điều này có nghĩa là mẫu không có tính đẳng hướng và sẽ ảnh hưởng không tốt đến kết quả thí nghiệm nếu hiện tượng thớ không được xử lý. Ngoài ra, nhiều công trình nghiên cứu cũng đã 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 qui 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].

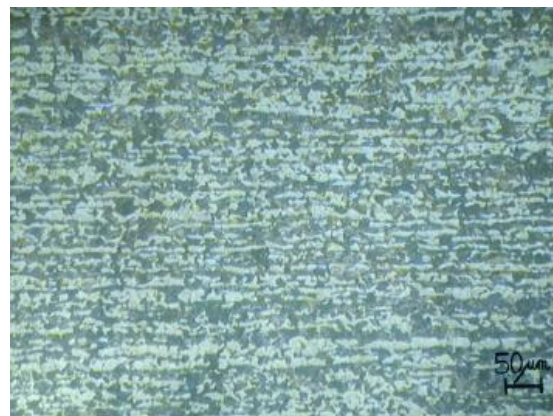


Hình 5.1. Mẫu trước khi xử lý thớ (phương cán)

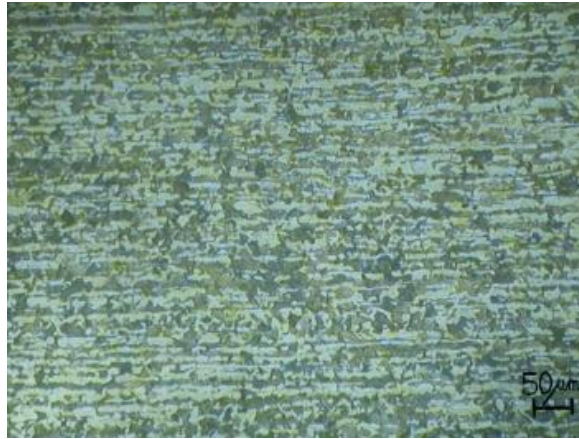
Một qui trình ủ kết tinh lại thường được sử dụng cho thép C45 đã được triển khai cho phôi thép kéo/cán đường kính $\phi 14$ mm ở nhiệt độ ở 500°C , thời gian giữ nhiệt lần lượt là 6, 8 và 10 giờ [112]. Kết quả cho thấy cấu trúc thớ có cải thiện nhưng vẫn còn hiện diện khá đáng kể và được thể hiện qua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



a) 6 giờ



b) 8 giờ



c) 10 giờ

Hình 5.2. Cấu trúc tế vi của thép C45 theo phương cán sau khi xử lý nhiệt theo qui trình thông dụng (dung dịch tẩm thực: 4% Nital)

Trên cơ sở đó, một quy trình nhằm loại bỏ triệt để hơn cấu trúc thớ, làm cho hình dạng hạt đồng nhất cả theo phương 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].

Cụ thể, để xử lý thớ, chế độ xử lý nhiệt được đề xuất: ủ (nguội cùng lò) và thường hóa (nguội trong không khí tĩnh) với nhiệt độ và thời gian giữ nhiệt khác nhau được trình bày trong Bảng 5.1 và Bảng 5.2.

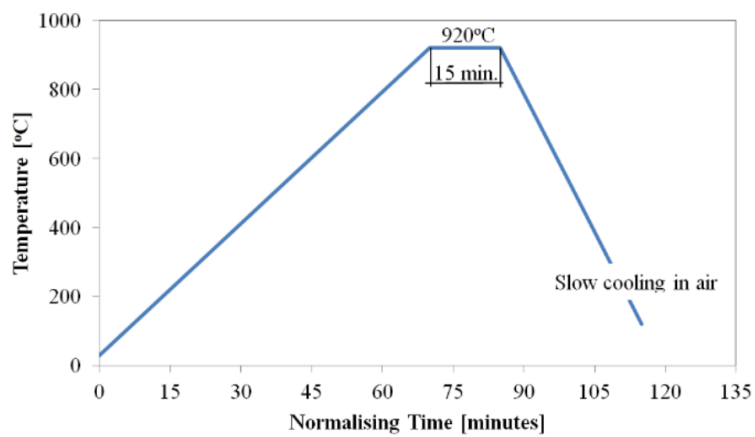
Bảng 5.1. Chế độ ủ đề xuất cho xử lý thớ

Chế độ	Nhiệt độ (°C)	Thời gian (giờ)
1	840	2
2	840	3
3	860	2
4	860	3
5	860	4
6	860	6
7	880	4

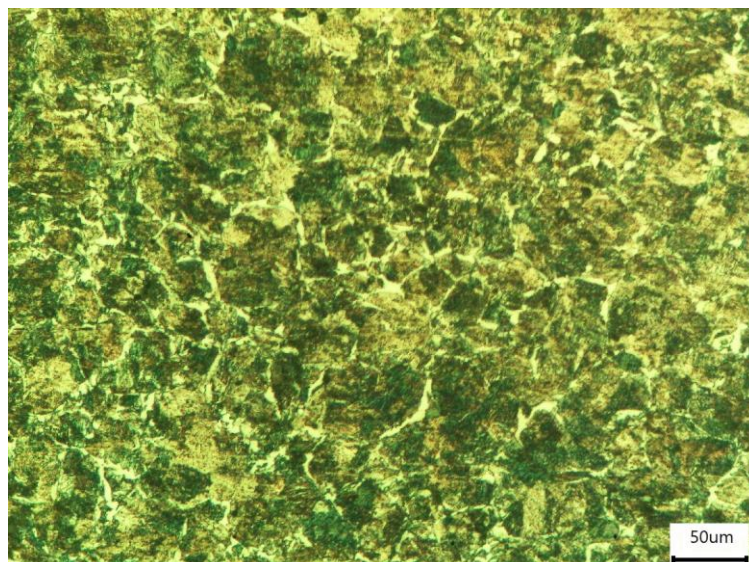
Bảng 5.2. Chế độ thường hóa đề xuất cho xử lý thớ

Chế độ	Nhiệt độ ($^{\circ}\text{C}$)	Thời gian (phút)
1	880	15
2	920	15

Kết quả nghiên cứu cho thấy, tất cả các chế độ xử lý nhiệt đã đề xuất đều làm mất tổ chức thớ [113]. Tuy nhiên, phơi được thường hóa tại nhiệt độ 920°C trong 15 phút (Hình 5.3) làm mất tổ chức thớ triệt để nhất và quy trình này đã được áp dụng để phục vụ các bước chế tạo mẫu tiếp theo.



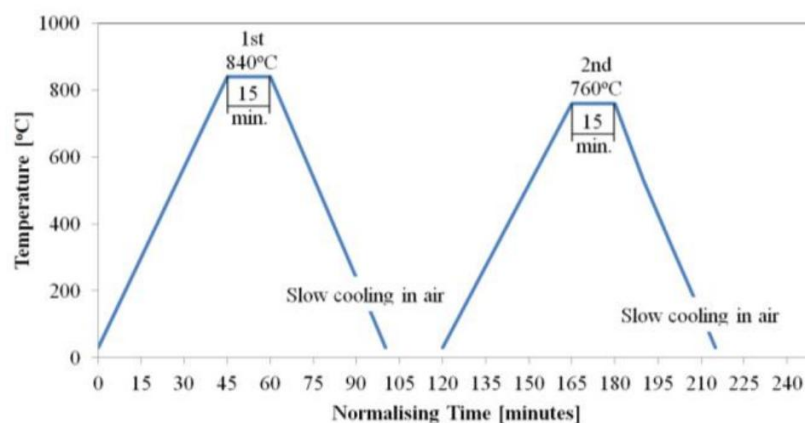
Hình 5.3. Chế độ nhiệt xử lý thớ



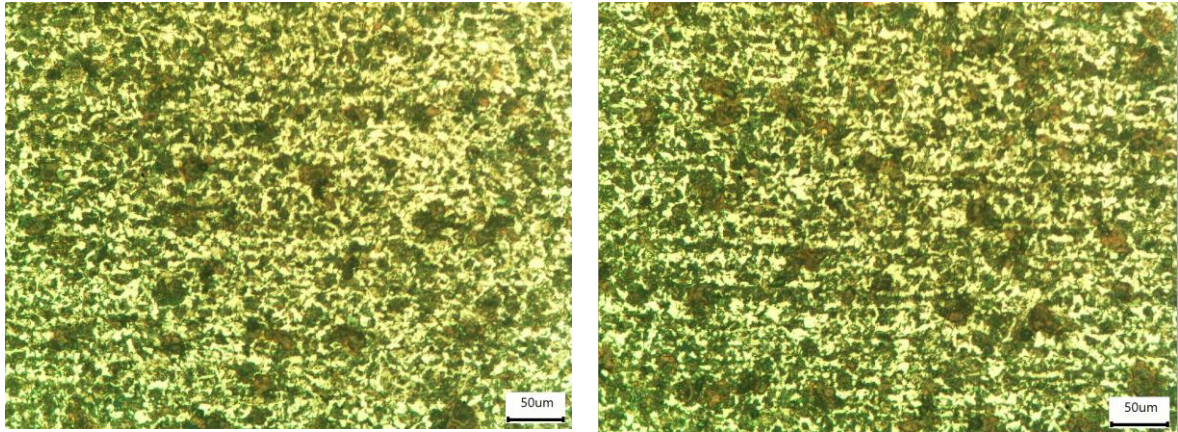
Hình 5.4. Mẫu sau khi xử lý thớ

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

Để làm nhỏ hạt và tạo tính đẳng hướng trong mẫu, thông thường phôi (thép C45) được thường hóa ở nhiệt độ 840°C [112]. Tuy nhiên, sau bước xử lý nhiệt này, kích thước hạt vẫn lớn nên không đảm bảo được tính đẳng hướng. Để khắc phục yếu tố này, một quy trình mới để làm nhỏ hạt đã được trình bày. Phôi sau khi xử lý thớ được thường hóa tại nhiệt độ 840°C và sau đó gia nhiệt lần hai tại 760°C. Mỗi công đoạn được giữ nhiệt trong 15 phút (Hình 5.5). Kết quả từ ảnh tổ chức tế vi (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 vào khoảng 5 – 10 μm , một vài chỗ có kích thước khoảng 15 – 20 μm , nhỏ hơn nhiều so với mới chỉ xử lý thớ (Hình 5.4). Điều này có thể xem là mẫu hoàn toàn có tính đồng nhất và đẳng hướng [114].



Hình 5.5. Chế độ nhiệt tạo hạt nhỏ và làm đồng đều hạt



a) Theo hướng vuông góc phương cán

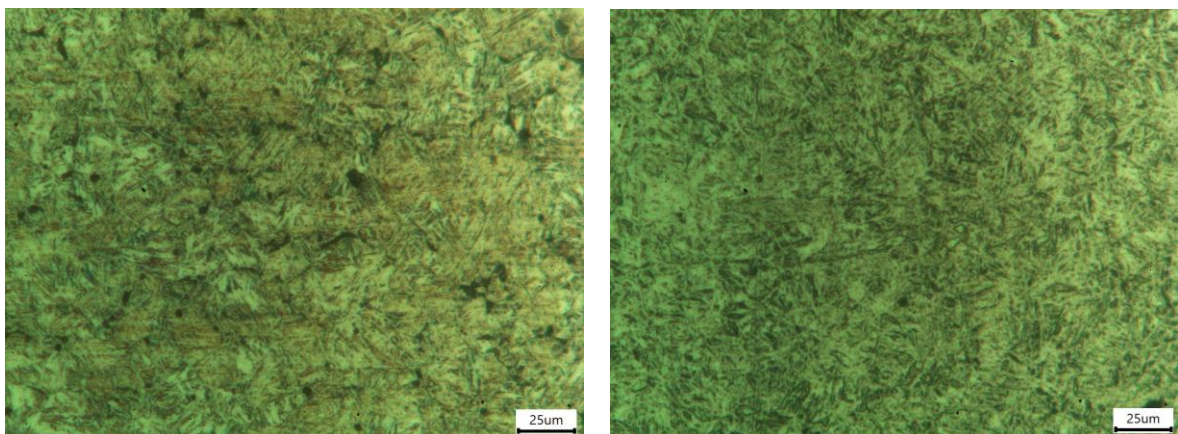
b) Theo hướng dọc theo phương cán

Hình 5.6. Cấu trúc tế vi của mẫu sau qui trình xử lý nhiệt làm hạt nhỏ (thường hóa)

5.1.2 Tôi và ram

Qui 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 đến độ cứng trong khoảng 56 – 59 HRC. Sau tôi, mẫu thép được tiến hành ram ở nhiệt độ 600°C, thời gian giữ nhiệt là 30 phút và làm nguội trong môi trường không khí tĩnh.

Hình 5.7 trình bày tổ chức tế vi của mẫu thép C45 sau khi tôi và ram. Độ cứng sau ram đo được trong khoảng 30 – 31 HRC, phù hợp với chi tiết trực truyền chuyển động, chịu tải trọng thay đổi theo chu kỳ.



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

Mục đích của việc xác định độ bền kéo của mẫu ở đây là để biết được giới hạn chảy của thép C45 sau khi được xử lý thớ và nhiệt luyện (tôi và ram), và từ đó cho phép ta dự đoán lực tác dụng để tiến hành chạy thí nghiệm mỏi trên máy.

Kết quả thử nghiệm kéo các mẫu thép C45 (3 mẫu) sau khi được xử lý thớ và nhiệt luyện (Hình 5.8) được trình bày ở Bảng 5.3.



Hình 5.8. Mẫu sau khi thử nghiệm kéo nén

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 mỏi tối đa ứng với ứng suất lớn nhất $\sigma_{\max} = 70\% \sigma_c$. Sự chọn lựa này phù hợp với miền ứng suất làm việc của chi tiết trục nằm trong giới hạn đàn hồi của thép C45.

5.1.3.2 Độ nhám và độ cứng

Độ nhám và độ cứng của mẫu được đo trên máy SJ-301 (Mitutoyo, Nhật) và máy đo độ cứng ATK-600 (Mitutoyo, Nhật). 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 \pm 0,02

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

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 \pm 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 \pm 2

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

5.2.1 Kết quả đo thông số lớp mạ crôm

5.2.1.1 Chiều dày mạ

Chiều dày lớp mạ phủ crôm trên mẫu sau khi mạ được kiểm tra trên máy MiNiTest 600B-Elektrophysik (CHLB Đức) tại công ty Vivablast Việt Nam. Kết quả đo 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

Từ Bảng 5.7 ta thấy, khi mạ càng dày thì sai số chiều dày lớp mạ càng lớn. Nguyên nhân ở đây là do hiệu suất dòng điện cathode giảm tại chỗ có mật độ dòng điện nhỏ hay nói khác đi là do khoảng cách giữa anode và cathode giảm đi [27, 64].

5.2.1.2 Độ nhám

Độ nhám của mẫu được đo trên máy SJ-301 (Mitutoyo, Nhật). Trong nhóm mẫu mạ crôm lấy ra 3 chi tiết ngẫu nhiên để đo độ nhám. Độ nhám của mẫu mạ

crôm là trung bình giá trị của 3 mẫu này. Kết quả đo được thể hiện ở Bảng 5.8.

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

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

5.2.1.3 Độ cứng và độ bám dính lớp mạ crôm

Độ cứng của lớp mạ phủ được đo thông qua phương pháp Vicker, dựa vào thông số này, độ bám dính của lớp phủ cũng được xác định theo tiêu chuẩn ISO 19207-2016 [62].

a. Thông số đo độ cứng crôm

Kết quả đo độ cứng lớp crôm trên chi tiết mẫu được trình bày ở Bảng 5.9.

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

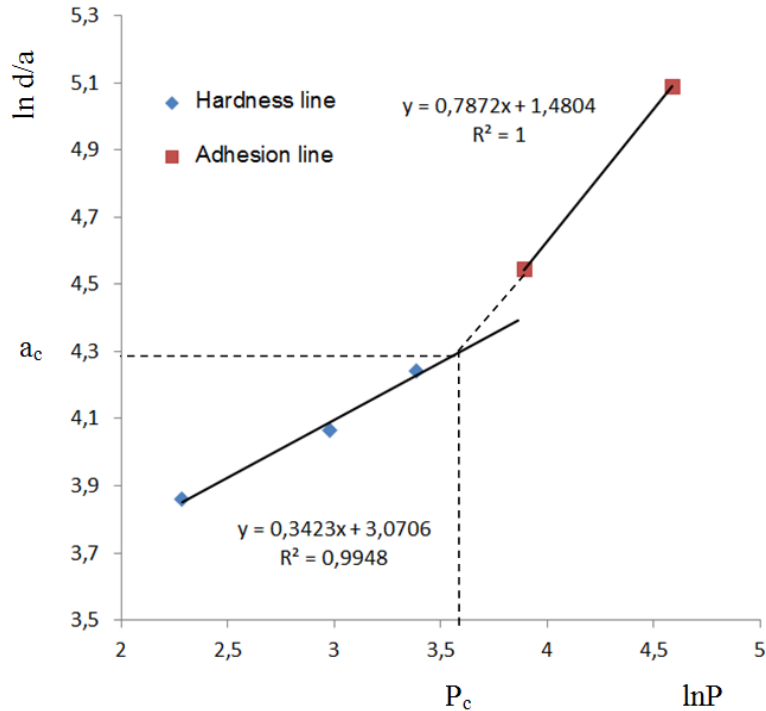
b. Thông số đo độ bám dính của lớp mạ crôm

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 kgf. Tại các giá trị lực 1/2/3 kgf tương đương 9,807/19,61/29,42 N mẫu không xuất hiện vết nứt, ta tiến hành đo đường kính vết lõm mũi đâm d. Khi gia tăng lực tác dụng ở mức lực 5/10 kgf, vết nứt xuất hiện. Kết quả 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

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.



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

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} ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) được tính qua công thức [62]:

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

$$\begin{aligned} \text{Với: } \left(\frac{E}{H} \right)^{1/2} &= \frac{\left(\frac{E}{H} \right)_c^{1/2}}{1 + \left(\frac{H_c}{H_s} \right)^{1/2}} + \frac{\left(\frac{E}{H} \right)_s^{1/2}}{1 + \left(\frac{H_s}{H_c} \right)^{1/2}} \\ &= \frac{\left(\frac{271}{8,012} \right)^{1/2}}{1 + \left(\frac{8,012}{3,047} \right)^{1/2}} + \frac{\left(\frac{200}{3,047} \right)^{1/2}}{1 + \left(\frac{3,047}{8,012} \right)^{1/2}} = 7,22979 \end{aligned}$$

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

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

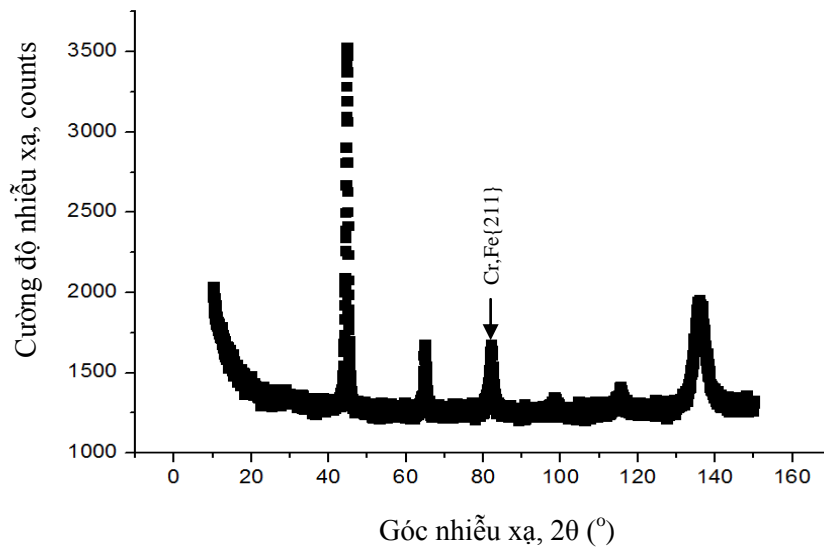
5.2.2 Ứng suất dư của lớp mạ crôm

Nhiều xạ tia X áp dụng phương pháp $d\text{-Sin}^2\psi$ được sử dụng để tiến hành phân tích ứng suất dư trên các mẫu sau khi mạ phủ. Vật liệu crôm có mô-đun đàn hồi $E = 271 \text{ GPa}$ và hệ số Poisson $\nu = 0,23$ [115], còn đối với thép C45 lần lượt là $E = 200 \text{ GPa}$ và $\nu = 0,3$ [116] được sử dụng để tính ứng suất dư ứng dụng kỹ thuật nhiễu xạ tia X. Phương pháp đo Ψ cố định góc η được ứng dụng để đo ứng suất.

Bảng 5.11. Điều kiện nhiễu xạ để đo ứng suất

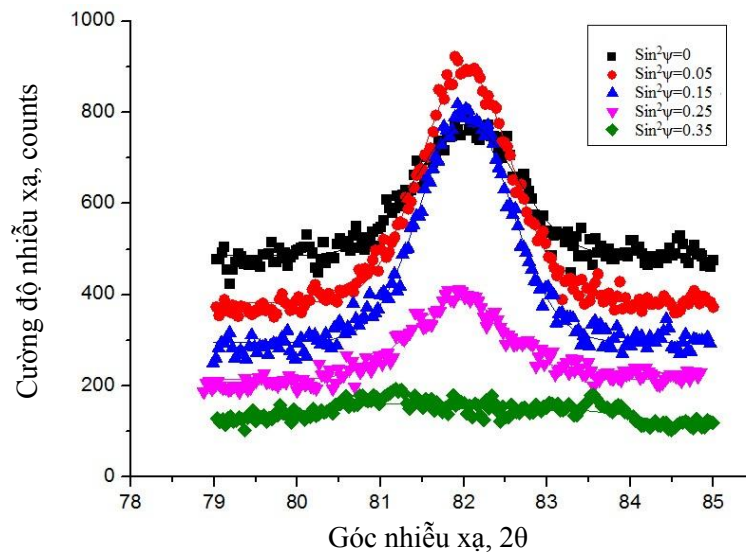
Bức xạ	Cu-K α
Bước sóng	$\lambda_1 = 1,547 \text{ \AA}$
Mặt phẳng nhiễu xạ	(211); (201)
Bộ lọc	Ni
Thời gian preset	30 s
Cỡ bước	$0,04^\circ$
Điện thế và cường độ dòng điện ống phóng	45 kV và 30 A

Mẫu được đặt ở góc $\psi = 0^\circ$, quét trên máy nhiễu xạ có góc 2θ từ $0,2^\circ$ đến 160° , tốc độ quét được duy trì ở $0,03^\circ/\text{s}$ trong quá trình đo. Kết quả đường nhiễu xạ cho thấy có nhiều đỉnh nhiễu xạ tương ứng với góc 2θ (Hình 5.10). Vật liệu crôm và thép C45 đều có thông số mạng là lập phương tâm khối nên có cùng các đỉnh nhiễu xạ. Về mặt lý thuyết, ta có thể chọn bất cứ đỉnh nhiễu xạ nào để tính ứng suất dư. Ở đây, để thuận lợi cho công việc tính toán ứng suất thì đỉnh nhiễu xạ được chọn trong khoảng 82° ứng với mặt nhiễu xạ $\{211\}$ cho cả vật liệu nền và mạ phủ.

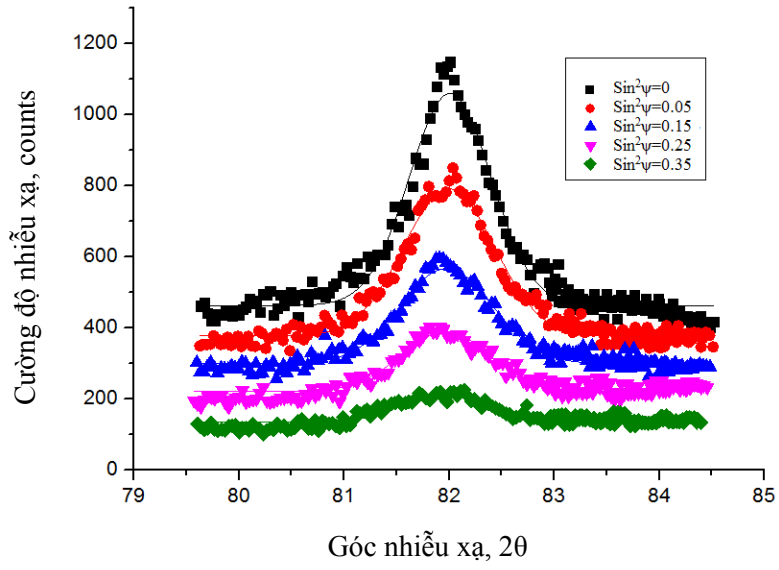


Hình 5.10. Đường nhiễu xạ của vật liệu crôm

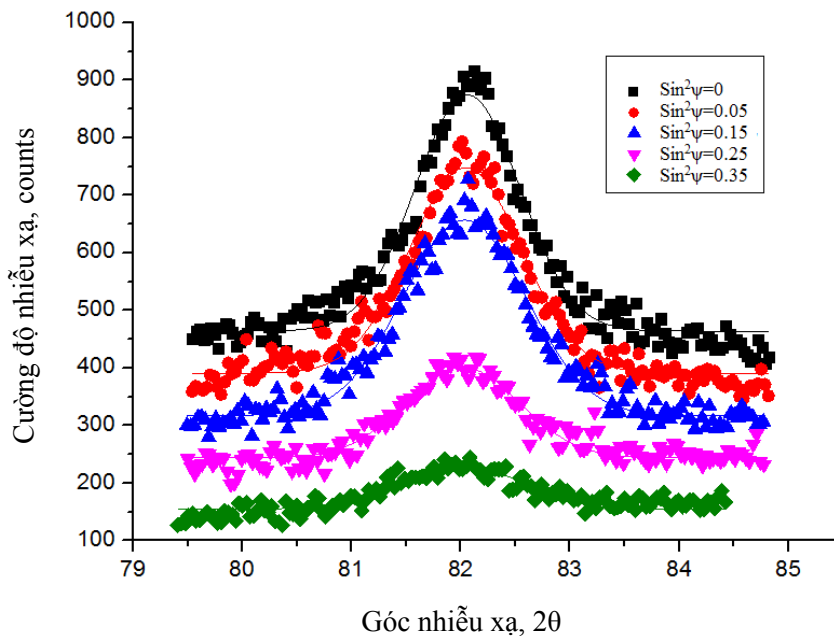
Dùng phương pháp nội suy hàm Gauss để xác định vị trí đỉnh của đường nhiễu xạ đo tại các góc $\text{Sin}^2\psi = 0$; $\text{Sin}^2\psi = 0,05$; $\text{Sin}^2\psi = 0,15$; $\text{Sin}^2\psi = 0,25$; $\text{Sin}^2\psi = 0,35$ ứng với các chiều dày mạ crôm 10 μm , 30 μm , 60 μm và 90 μm . Từ kết quả đo đạc trên máy nhiễu xạ tia X sau khi được hiệu chỉnh bằng hàm LPA (đã được trình bày ở chương 4) và sử dụng phần mềm OriginPro 8.5.1 để nội suy đường nhiễu xạ theo phương trình Gauss cho các chiều dày mạ crôm.



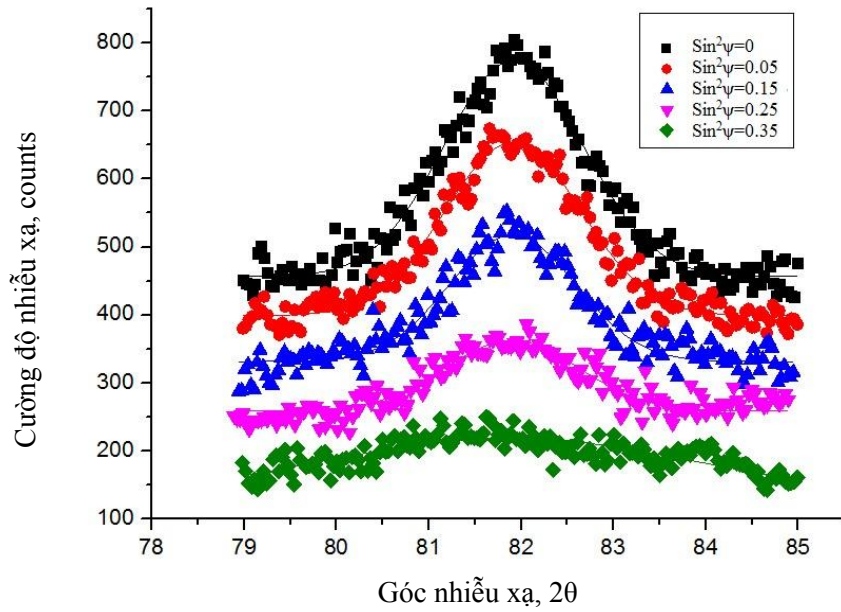
a) Chiều dày 10 μm



b) Chiều dày 30 μm



c) Chiều dày 60 μm



d) Chiều dày 90 μm

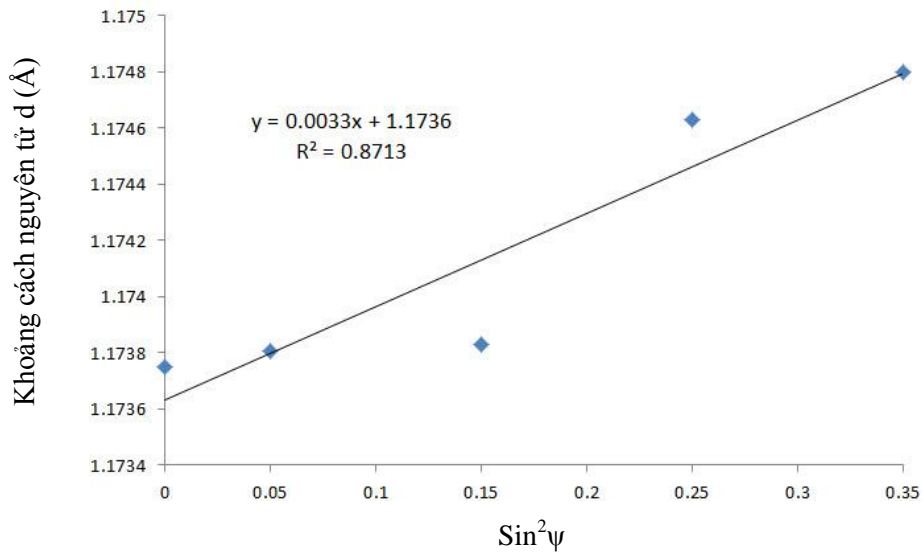
Hình 5.11. Nội suy đường cong Gauss cho lớp mạ crôm

Hình 5.11 thể hiện đường nhiễu xạ cho lớp crôm và vị trí đỉnh nhiễu xạ tương ứng với góc 2θ được nội suy từ đường cong Gauss, khoảng cách mặt tinh thể trong các lớp phủ crôm được tính trong qua công thức Bragg tại công thức 2.32 và được trình bày trong Bảng 5.12.

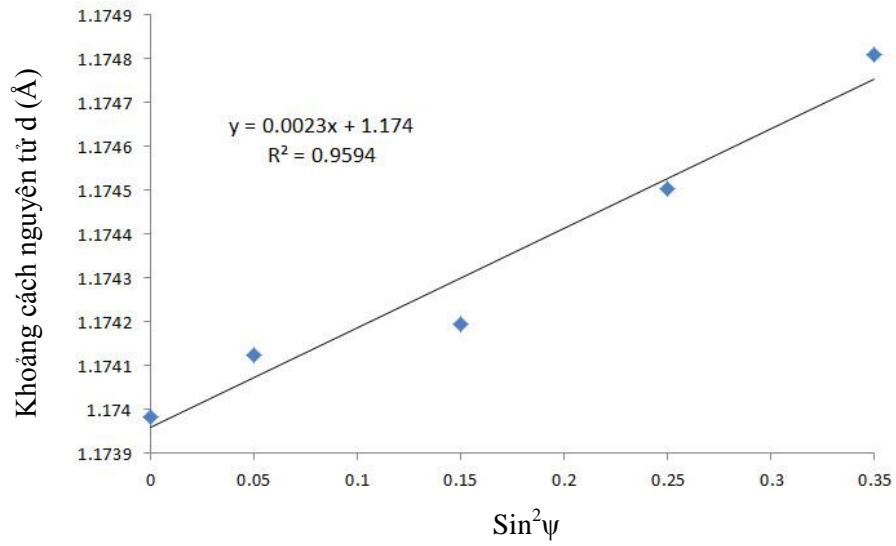
Bảng 5.12. Khoảng cách mặt tinh thể d và góc $2\theta_{\max}$

	$\text{Sin}^2 \psi$	0	0,05	0,15	0,25	0,35
10 μm	$2\theta_{\max}$	82,030	82,025	82,023	81,955	81,940
	D	1,1737	1,1738	1,17382	1,1746	1,1747
	$\text{Sin}^2 \psi$	0	0,05	0,15	0,25	0,35
30 μm	$2\theta_{\max}$	82,010	81,998	81,972	81,966	81,940
	D	1,1738	1,1741	1,1744	1,1745	1,1748
	$\text{Sin}^2 \psi$	0	0,05	0,15	0,25	0,35
60 μm	$2\theta_{\max}$	82,061	82,045	82,035	82,015	82,009
	D	1,1734	1,1736	1,1737	1,1739	1,1740
	$\text{Sin}^2 \psi$	0	0,05	0,15	0,25	0,35
90 μm	$2\theta_{\max}$	81,919	81,913	81,907	81,899	81,88
	D	1,1750	1,1751	1,1752	1,1753	1,1756
	$\text{Sin}^2 \psi$	0	0,05	0,15	0,25	0,35

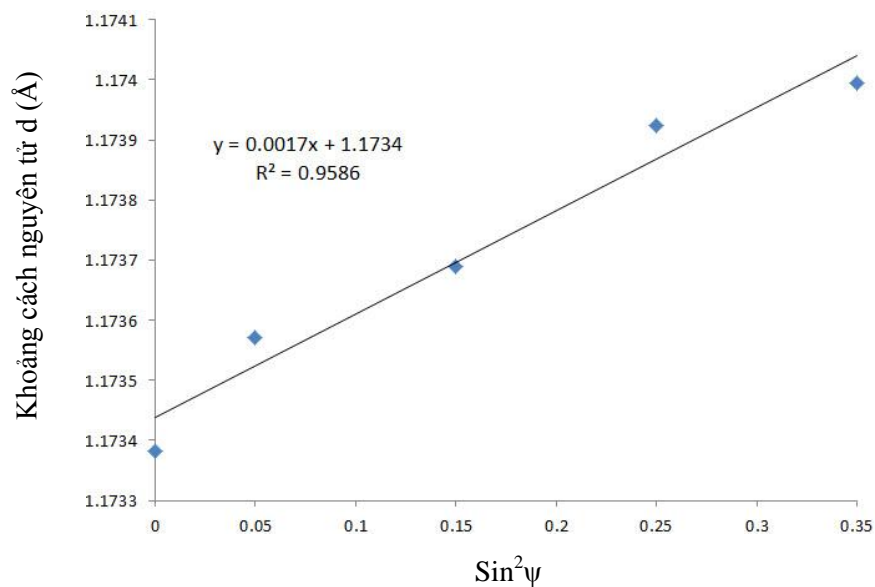
Khi có khoảng cách d và các giá trị $\text{Sin}^2 \psi$ ta nội suy được phương trình đường thẳng tuyến tính biểu diễn mối quan hệ d - $\text{Sin}^2 \psi$ ứng với các chiều dày khác nhau.



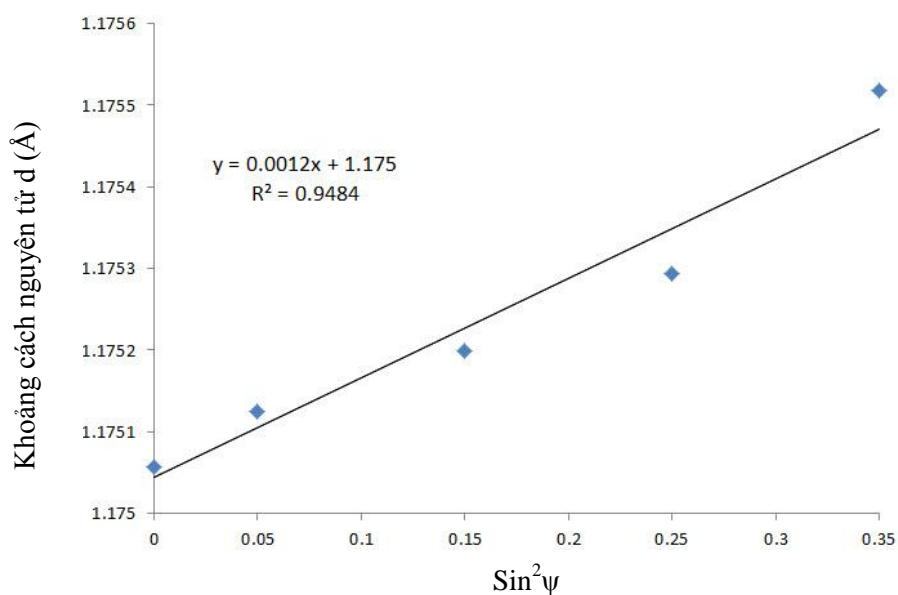
a) Chiều dày $10 \mu\text{m}$



b) Chiều dày $30 \mu\text{m}$



c) Chiều dày 60 μm



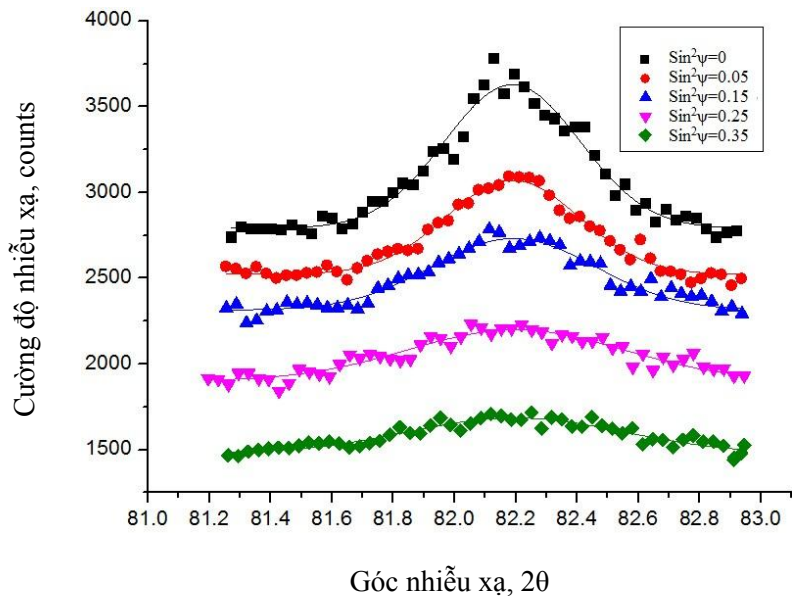
d) Chiều dày 90 μm

Hình 5.12. Đồ thị $d\text{-Sin}^2\psi$ của các mẫu mạ crôm

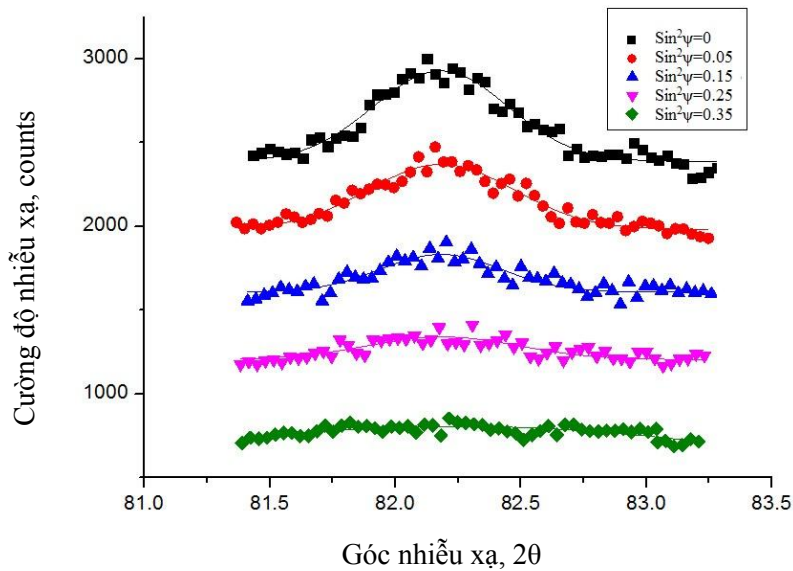
Từ phương trình $d\text{-Sin}^2\psi$, ứng suất dư lớp bề mặt crôm được tính toán theo công thức 2.52 và kết quả thể hiện tại Bảng 5.14.

Để khảo sát sự biến thiên của ứng suất dư trong lớp mạ phủ, việc đo ứng suất tại bề mặt lớp phủ và lớp tiếp giáp phủ/nền được tiến hành theo nghiên cứu của tác giả J. Stokes và L.Looney [117]. Tiến hành tách lớp crôm (xả crôm) cho các chi tiết mẫu bằng dung dịch axit clohydric 30% theo quy trình của Eigenmann [115].

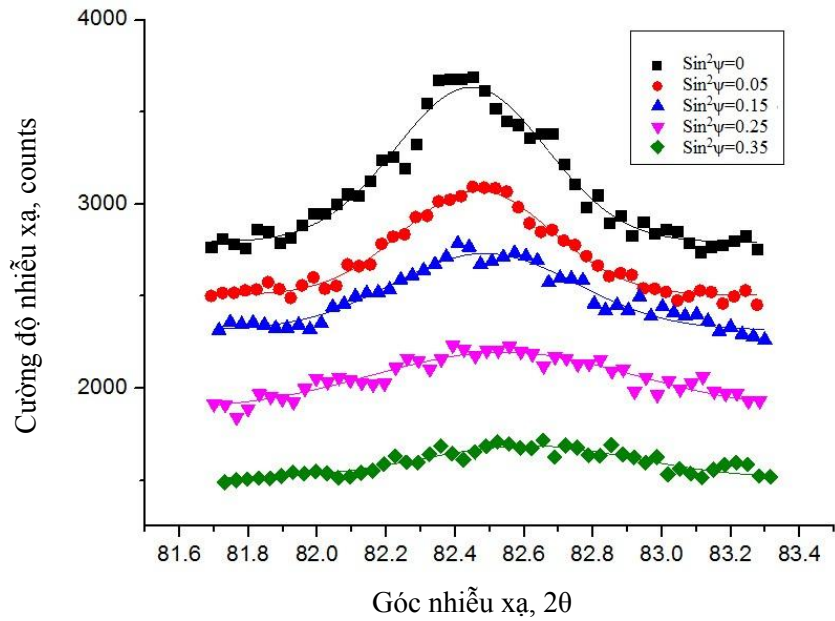
Tương tự như tính toán ứng suất dư cho bề mặt lớp mạ crôm, nền thép sau khi xả crôm được nhiễu xạ tia X và nội suy hàm Gauss để xác định vị trí đỉnh của đường nhiễu xạ đo tại các góc $\text{Sin}^2\psi = 0$; $\text{Sin}^2\psi = 0,05$; $\text{Sin}^2\psi = 0,15$; $\text{Sin}^2\psi = 0,25$; $\text{Sin}^2\psi = 0,35$ của các chi tiết mẫu ứng với các chiều dày 10 μm , 30 μm , 60 μm và 90 μm .



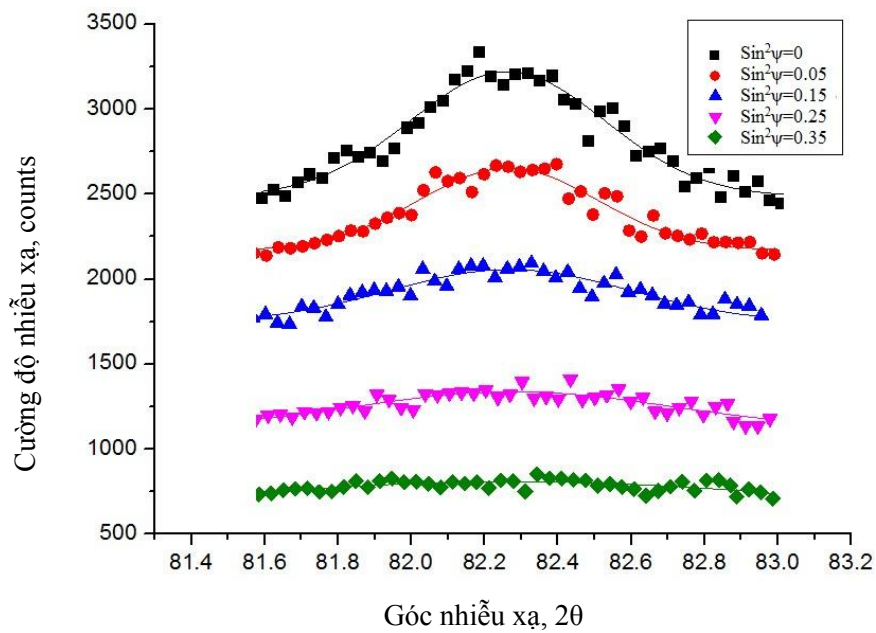
a) Chiều dày 10 μm



b) Chiều dày 30 μm



c) Chiều dày 60 μm



d) Chiều dày 90 μm

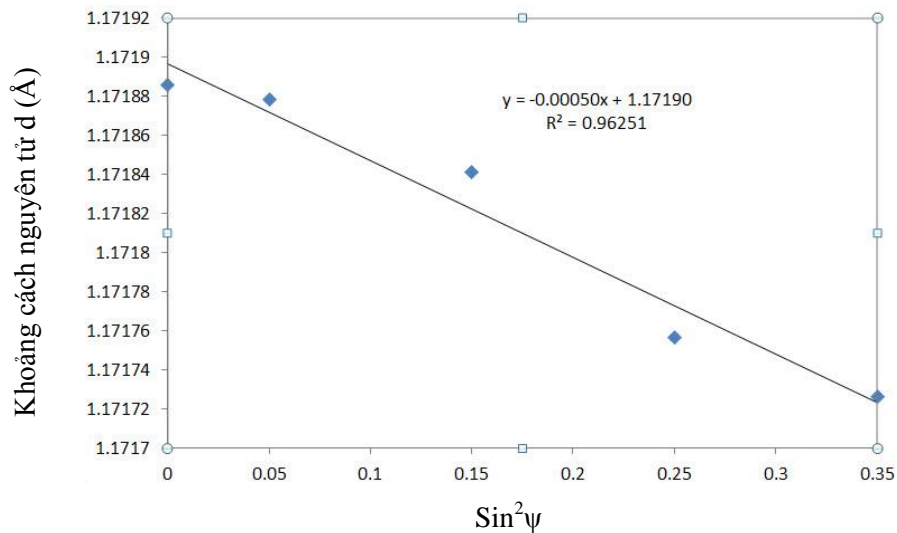
Hình 5.13. Nội suy đường cong Gauss cho nền thép sau khi xạ crôm

Từ vị trí đỉnh nhiễu xạ tương ứng với góc 2θ , khoảng cách mặt tinh thể trong các lớp nền thép được tính trong qua công thức Bragg và được trình bày trong Bảng 5.13.

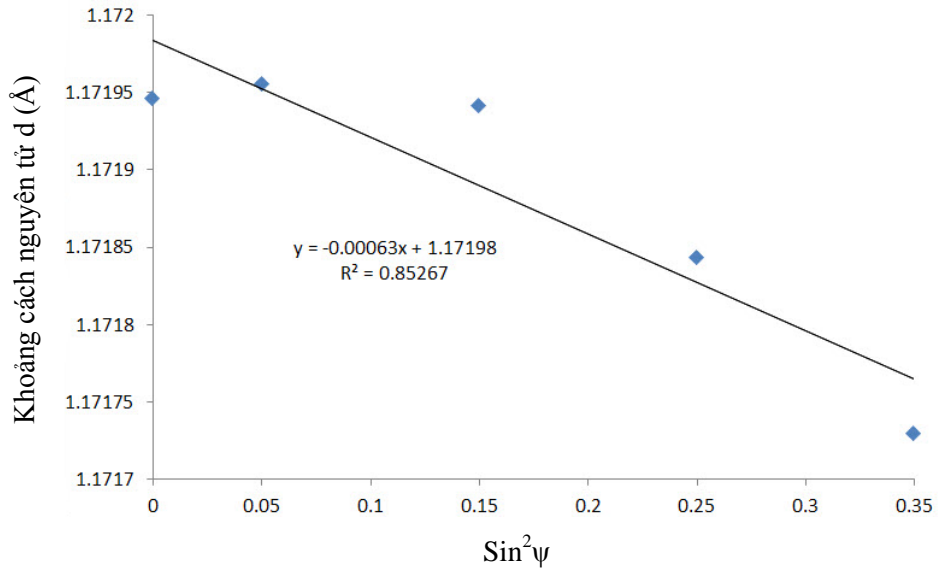
Bảng 5.13. Khoảng cách mặt tinh thể d và góc $2\theta_{\max}$

10 μm	$\text{Sin}^2\psi$	0	0,05	0,15	0,25	0,35
	$2\theta_{\max}$	82,1885	82,1891	82,1923	82,1995	82,2021
	d	1,1719	1,1718	1,1718	1,1717	1,1717
30 μm	$\text{Sin}^2\psi$	0	0,05	0,15	0,25	0,35
	$2\theta_{\max}$	82,1833	82,1825	82,1837	82,1921	82,2018
	d	1,1719	1,172	1,1719	1,1718	1,1717
60 μm	$\text{Sin}^2\psi$	0	0,05	0,15	0,25	0,35
	$2\theta_{\max}$	82,244	82,246	82,2546	82,2534	82,2605
	d	1,1712	1,1712	1,1711	1,1711	1,1710
90 μm	$\text{Sin}^2\psi$	0	0,05	0,15	0,25	0,35
	$2\theta_{\max}$	82,2623	82,2644	82,2689	82,2795	82,2755
	d	1,1710	1,1710	1,1709	1,1708	1,17086

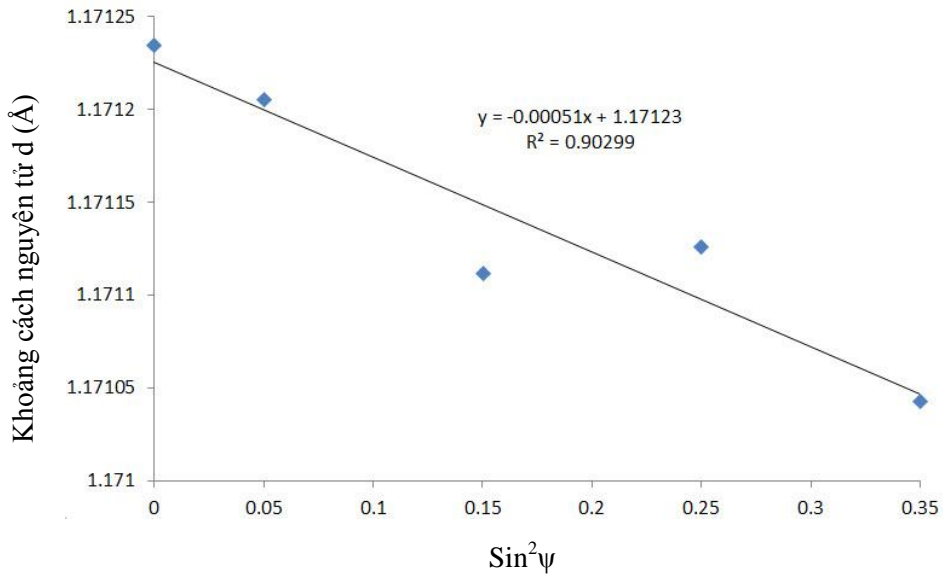
Khi có khoảng cách d và các giá trị $\text{Sin}^2\psi$, ta nội suy được phương trình đường thẳng tuyến tính biểu diễn mối quan hệ d - $\text{Sin}^2\psi$ ứng với các chiều dày khác nhau được thể hiện trên Hình 5.14.



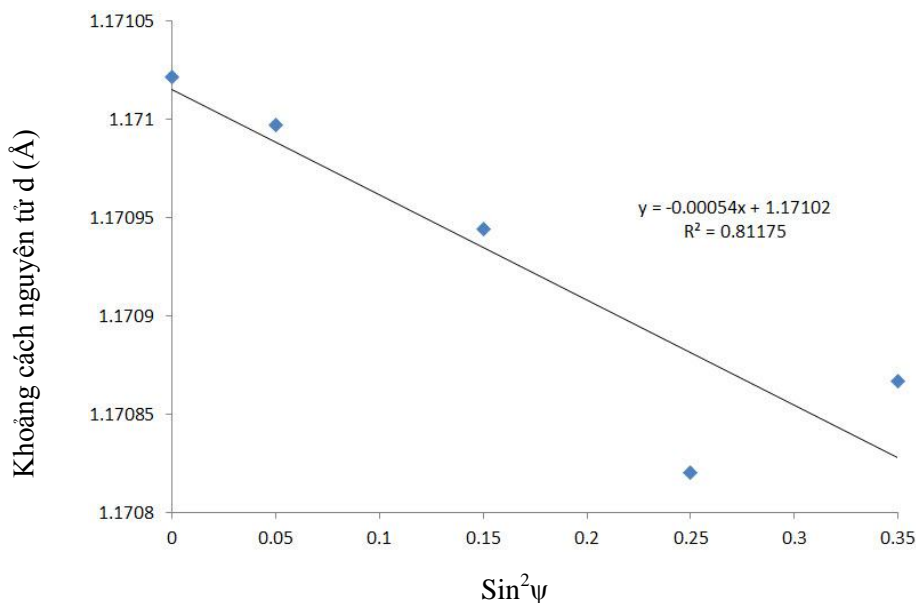
a) Chiều dày 10 μm



b) Chiều dày $30 \mu\text{m}$



c) Chiều dày $60 \mu\text{m}$



d) Chiều dày 90 μm

Hình 5.14. Đồ thị d-Sin²ψ của các mẫu nền thép

Giá trị ứng suất dư cho bề mặt lớp mạ crôm và nền thép ứng với các chiều dày 10 μm , 30 μm , 60 μm và 90 μm được thể hiện tại Bảng 5.14.

Thông thường xác định ứng suất dùng phương pháp nhiễu xạ tia X có độ chính xác cao nên sai số ứng suất ít được đề cập đến [21], [37], [38]. Tuy nhiên, việc xác định sai số sẽ giúp có được kết quả chính xác hơn. Vì vậy, kết quả sai số tính ứng suất đã được xác định dựa trên công thức 4.31 (đề xuất ở chương 4) và được trình bày ở 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 $\sigma_{\phi\text{Cr}}$, (MPa)	Ứng suất chi tiết nền thép $\sigma_{\phi\text{Fe}}$, (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

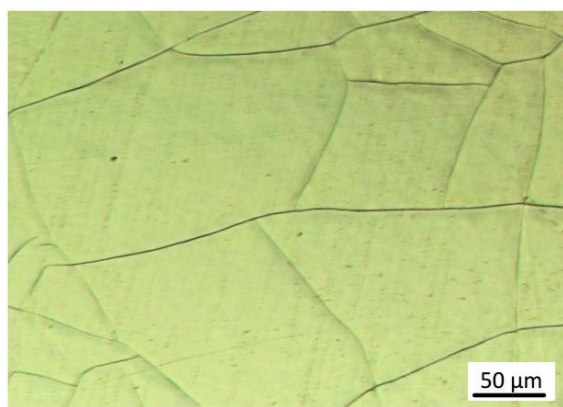
Nhận xét:

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 hydra

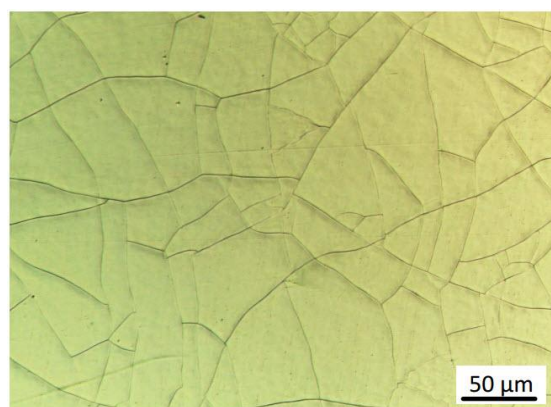
trong quá trình kết tủa crôm gây co rút thể tích làm phát sinh ứng suất kéo và các vết nứt tế vi. Kết luận này là hoàn toàn phù hợp với các nguyên cứu [17, 18].

Để đánh giá được chính xác mật độ vết nứt tế vi của lớp mạ crôm chỉ có thể thực hiện qua hai phương pháp xử lý ảnh. Phương pháp đánh giá mật độ vết nứt tế vi được xác định qua số lượng giao điểm của các đường kẻ ngang (horizontal lines) với các vết nứt dựa trên ảnh chụp từ kính hiển vi quang học được Nascimento đề xuất [15]. Tuy nhiên, nhược điểm của phương pháp này là độ chính xác của kết quả đo tùy thuộc vào số lượng của đường kẻ ngang trên diện tích ảnh khảo sát. Phương pháp thứ hai được Vidal và các cộng sự [16] đề xuất thể hiện độ chính xác cao hơn với cách đánh giá mật độ vết nứt dựa trên số điểm ảnh (pixel) của ảnh chụp vết nứt và được xử lý bằng phần mềm Matlab với công cụ Image Processing Toolbox. Trong luận án, phương pháp này đã được sử dụng với phần mềm ImageJ, được phát triển bởi Viện Y tế Quốc gia Mỹ (National Institutes of Health), để xử lý ảnh.

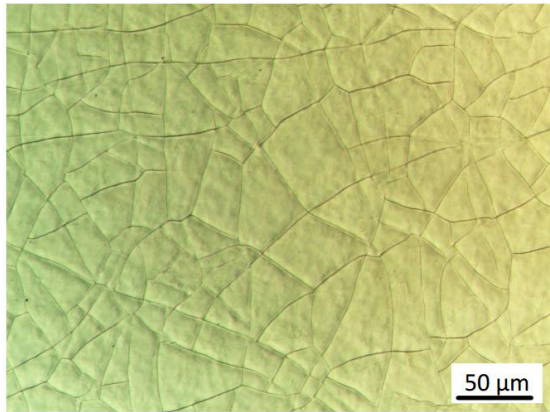
Hình 5.15 thể hiện mật độ vết nứt tế vi của lớp mạ crôm ứng với các chiều dày 10/30/60/90 μm được khảo sát dưới kính hiển vi.



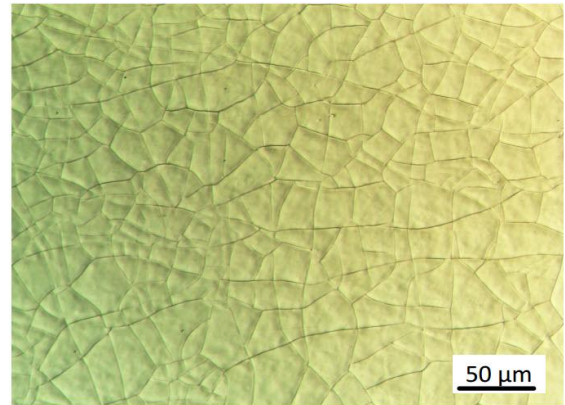
a) Chiều dày 10 μm



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

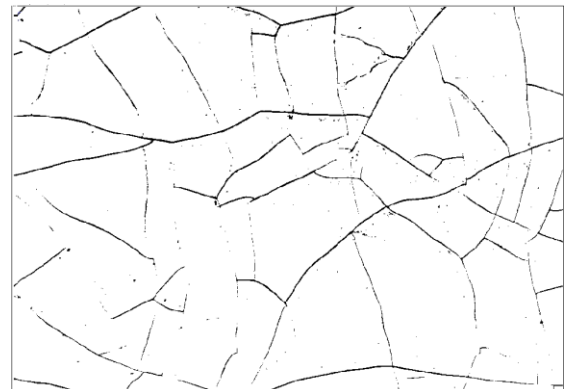
Trước khi tính toán mật độ vết nứt tế vi của lớp crôm, các ảnh chụp vết nứt với kính hiển vi quang học được chuyển thành ảnh trắng đen 8 bit với phần mềm ImageJ. Sau đó, số điểm ảnh (pixel) màu đen tương ứng với vết nứt và tổng số điểm ảnh (pixel) màu đen và trắng của diện tích khảo sát được tính qua phần mềm này.

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

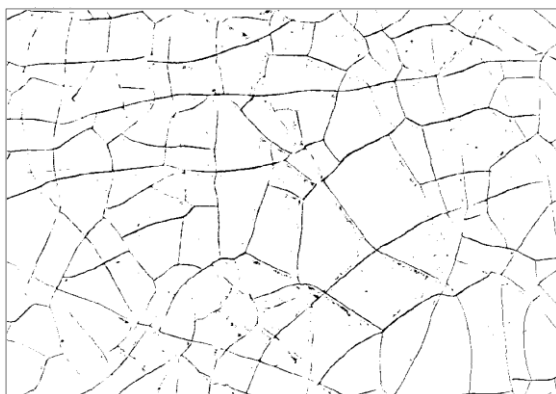
$$\text{Mật độ vết nứt}(\%) = \frac{\text{Số điểm ảnh màu đen}}{\text{Tổng số điểm ảnh}} \times 100$$



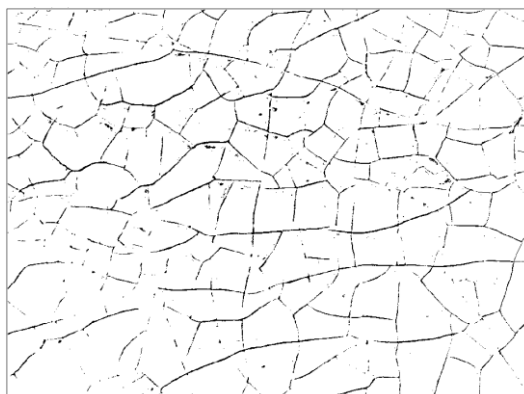
a) Chiều dày 10 μm



b) Chiều dày 30 μm



c) Chiều dày 60 μm



d) Chiều dày 90 μm

Hình 5.16. Ảnh mật độ vết nứt tế vi chuyển thành ảnh trắng đen 8 bit

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.

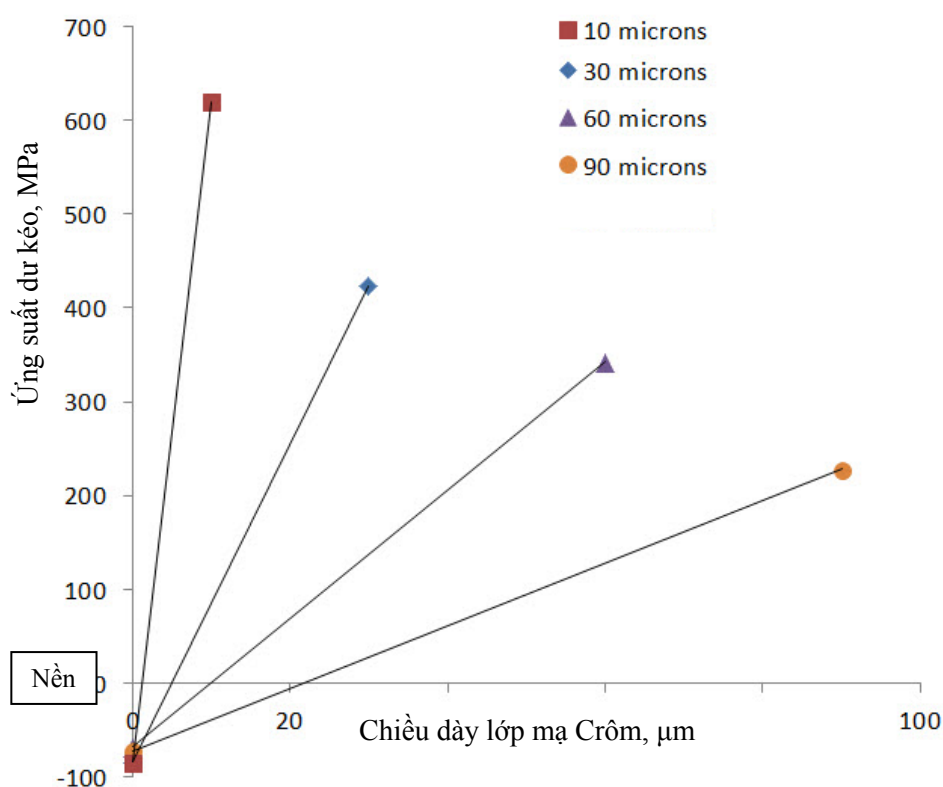
Bảng 5.15. Mật độ vết nứt tế vi các mẫu

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	2,60
3	60	26286	712460	3,69
4	90	38428	712712	5,40

Trên các Hình 5.16, 5.17 và Bảng 5.15 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 làm xả ứng suất nên ứng suất dư kéo lại giảm [64, 78]. Cụ thể, đối với chiều dày 10 μm có ứng suất kéo là 620 MPa tương ứng với mật độ vết nứt tế vi là 2,03%; ứng suất kéo giảm đến 431 MPa (mật độ vết nứt tế vi là 2,6%) đối với chiều dày 30 μm ; 319 MPa (mật độ vết nứt tế vi là 3,69%) ứng với 60 μm và là 228 MPa cho chiều dày 90 μm tương ứng với mật độ vết nứt tế vi là 5,4%. Mật độ vết nứt tế vi tăng dần từ 2,03% đến 5,4% ứng với chiều dày 10 μm đến 90 μm . Kết quả khảo sát là phù hợp với công bố [87] khi nghiên cứu về ứng

suất dư của lớp mạ crôm ứng với chiều dày 10, 50, 100 μm cho giá trị ứng suất dư kéo và giảm theo chiều dày lớp mạ. Tuy nhiên, mật độ vết nứt tế vi không được khảo sát trong nghiên cứu này. Ngoài ra, kết quả mật độ vết nứt tế vi của lớp crôm được khảo sát trong luận án 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 [16] mà tác giả chỉ nêu các thông số của quá trình mạ.

Trên Hình 5.17 thể hiện sự biến thiên ứng suất dư của lớp mạ crôm ứng với các chiều dày mạ khác nhau.



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

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

Trong công nghệ mạ phủ, tùy theo điều kiện thực tế cụ thể của từng chi tiết: phủ mới, phục hồi... mà áp dụng các chiều dày phủ khác nhau. Khi chiều dày của

lớp mạ phủ thay đổi sẽ dẫn đến sự thay đổi của các thông số trong lớp phủ như: ứng suất dư, mật độ vết nứt tế vi... Vì vậy, việc khảo sát sự thay đổi chiều dày lớp phủ ảnh hưởng đến độ bền mỏi như thế nào là điều cấp thiết.

5.2.3.1 Tiêu chí đánh giá

- Dựa vào số liệu *ứng suất - chu kỳ* để xác định độ bền tuần hoàn. Ở đây, độ bền tuần hoàn còn được hiểu là giới hạn mỏi vật lý hay là giới hạn mỏi hạn chế đặc trưng cho khả năng của vật liệu, tức là ứng suất tối đa mà vật liệu có thể chịu đựng được trong một khoảng thời gian làm việc xác định.

- Dựa vào độ bền lâu và giới hạn mỏi (*fatigue limit*) của từng chiều dày cụ thể. Độ bền lâu là số lượng chu kỳ (hay là số giờ làm việc) mà vật liệu có thể chịu được cho đến khi tạo ra vết nứt mỏi có độ lớn xác định hoặc cho đến khi xảy ra phá huỷ mỏi ở ứng suất đã cho. Hoặc độ bền lâu cũng có thể là không giới hạn (khi ứng suất chịu tải lớn nhất nhỏ hơn giới hạn mỏi ($\sigma_{\max} < \sigma_{-1}$)) và giới hạn (khi ứng suất chịu tải lớn nhất lớn hơn giới hạn mỏi ($\sigma_{\max} > \sigma_{-1}$)).

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.

Quy trình thực nghiệm được thực hiện dựa theo các tiêu chuẩn ISO. Thí nghiệm mỏi được thực hiện trên thiết bị thí nghiệm mỏi quay 4 điểm tại phòng thí nghiệm Cơ khí và Môi trường (REMELab - ĐH Sư phạm Kỹ thuật Tp. HCM).

Đường cong mỏi và phương trình mỏi được xây dựng từ mô hình toán đường cong mỏi và số liệu *ứng suất - chu kỳ* phá huỷ tương ứng. Từ đó xác định đường cong mỏi và giới hạn mỏi (*fatigue limit*) của từng chiều dày ứng với từng phương pháp mạ phủ cụ thể. Với các đường cong mỏi có cùng chu kỳ, đường cong mỏi nào có giới hạn mỏi lớn hơn sẽ có độ bền mỏi cao hơn.

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 (Bảng 5.16), đường cong mỏi theo phương trình đường cong mỏi được xây dựng nhờ sự hỗ trợ của phần mềm Matlab và mô hình toán đã trình bày ở chương 4.

Bảng 5.16. Bảng số liệu kết quả thực nghiệm

Loại mẫu	Mẫu	Mức ứng suất 1 $\sigma = 750$ (MPa)	Mức ứng suất 2 $\sigma = 600$ (MPa)	Mức ứng suất 3 $\sigma = 500$ (MPa)	Mức ứng suất 4 $\sigma = 450$ (MPa)	Mức ứng suất 5 $\sigma = 430$ (MPa)
Nền (thép C45)		Số chu kỳ ($N.10^4$)	Số chu kỳ, ($N.10^5$)	Số chu kỳ, ($N.10^6$)	Số chu kỳ, ($N.10^6$)	Số chu kỳ, ($N.10^7$)
	1	4,809	2,48754	1,398117	2,8423	Không gãy
	2	7,9165	1,32063	1,276863	3,241326	Không gãy
	3	5,7808	1,87643	1,117555	5,321223	Không gãy

Loại mẫu	Mẫu	Mức ứng suất 1 $\sigma = 600$ (MPa)	Mức ứng suất 2 $\sigma = 500$ (MPa)	Mức ứng suất 3 $\sigma = 450$ (MPa)	Mức ứng suất 4 $\sigma = 430$ (MPa)	Mức ứng suất 5 $\sigma = 420$ (MPa)
Mạ crôm (10 μm)		Số chu kỳ, ($N.10^5$)	Số chu kỳ, ($N.10^5$)	Số chu kỳ, ($N.10^6$)	Số chu kỳ, ($N.10^6$)	Số chu kỳ, ($N.10^7$)
	1	1,76426	9,13376	2,018324	6,122947	0,93
	2	1,41388	7,68921	3,210442	4,013145	Không gãy
	3	1,61690	6,74248	2,201234	3,876544	Không gãy

Loại mẫu	Mẫu	Mức ứng suất 1 $\sigma = 600$ (MPa)	Mức ứng suất 2 $\sigma = 500$ (MPa)	Mức ứng suất 3 $\sigma = 450$ (MPa)	Mức ứng suất 4 $\sigma = 420$ (MPa)	Mức ứng suất 5 $\sigma = 400$ (MPa)
Mạ		Số chu kỳ, ($N.10^4$)	Số chu kỳ, ($N.10^5$)	Số chu kỳ, ($N.10^6$)	Số chu kỳ, ($N.10^6$)	Số chu kỳ, ($N.10^7$)

crôm (30 μm)	1	8,1190	4,76792	1,358774	6,585961	Không gãy
	2	6,2130	3,17928	3,284999	6,820711	Không gãy
	3	9,6362	2,88302	4,178228	7,243189	Không gãy

Loại mẫu	Mẫu	Mức ứng suất 1 $\sigma = 600$ (MPa)	Mức ứng suất 2 $\sigma = 500$ (MPa)	Mức ứng suất 3 $\sigma = 450$ (MPa)	Mức ứng suất 4 $\sigma = 420$ (MPa)	Mức ứng suất 5 $\sigma = 390$ (MPa)
Mạ crôm (60 μm)		Số chu kỳ, (N.10 ⁴)	Số chu kỳ, (N.10 ⁵)	Số chu kỳ, (N.10 ⁶)	Số chu kỳ, (N.10 ⁶)	Số chu kỳ, (N.10 ⁷)
	1	3,7864	1,74874	1,516085	5,100977	Không gãy
	2	2,7636	8,23974	1,126191	3,851022	Không gãy
	3	4,4576	4,36987	1,328597	2,259432	Không gãy

Loại mẫu	Mẫu	Mức ứng suất 1 $\sigma = 500$ (MPa)	Mức ứng suất 2 $\sigma = 450$ (MPa)	Mức ứng suất 3 $\sigma = 420$ (MPa)	Mức ứng suất 4 $\sigma = 390$ (MPa)	Mức ứng suất 5 $\sigma = 370$ (MPa)
Mạ crôm (90 μm)		Số chu kỳ, (N.10 ⁵)	Số chu kỳ, (N.10 ⁵)	Số chu kỳ, (N.10 ⁶)	Số chu kỳ, (N.10 ⁶)	Số chu kỳ, (N.10 ⁷)
	1	1,00436	3,04064	0,418080	8,069241	Không gãy
	2	1,33051	2,54547	1,064605	6,248132	Không gãy
	3	1,55227	6,55227	0,735764	3,356792	Không gãy

Từ bảng số liệu có được từ thực nghiệm, đường cong mỏi của vật liệu nền C45 mạ lớp crôm với các chiều dày 10, 30, 60, 90 μm được xây dựng từ mô hình toán với sự hỗ trợ của phần mềm Matlab.

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

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

+ 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 : $\sigma_u = 987,64(2N_f)^{-0,061}$

Các thông số của phương trình mỗi được thể hiện trên Bảng 5.17.

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

Mẫu	Tỷ lệ (t/d)	σ'_f (MPa)	b	R^2
Nền C45		2260,5	-0,105	0,9495
Mạ Crôm\10 μm	0,0013	1678,1	-0,088	0,9587
Mạ Crôm\30 μm	0,0040	1369,5	-0,076	0,9568
Mạ Crôm\60 μm	0,0080	1306,4	-0,075	0,9694
Mạ Crôm\90 μm	0,0120	987,64	-0,061	0,9178

Khi khảo sát ảnh hưởng của lớp mạ phủ đến độ bền mỏi của chi tiết, các công trình nghiên cứu [19-22], [27], [40-43] 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. Bên cạnh đó một số công trình nghiên cứu về độ bền mỏi của lớp phủ [45,47] cũng chỉ khảo sát tại một giá trị ứng suất (giới hạn mỏi) ứng với 10^7 chu kỳ. Trong luận án, phương trình toán của đường cong mỏi ứng với mỗi chiều dày mạ phủ đã được đề xuất. 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.

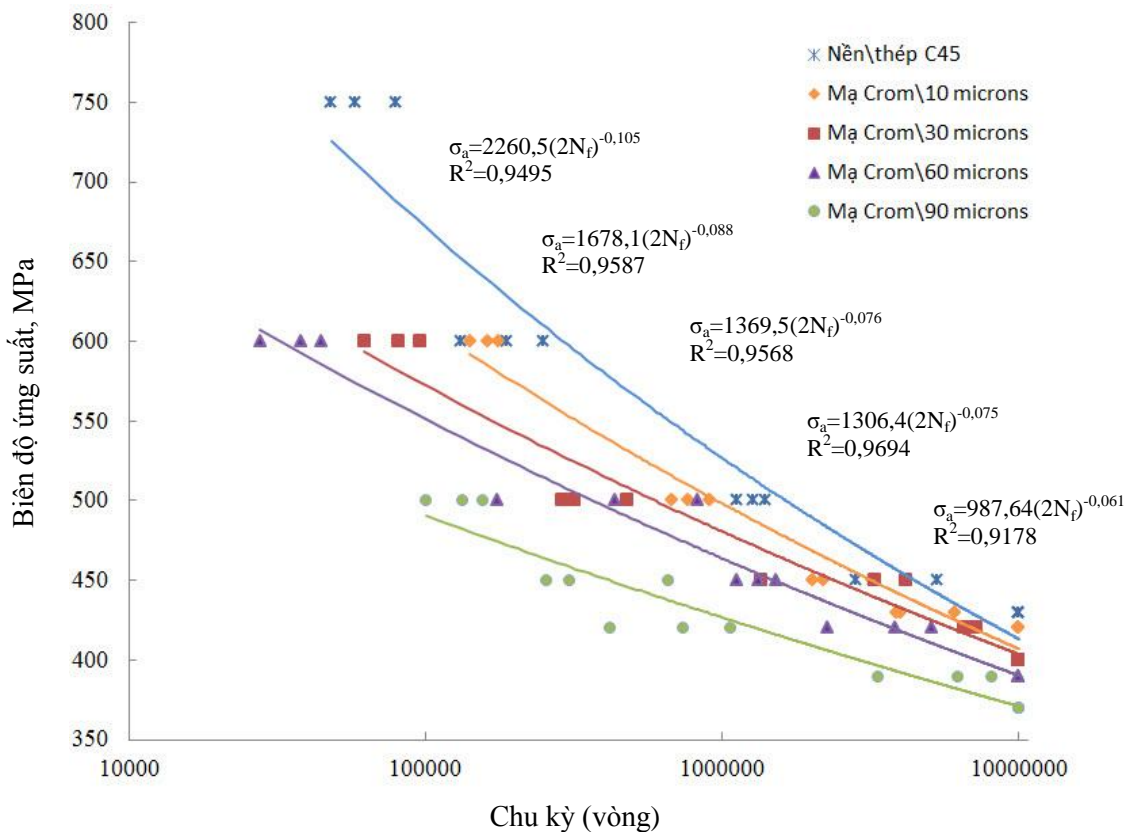
a. Sự phù hợp của hàm toán học với kết quả thực nghiệm

Phương pháp bình phương tối thiểu cho phép xác định phương trình mỗi dựa trên mô hình toán được tác giả lựa chọn để phản ánh tương đối quy luật phân bố các giá trị thực nghiệm ứng suất-chu kỳ (trình bày ở chương 4). Hàm số phản ánh chính xác là hàm số có các phân bố thực nghiệm gần sát nhất với đường cong của hàm số vừa xác định. Hệ số xác định R^2 phản ánh sự phù hợp của phương trình mỗi đã thiết lập dựa trên mô hình toán đã thành lập. Điều kiện của R^2 cần lớn hơn 0,7 [79].

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

b. Ảnh hưởng của ứng suất dư, mật độ vết nứt tế vi đến độ bền mỏi của lớp mạ crôm

Sau khi các thông số của đường cong mỏi được xác định, đồ thị đường cong mỏi vật liệu nền (thép C45) và mạ crôm với các chiều dày khác nhau được thể hiện trên Hình 5.18.



Hình 5.18. Biểu đồ đường cong mỏi thực nghiệm cho các chiều dày mạ crôm



Hình 5.19. Mẫu gãy mỏi mạ crôm (60 μm) tại ứng suất $\sigma = 450$ MPa

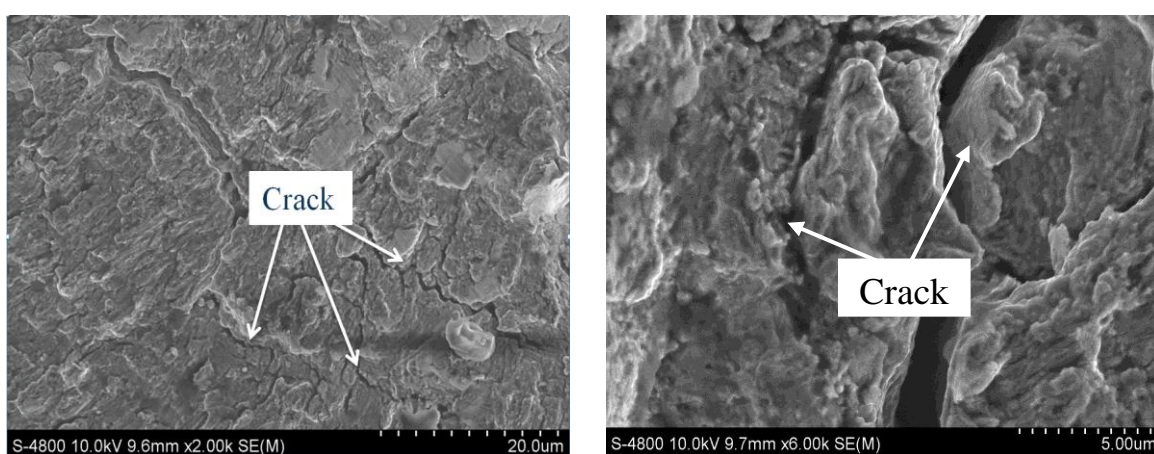
Từ đồ thị đường cong mỏi của hai loại mẫu mạ crôm và nền C45 trên Hình 5.18 cho thấy độ bền mỏi của các chi tiết khi mạ crôm giảm rất lớn so với chi tiết nền. Độ bền mỏi của chi tiết mạ crôm có xu hướng giảm khi chiều dày lớp mạ tăng.

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

Đánh giá về giới hạn mỏi (σ_{-1}) tại số chu kỳ 10^7 cho thấy, giới hạn mỏi của lớp phủ 10 μm là $\sigma_{-1} = 420 \text{ MPa}$, giảm 2,3% so với chi tiết nền, trong khi đối với chiều dày mạ 30 μm là $\sigma_{-1} = 400 \text{ MPa}$, giảm 6,97% so với chi tiết nền. Đối với chiều dày 60 và 90 μm , giới hạn mỏi lần lượt là $\sigma_{-1} = 390 \text{ MPa}$ và 370 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 μm , 30 μm , 60 μm và 90 μm thì mật độ vết nứt tăng tương ứng là 2,03%; 2,6%; 3,69% và 5,4%. Mật độ vết nứt tế 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 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 μm và 120 μm khi đánh giá ảnh hưởng của lớp crôm đến độ bền mỏi trên nền thép có độ bền cao AISI 4340 [27]. Trong khi kết quả nghiên cứu đã triển khai cho thấy độ bền mỏi giảm từ 2,03% đến 5,4% ứng với chiều dày từ 10 μm đến 90 μm 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.

Khi khảo sát ở các mức ứng suất chịu tải lớn ta có thể thấy độ bền mỏi giảm nhiều hơn so với khi so sánh tại giới hạn mỏi. Cụ thể tại ứng suất $\sigma = 500 \text{ MPa}$, chi tiết nền C45 có số chu kỳ: $1,264178 \cdot 10^6$ (chu kỳ), trong khi lớp mạ dày 10 và 30 μm

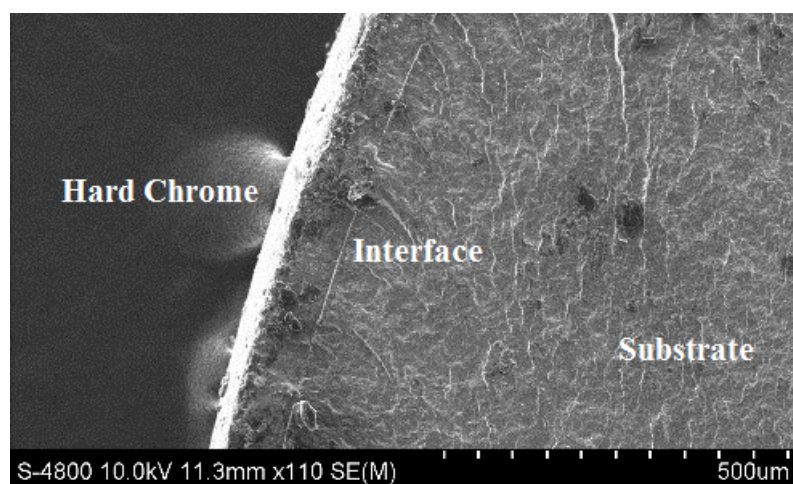
là $7,85515 \cdot 10^5$ (chu kỳ) và $3,61007 \cdot 10^5$ (chu kỳ) tương ứng với giảm 37,86% và 71,44%. Đối với chiều dày 60 và 90 μm là $4,78611 \cdot 10^5$ (chu kỳ) và $1,29571 \cdot 10^5$ (chu kỳ) tương ứng giảm 62,14 % và 89,75%. Có thể giải thích cho điều này là dưới ứng suất tải tác dụng càng lớn, sự phát triển của vết nứt càng nhanh kéo theo chi tiết càng bị phá hủy sớm. Để đánh giá quá trình phát triển vết nứt mỏi và cấu trúc lớp mạ crôm, mẫu được khảo sát bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM). Trên Hình 5.20 thể hiện vết nứt ban đầu luôn tồn tại trong mạng tinh thể lớp crôm cứng. Hình ảnh SEM cũng cho thấy độ bám dính của lớp mạ crôm và lớp nền là rất tốt (Hình 5.21)



a) Mạng vết nứt tế vi

b) Vết nứt tế vi

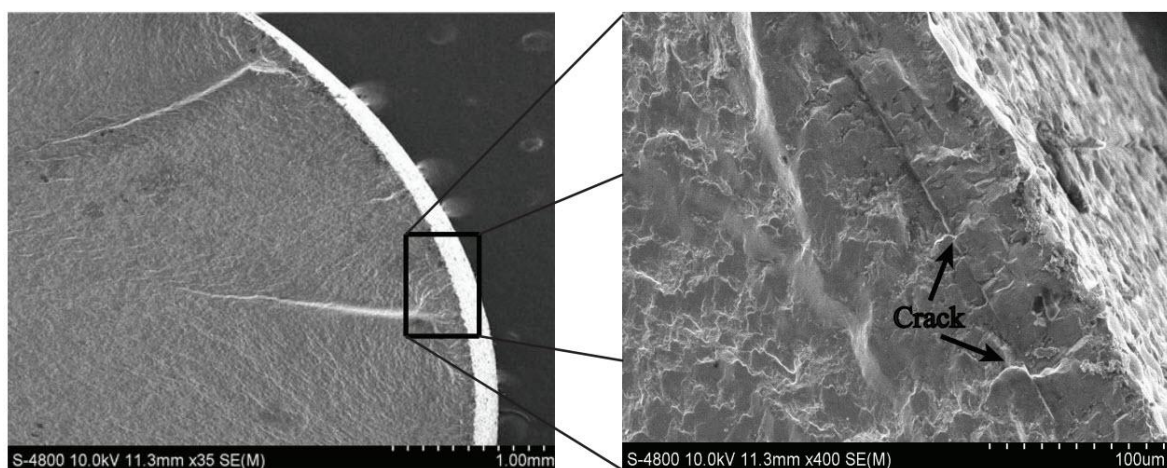
Hình 5.20. Vết nứt tế vi trong lớp mạ crôm



Hình 5.21. Ảnh chụp SEM của lớp mạ crôm

Khảo sát bề mặt gãy do mỏi trên Hình 5.22 cho thấy cho thấy các vết nứt mỏi phát triển từ các vết nứt ban đầu tồn tại trong lớp phủ crôm. Dưới tác dụng của tải

trọng có chu kỳ, các vết nứt trên bề mặt lớp phủ phát triển theo hướng đi vào tâm của chi tiết và làm phá hủy mẫu. Khi mật độ vết nứt tế vi tăng lên, điều này có nghĩa là số lượng vết nứt tế vi/diện tích lớp phủ tăng dần đến làm suy yếu liên kết trong lớp mạ và vết nứt mới 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

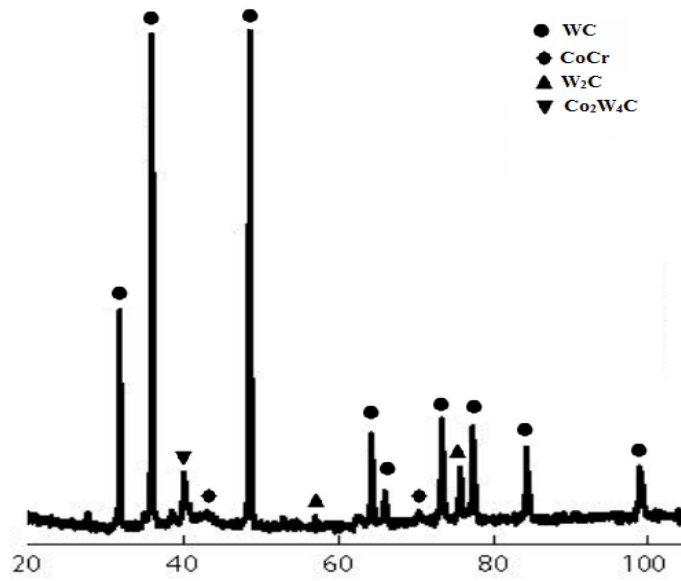
5.3 Ảnh hưởng của lớp phủ carbide vonfram đến độ bền mỏi

5.3.1 Kết quả đo thông số lớp phủ

5.3.1.1 Cấu trúc tế vi của lớp phủ

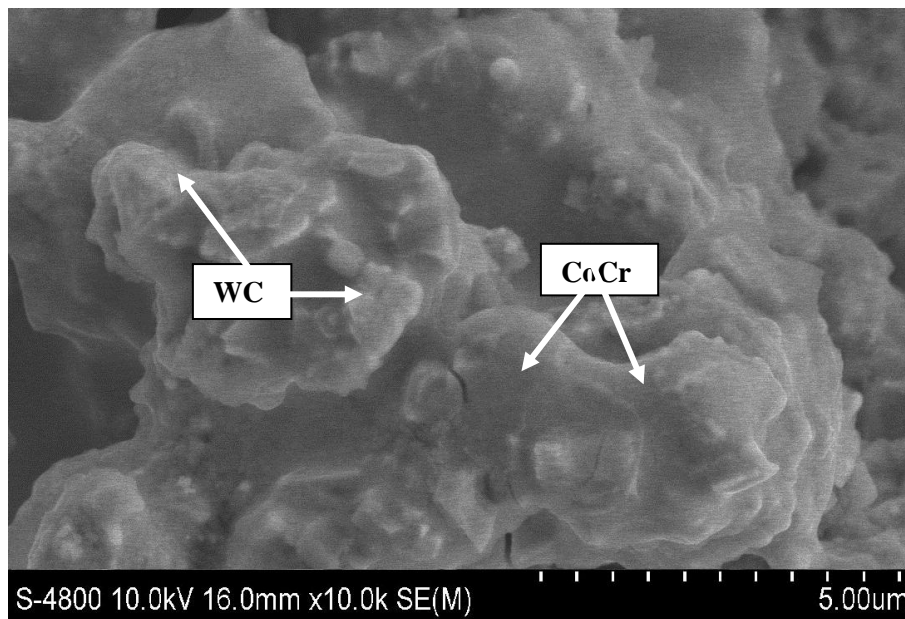
Hình 5.23 thể hiện đường nhiễu xạ của lớp phủ WC-10Co-4Cr, kết quả cho thấy pha WC chiếm phần lớn và là pha chính. Ngoài đỉnh nhiễu xạ thể hiện pha WC, các pha W_2C cũng được phát hiện trong lớp phủ. Đây là kết quả của quá trình khử cacbon ở nhiệt độ cao trong quá trình phủ. Điều này phù hợp với kết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

Hình 5.24 thể hiện cấu trúc tế vi của lớp phủ WC-10Co-4Cr được đánh giá qua hình ảnh được khảo sát bởi kính hiển vi điện tử quét (SEM). Dựa vào 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)



Góc nhiễu xạ, 2θ (độ)

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

Chiều dày lớp phủ được đo trên máy MiNiTest 600B-Elektrophysik (Đức). 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 (30 μm)	31 \pm 5
2 (60 μm)	63 \pm 7
3 (90 μm)	92 \pm 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 \pm 0,12

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

5.3.1.4 Độ cứng và độ bám dính lớp phủ carbide vonfram

Độ cứng của lớp phủ được đo thông qua phương pháp Vicker. Kết quả được thể hiện tại Bảng 5.20

a. Độ cứng lớp phủ carbide vonfram

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

Mẫu thí nghiệm	1	2	3	Trung bình
Độ cứng	1230	1056	1020	1102 \pm 128

b. Độ bám dính của lớp phủ carbide vonfram

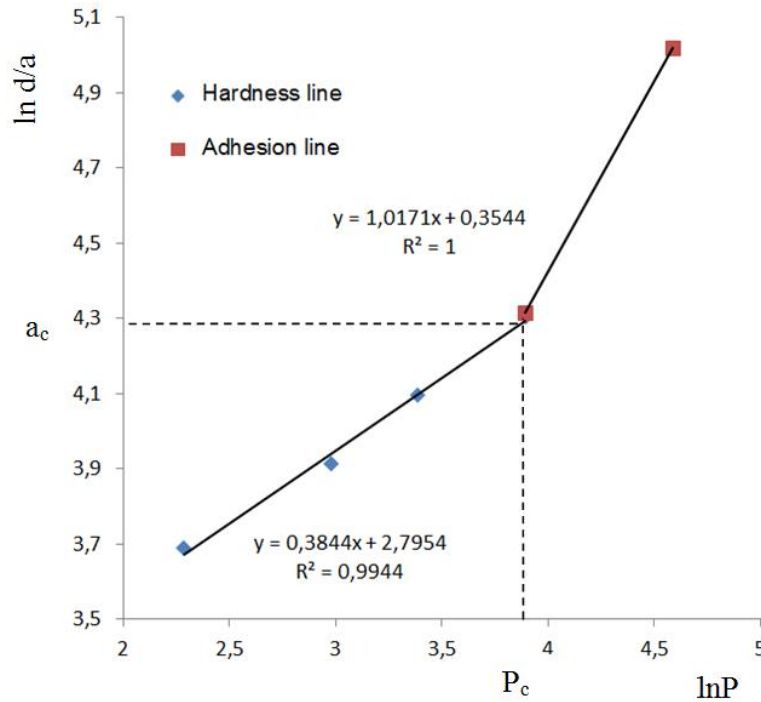
Tương tự như đo độ bám dính của lớp mạ crôm, phương pháp mũi đâm Vicker theo tiêu chuẩn ISO 19207-2016 được sử dụng. Kết quả đo được thể hiện trên Bảng 5.21.

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

Giá trị điểm tới hạn (P_c, a_c) xuất hiện vết nứt là giao điểm giữa đường thẳng $\ln P - \ln d$ và $\ln P - \ln a$ được thể hiện trên Hình 5.25.



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

Từ giá trị đo ta xác định được giao điểm của đường thẳng $\ln P - \ln d$ và $\ln P - \ln a$ là (47,3738; 72,1279).

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

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

$$\text{Với: } \left(\frac{E}{H} \right)^{1/2} = \frac{\left(\frac{E}{H} \right)_c^{1/2}}{1 + \left(\frac{H_c}{H_s} \right)^{1/2}} + \frac{\left(\frac{E}{H} \right)_s^{1/2}}{1 + \left(\frac{H_s}{H_c} \right)^{1/2}}$$

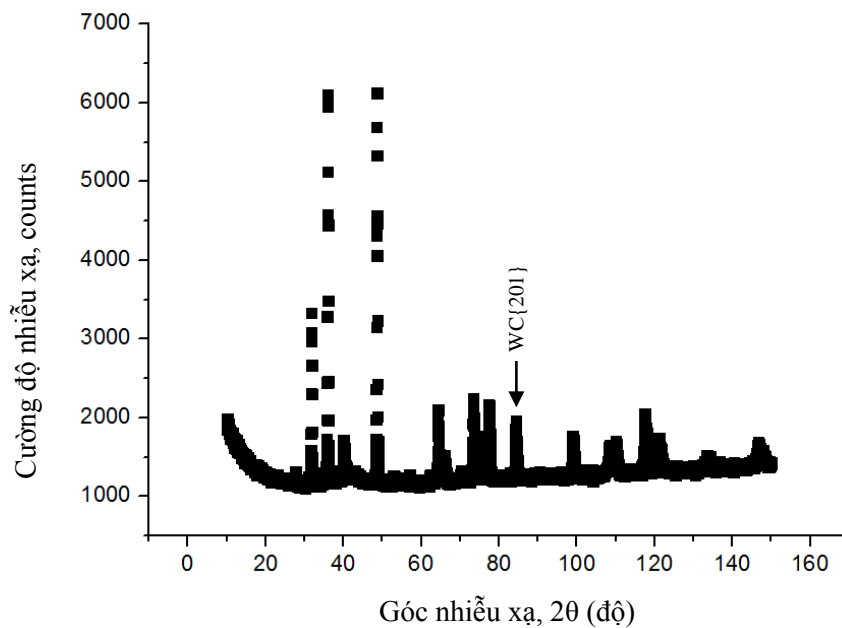
$$= \frac{\left(\frac{316}{10,81}\right)^{\frac{1}{2}}}{1 + \left(\frac{10,81}{3,047}\right)^{\frac{1}{2}}} + \frac{\left(\frac{200}{3,047}\right)^{\frac{1}{2}}}{1 + \left(\frac{3,047}{10,81}\right)^{\frac{1}{2}}} = 7,16711$$

Trong đó: $E_c = 316 \text{ GPa}$ [37], $H_C = 1102 \text{ HV} \sim 10,81 \text{ GPa}$

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

5.3.2 Tính toán ứng suất dư của lớp phủ Carbide Vonfram

Như đã trình bày ở trên, 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].

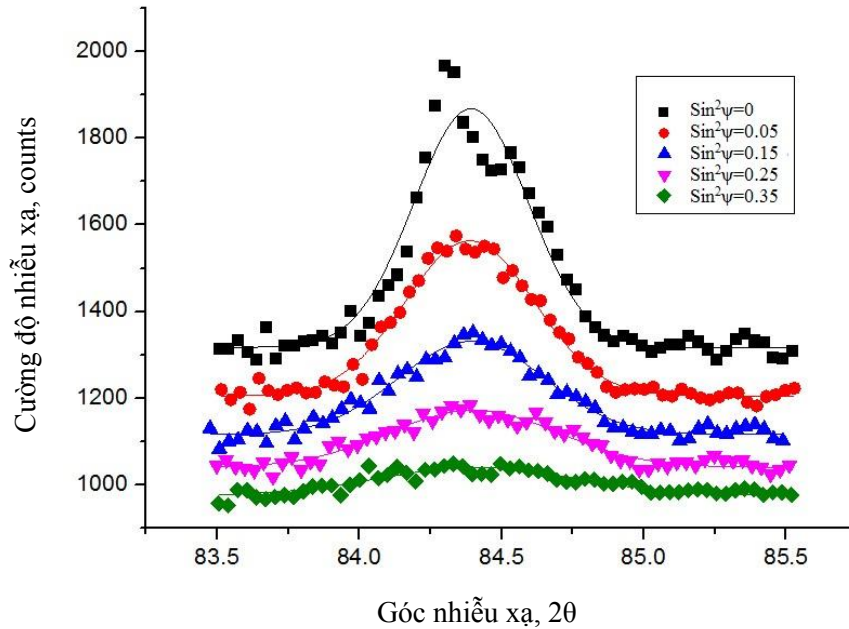


Hình 5.26. Đỉnh nhiễu xạ của pha WC tại mặt nhiễu xạ {201}

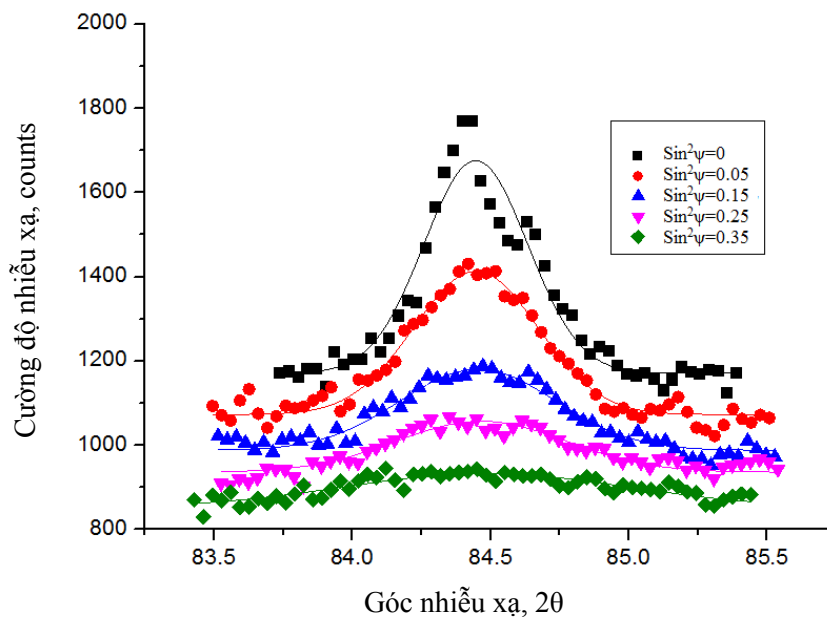
Đối với pha WC, đỉnh nhiễu xạ có góc 2θ khoảng 84° ứng với mặt nhiễu xạ {201} được chọn để tính toán ứng suất. Tương tự như tính toán ứng suất dư cho lớp mạ crôm, ta dùng phương pháp nội suy hàm Gauss dựa trên đường nhiễu xạ (sau khi hiệu chỉnh bằng hàm hấp thụ) để xác định vị trí đỉnh của đường nhiễu xạ đo tại các góc $\text{Sin}^2\psi = 0$; $\text{Sin}^2\psi = 0,05$; $\text{Sin}^2\psi = 0,15$; $\text{Sin}^2\psi = 0,25$; $\text{Sin}^2\psi = 0,35$ cho mẫu

phủ WC–10Co–4Cr ứng với các chiều dày 30, 60 và 90 μm .

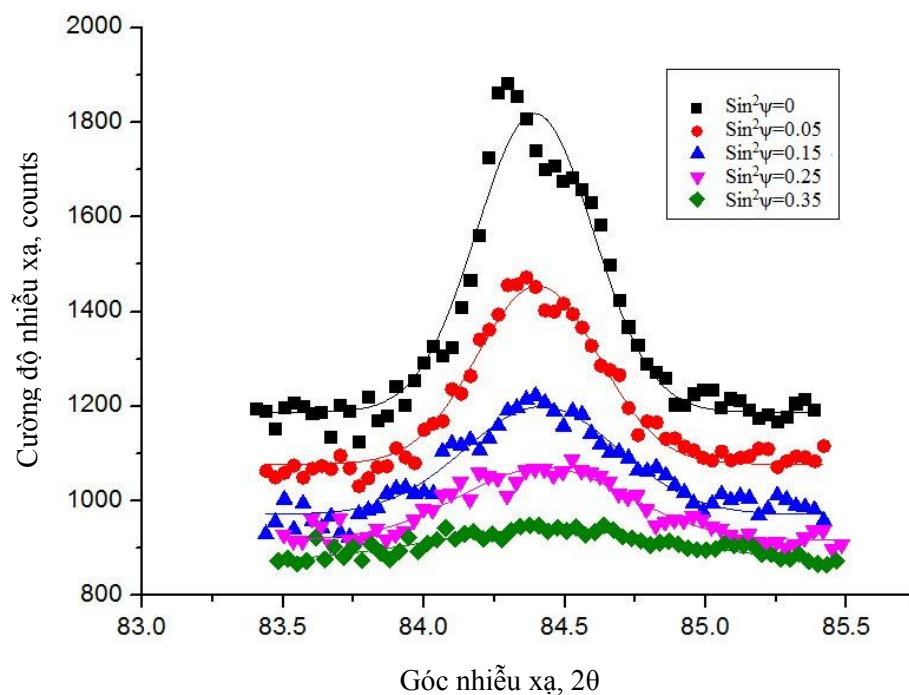
Từ dữ liệu đo được từ máy nhiễu xạ, sử dụng phần mềm OriginPro 8.5.1 để nội suy đường nhiễu xạ theo phương trình Gauss cho các chiều dày phủ.



a) Chiều dày 30 μm



b) Chiều dày 60 μm



c) Chiều dày 90 μm

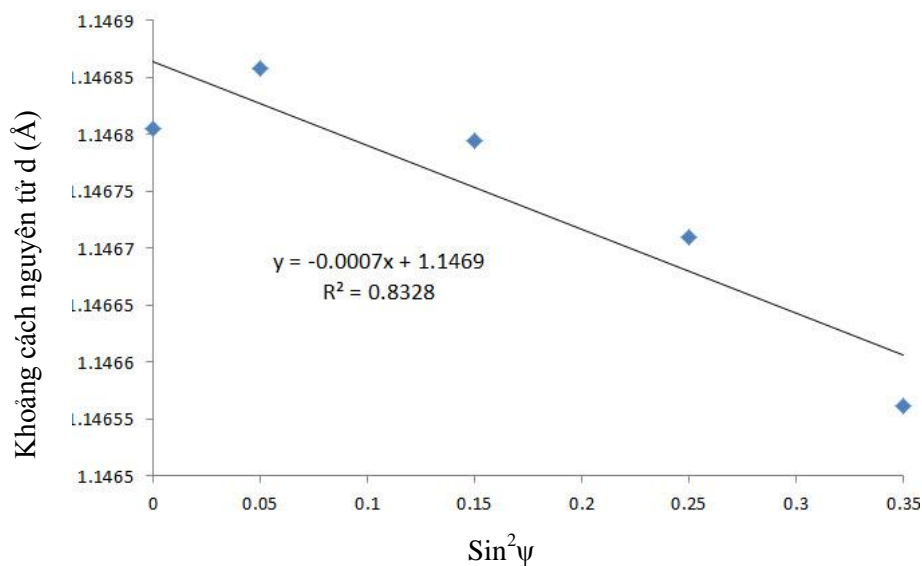
Hình 5.27. Nội suy đường cong Gauss cho lớp phủ carbide vonfram

Từ hàm Gauss ta tìm được vị trí chính xác của đỉnh nhiễu xạ 2θ ứng với các giá trị $\text{Sin}^2\psi$ khác nhau, dựa vào định luật Bragg ta tính được khoảng cách mặt tinh thể cho mẫu phủ HVOF với các chiều dày khác nhau. Kết quả thể hiện trong Bảng 5.22.

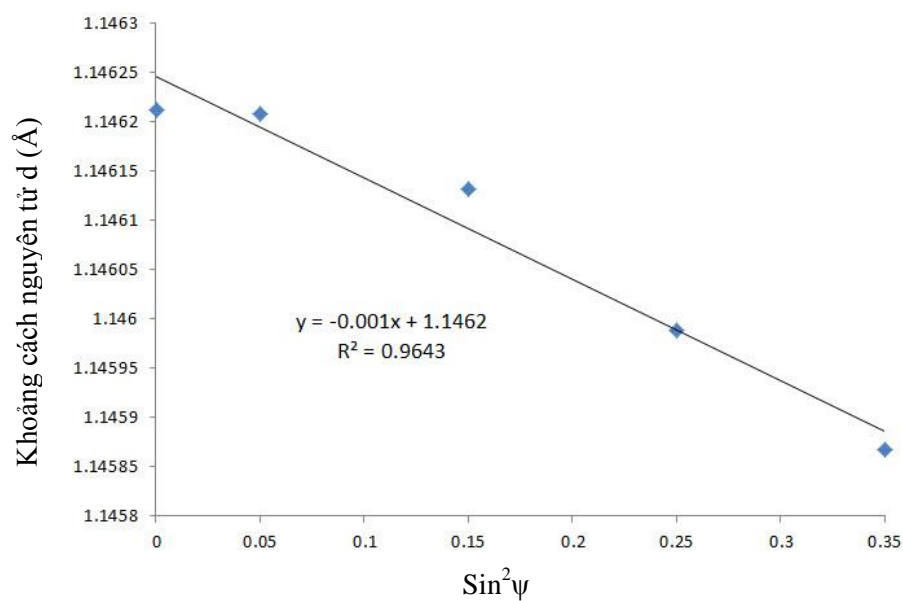
Bảng 5.22. Khoảng cách mặt tinh thể d và góc $2\theta_{\text{max}}$

30 μm	$\text{Sin}^2 \psi$	0	0,05	0,15	0,25	0,35
	$2\theta_{\text{max}}$	84,393	84,388	84,394	84,401	84,415
	d	1,1468	1,1469	1,1468	1,1467	1,1466
60 μm	$\text{Sin}^2 \psi$	0	0,05	0,15	0,25	0,35
	$2\theta_{\text{max}}$	84,446	84,447	84,454	84,461	84,478
	d	1,1462	1,1462	1,1461	1,146	1,1458
90 μm	$\text{Sin}^2 \psi$	0	0,05	0,15	0,25	0,35
	$2\theta_{\text{max}}$	84,394	84,4038	84,418	84,425	84,445
	d	1,1468	1,1466	1,1465	1,1464	1,1462

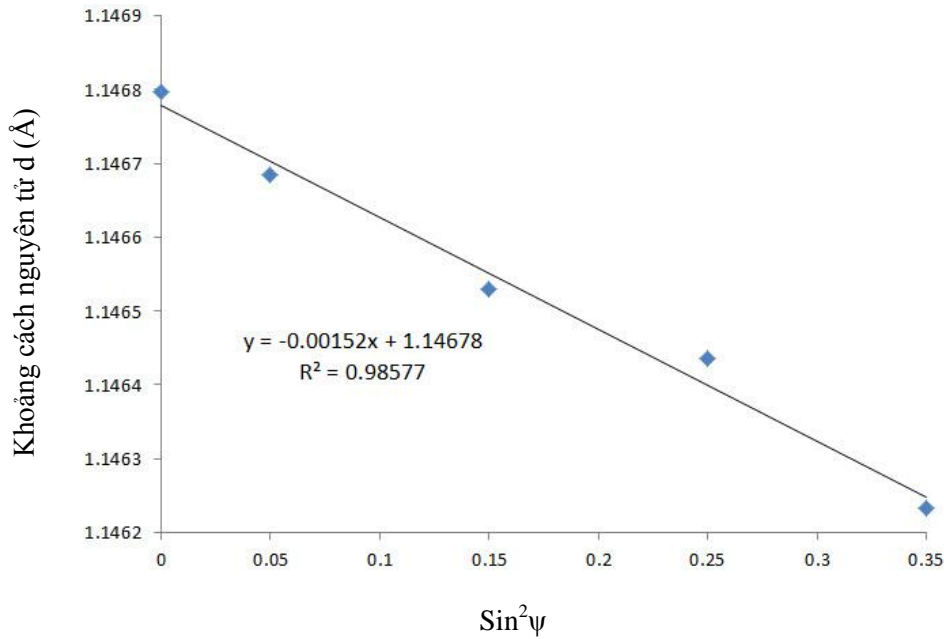
Khi có khoảng cách d và các giá trị $\text{Sin}^2\psi$ ta nội suy được phương trình đường thẳng tuyến tính biểu diễn mối quan hệ $d\text{-Sin}^2\psi$ (Hình 5.28).



a) Chiều dày $30 \mu\text{m}$



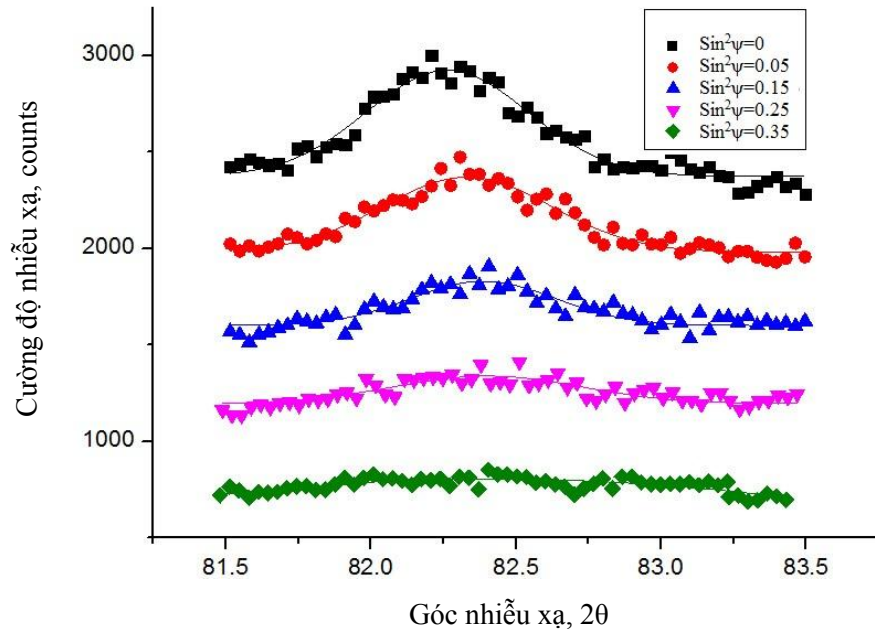
b) Chiều dày $60 \mu\text{m}$



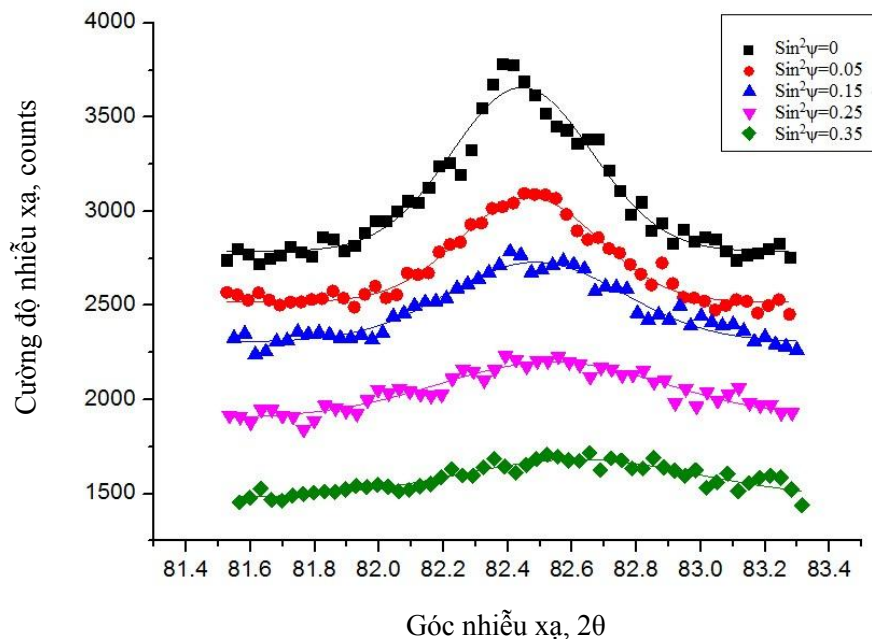
c) Chiều dày 90 μm

Hình 5.28. Đồ thị $d\text{-Sin}^2\psi$ của các mẫu phủ carbide vonfram

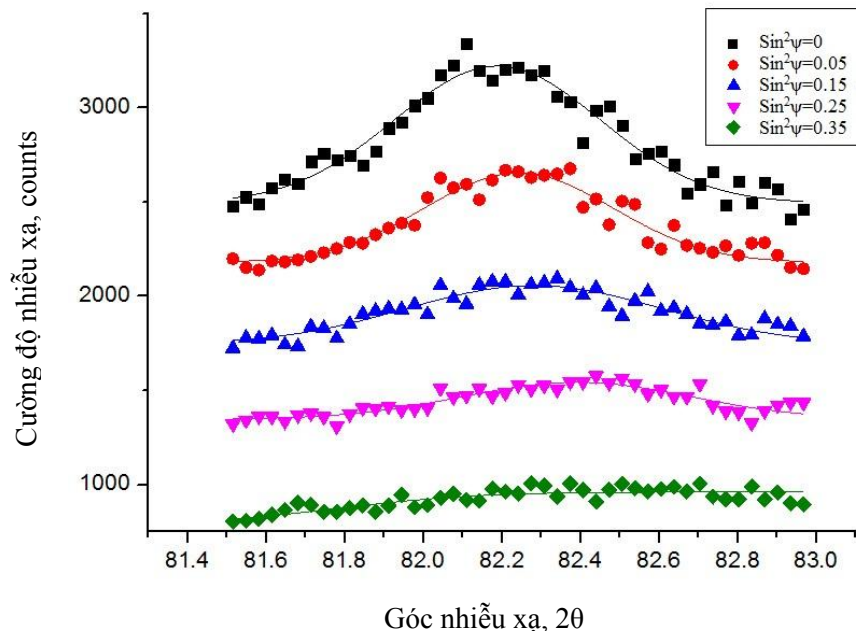
Để đánh giá được sự biến thiên của ứng suất dư trong từng chiều dày lớp phủ cũng như ứng suất lớp tiếp giáp phủ/nền thép của từng lớp phủ, mẫu phủ được tách lớp carbide bằng phương pháp mài đá kim cương và sau đó được đánh bóng bằng bột kim cương có kích cỡ hạt 5-7 μm . Quy trình này được thực hiện theo công trình nghiên cứu của tác giả M. Jalali Azizpour [118]. Sau khi tách lớp phủ carbide, bề mặt còn lại là thép C45 nên đỉnh nhiễu xạ có góc 2θ trong khoảng 82° ứng với mặt nhiễu xạ $\{211\}$. Hàm Gauss được dùng nội suy để xác định vị trí đỉnh của đường nhiễu xạ cho mẫu nền C45 ứng với các chiều dày phủ 30, 60 và 90 μm đã được tách lớp.



a) Nền thép với chiều dày phủ 30 μm



b) Nền thép với chiều dày phủ 60 μm



c) Nền thép với chiều dày phủ 90 μm

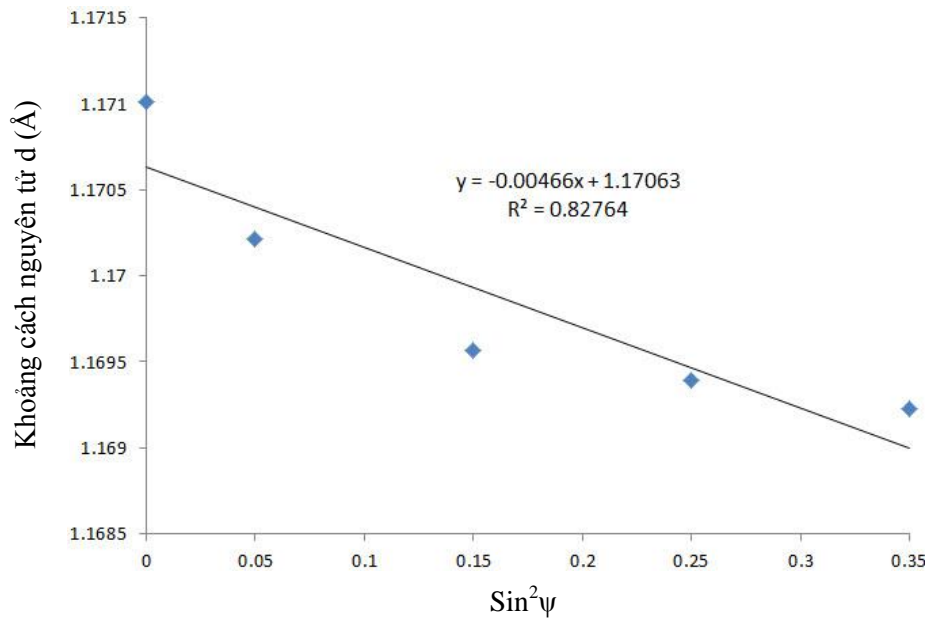
Hình 5.29. Nội suy đường cong Gauss cho nền thép sau khi tách lớp carbide

Từ hàm Gauss ta tìm được góc $2\theta_{\text{max}}$, từ đó dựa vào định luật Bragg ta tính được khoảng cách mặt tinh thể cho mẫu nền ứng với chiều dày phủ khác nhau.

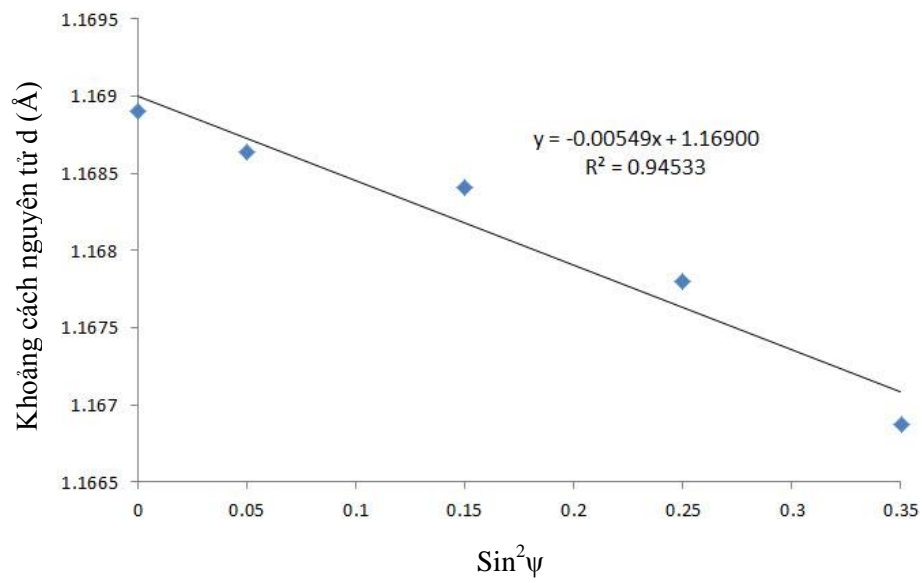
Bảng 5.23. Khoảng cách mặt tinh thể d và góc $2\theta_{\text{max}}$

30 μm	$\text{Sin}^2 \psi$	0	0,05	0,15	0,25	0,35
	$2\theta_{\text{max}}$	82,263	82,3315	82,387	82,402	82,416
	d	1,171	1,1702	1,1695	1,1694	1,1692
60 μm	$\text{Sin}^2 \psi$	0	0,05	0,15	0,25	0,35
	$2\theta_{\text{max}}$	82,444	82,466	82,4866	82,538	82,6185
	d	1,1689	1,1686	1,1684	1,1678	1,1668
90 μm	$\text{Sin}^2 \psi$	0	0,05	0,15	0,25	0,35
	$2\theta_{\text{max}}$	82,1885	82,2427	82,282	82,286	82,389
	d	1,1719	1,1712	1,1708	1,1707	1,1695

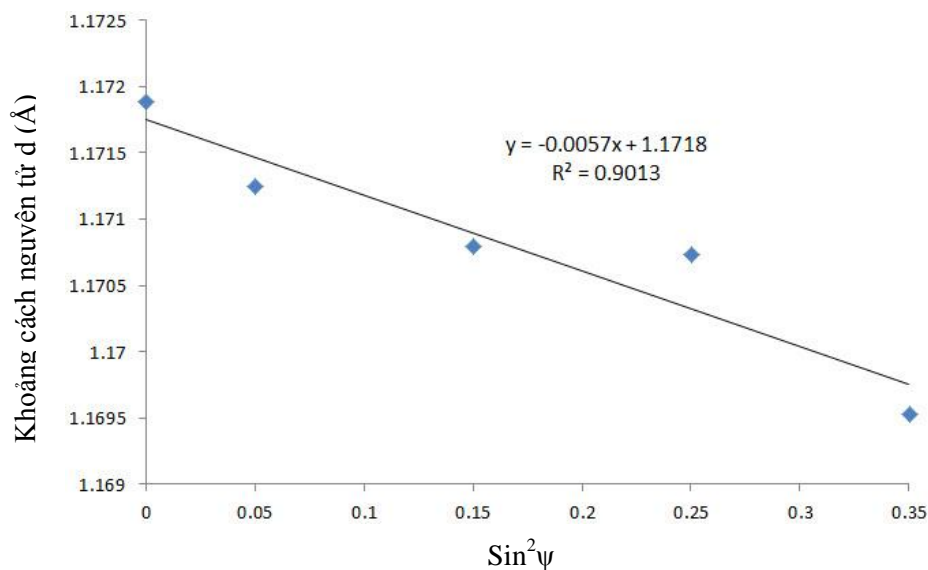
Khi có khoảng cách d và các giá trị $\text{Sin}^2 \psi$ ta nội suy được đường thẳng tuyến tính biểu diễn mối quan hệ d - $\text{Sin}^2 \psi$ của vật liệu thép C45 ứng với các chiều dày phủ khác nhau (Hình 5.30).



a) Nền thép với chiều dày phủ 30 μm



b) Nền thép với chiều dày phủ 60 μm



c) Nền thép với chiều dày phủ 90 μm

Hình 5.30. Đồ thị $d\text{-Sin}^2\psi$ của các mẫu nền thép ứng với các chiều dày phủ

Qua kết quả nhiễu xạ tia X và đồ thị $d\text{-Sin}^2\psi$, 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.

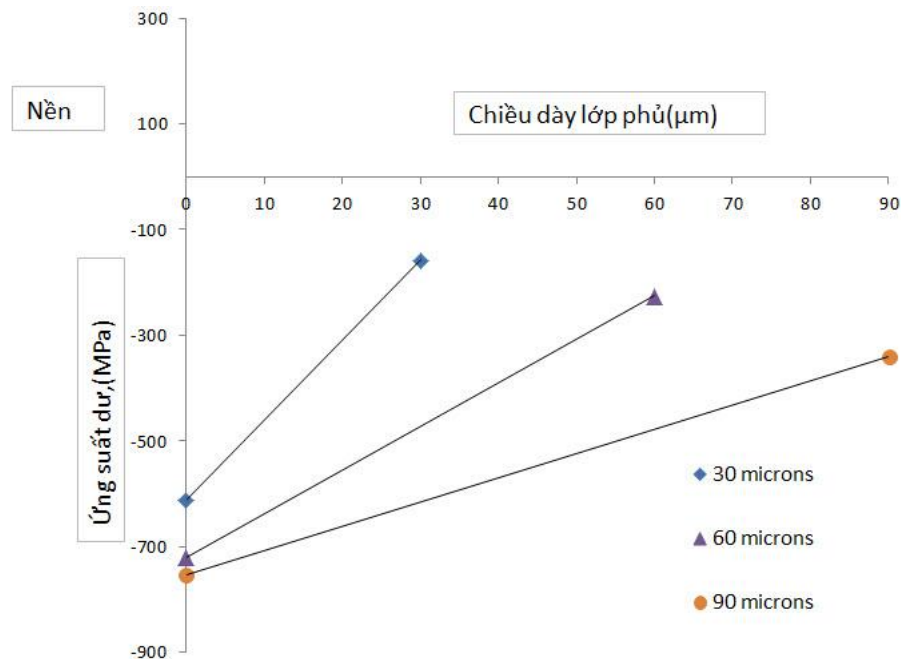
Bảng 5.24. Bảng tổng hợp đo ứng suất các mẫu phủ.

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

Nhận xét:

Trong lớp phủ carbide vonfram luôn tồn tại ứng suất dư nén. 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 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 dẫn nở

nhiệt của thép AISI 1045 là $11,52 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ trong khi hệ số dẫn nở nhiệt của lớp phủ WC–10Co–4Cr là $5,5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ [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 -341MPa 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 và 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 Al_2O_3 để tạo nhám bề mặt nhằm tăng cường độ bám dính lớp phủ. Cũng chính điều này làm cho bề mặt nền bị biến dạng dẻo 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 Al_2O_3 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

Kết quả thí nghiệm độ bền mỏi cho lớp phủ carbide vonfram (WC-10Co-4Cr) với 3 chiều dày 30, 60, 90 μm bằng phương pháp phủ HVOF được thể hiện trong Bảng 5.25.

Bảng 5.25. Bảng số liệu kết quả thực nghiệm

Loại mẫu	Mẫu	Mức ứng suất 1 $\sigma = 650$ (MPa)	Mức ứng suất 2 $\sigma = 600$ (MPa)	Mức ứng suất 3 $\sigma = 500$ (MPa)	Mức ứng suất 4 $\sigma = 475$ (MPa)	Mức ứng suất 5 $\sigma = 450$ (MPa)
WC-10Co-4Cr (30 μm)		Số chu kỳ ($N.10^4$)	Số chu kỳ ($N.10^4$)	Số chu kỳ ($N.10^5$)	Số chu kỳ ($N.10^6$)	Số chu kỳ ($N.10^7$)
	1	4,9245	8,7261	4,35431	0,644648	Không gãy
	2	3,6457	8,2436	3,35431	5,507343	Không gãy
	3	2,6707	8,4924	5,59442	6,007521	Không gãy

Loại mẫu	Mẫu	Mức ứng suất 1 $\sigma = 650$ (MPa)	Mức ứng suất 2 $\sigma = 600$ (MPa)	Mức ứng suất 3 $\sigma = 500$ (MPa)	Mức ứng suất 4 $\sigma = 475$ (MPa)	Mức ứng suất 5 $\sigma = 460$ (MPa)
WC-10Co-		Số chu kỳ ($N.10^4$)	Số chu kỳ ($N.10^5$)	Số chu kỳ ($N.10^5$)	Số chu kỳ ($N.10^6$)	Số chu kỳ ($N.10^7$)
	1	5,6547	1,90420	4,71232	1,949652	Không gãy

4Cr (60 μm)	2	6,8820	2,72406	8,57927	0,778234	Không gãy
	3	8,5517	1,17562	6,12341	3,214654	Không gãy

Loại mẫu	Mẫu	Mức ứng suất 1 $\sigma = 700$ (MPa)	Mức ứng suất 2 $\sigma = 650$ (MPa)	Mức ứng suất 3 $\sigma = 600$ (MPa)	Mức ứng suất 4 $\sigma = 500$ (MPa)	Mức ứng suất 5 $\sigma = 475$ (MPa)
WC-10Co-4Cr (90 μm)		Số chu kỳ (N.10 ⁴)	Số chu kỳ (N.10 ⁵)	Số chu kỳ (N.10 ⁵)	Số chu kỳ (N.10 ⁶)	Số chu kỳ (N.10 ⁷)
	1	8,6382	0,83352	1,80572	7,101245	Không gãy
	2	6,5937	0,97012	3,87242	2,321897	Không gãy
	3	7,1382	1,15370	2,25271	4,012456	Không gãy

Từ dữ liệu thực nghiệm, phương trình đường cong mỏi được thành lập cho vật liệu nền C45 với các chiều dày phủ carbide vonfram khác nhau dựa vào mô hình toán đường cong mỏi 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: $\sigma_u = 1517,9(2N_f)^{-0,073}$

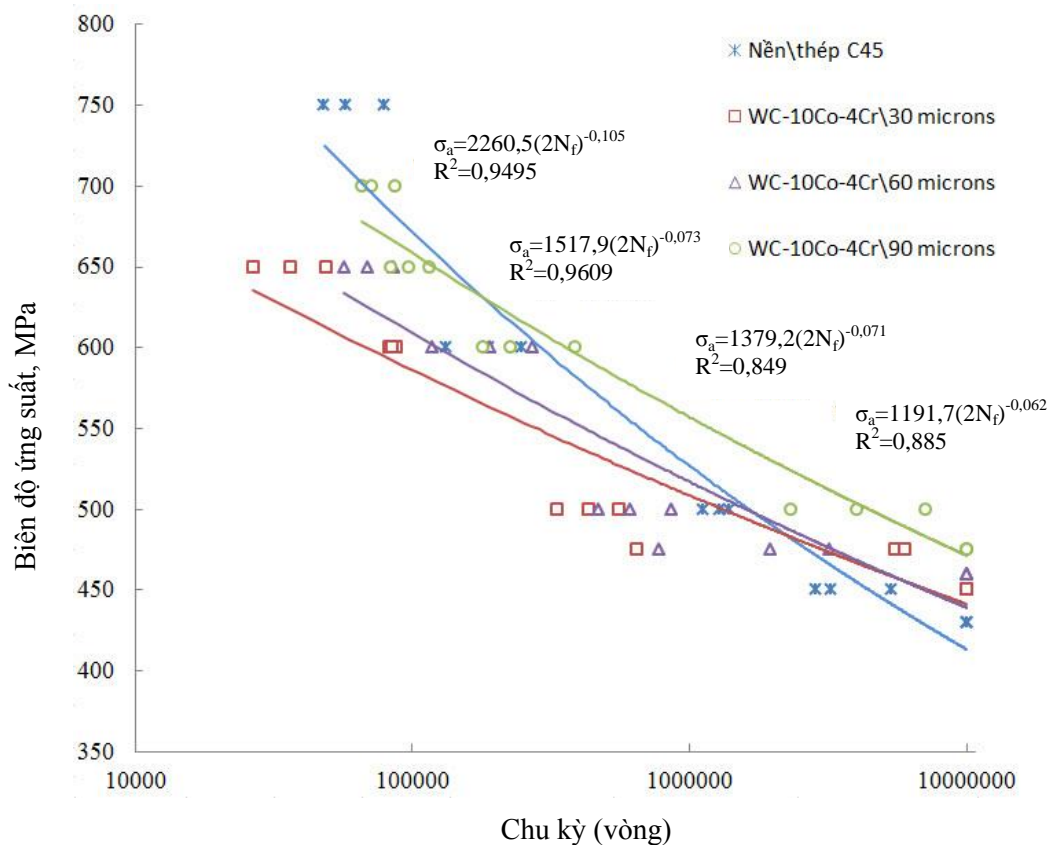
Các thông số của phương trình mỏi của lớp phủ carbide vonfram được thể hiện trên Bảng 5.26.

Bảng 5.26. Thông số phương trình mỏi lớp phủ Carbide Vonfram

Mẫu Phủ	Tỷ lệ (t/d)	σ'_f (MPa)	b	R^2
WC-10Co-4Cr\30 μm	0,004	1191,7	-0,062	0,885
WC-10Co-4Cr \60 μm	0,008	1379,2	-0,071	0,849
WC-10Co-4Cr \90 μm	0,012	1517,9	-0,073	0,9609

Để xác định sự phù hợp của mô hình toán của phương trình mỏi với các kết quả thực nghiệm, hệ số xác định R^2 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.

Đồ thị đường cong mỏi và phương trình mỏi cho chi tiết phủ carbide vonfram với các chiều dày 30, 60, 90 μm được thể hiện trên Hình 5.32.



Hình 5.32. Biểu đồ đường cong mỏi cho các chiều dày phủ carbide vonfram



Hình 5.33. Mẫu phủ HVOF (60 μm) gãy mỏi tại ứng suất $\sigma = 475$ MPa

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

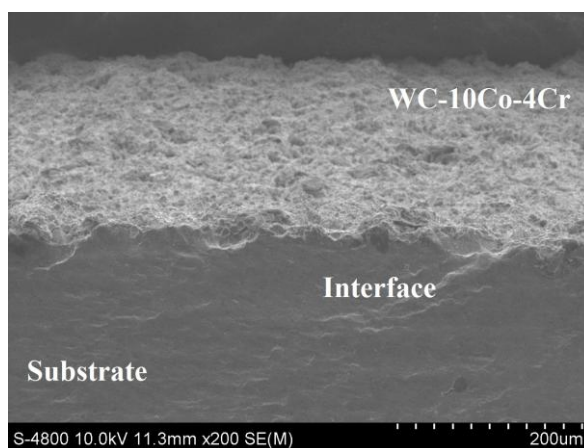
μm là 1.949.652 chu kỳ; trong khi đối với chiều dày 90 μm là không gãy (run out- 10^7 chu kỳ). So sánh về giới hạn mỏi với chi tiết nền cho thấy giới hạn mỏi khi áp dụng lớp phủ carbide vonfram là cao hơn chi tiết nền và tăng theo chiều dày lớp phủ. Giới hạn mỏi lớp phủ 30 μm là $\sigma_{-1} = 450 \text{ MPa}$ (tăng 4,65% so với nền); và đối giới hạn mỏi lớp phủ 60 μm là $\sigma_{-1} = 460 \text{ MPa}$ (tăng 6,97% so với nền); trong khi đối giới hạn mỏi lớp phủ 90 μm là $\sigma_{-1} = 475 \text{ MPa}$ (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, cụ thể là suất dư -158/-226/-341 MPa tương ứng với chiều dày phủ 30/60/90 μm . Chính ứng suất dư nén 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 môđun đàn hồi cao hơn chi tiết nền sẽ làm tăng độ bền mỏi và ngược lại [45]. Ở đây, môđun 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 -613/-721/-754 MPa tương ứng với chiều dày phủ 30/60/90 μm . Điều này góp phần làm tăng độ bền mỏi của chi tiết phủ.

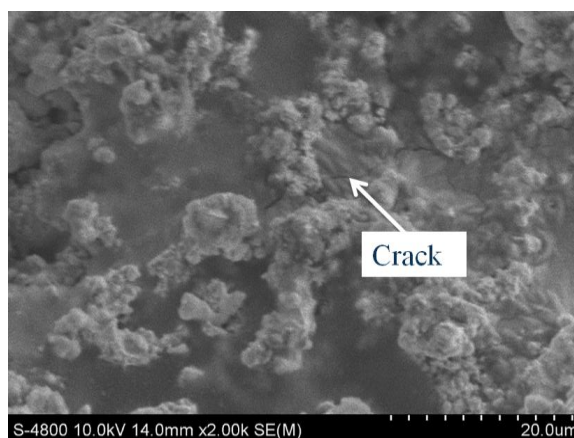
Trên đây là những nguyên nhân chính làm cho độ bền mỏi của lớp phủ cao hơn chi tiết nền và tăng theo chiều dày lớp phủ. Tuy nhiên, khi xem xét đối với

chiều dày lớp phủ thấp (30, 60 μm) cho thấy khi chịu mức ứng suất tải cao độ bền mỏi của mẫu phủ nhỏ hơn nên là do độ nhám của bề mặt trước khi phủ được phun nhám tạo bề mặt nhấp nhô để tăng độ bám dính lớp phủ. Nhưng chính điều này lại gây nguy cơ phát triển vết nứt mỏi sớm. Độ bền mỏi được cải thiện khi tăng chiều dày lớp phủ tăng lên 90 μm , kết quả cho thấy độ bền mỏi đều cao hơn chi tiết nền ở tất cả các mức ứng suất do ảnh hưởng của trọng số ứng suất nén lớn hơn ảnh hưởng của độ nhám nhô bề mặt nên.

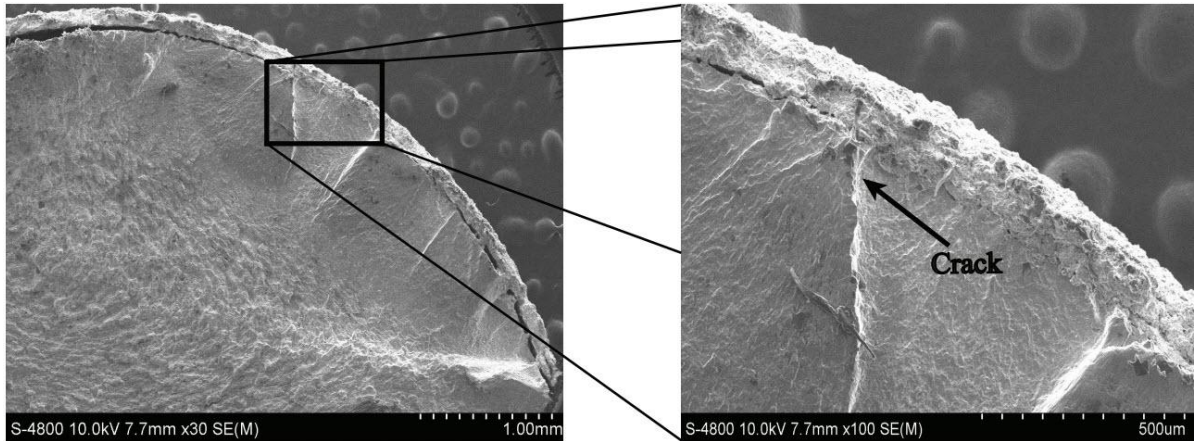
Kết quả phân tích bằng máy kính hiển vi điện tử quét trên Hình 5.34 cho thấy cả lớp phủ carbide vonfram cũng có độ bám dính rất tốt và không bị tách lớp khi tác dụng tải trọng. Đối với lớp phủ carbide vonfram cho thấy bề mặt nền có độ nhám cao khi áp dụng phương pháp phun hạt Al_2O_3 tạo nhám trước khi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



Hình 5.34. 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 sau khi chịu tải



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

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 ($\varnothing 7,5$). 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 xóp 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.

Khảo sát ứng suất dư mẫu phủ cho thấy lớp nền có ứng suất dư nén rất lớn. Vì vậy, khi vết nứt trên bề mặt lớp phủ lan truyền đến bề mặt tiếp giáp (lớp phủ/nền) sẽ 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 mỏi 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.

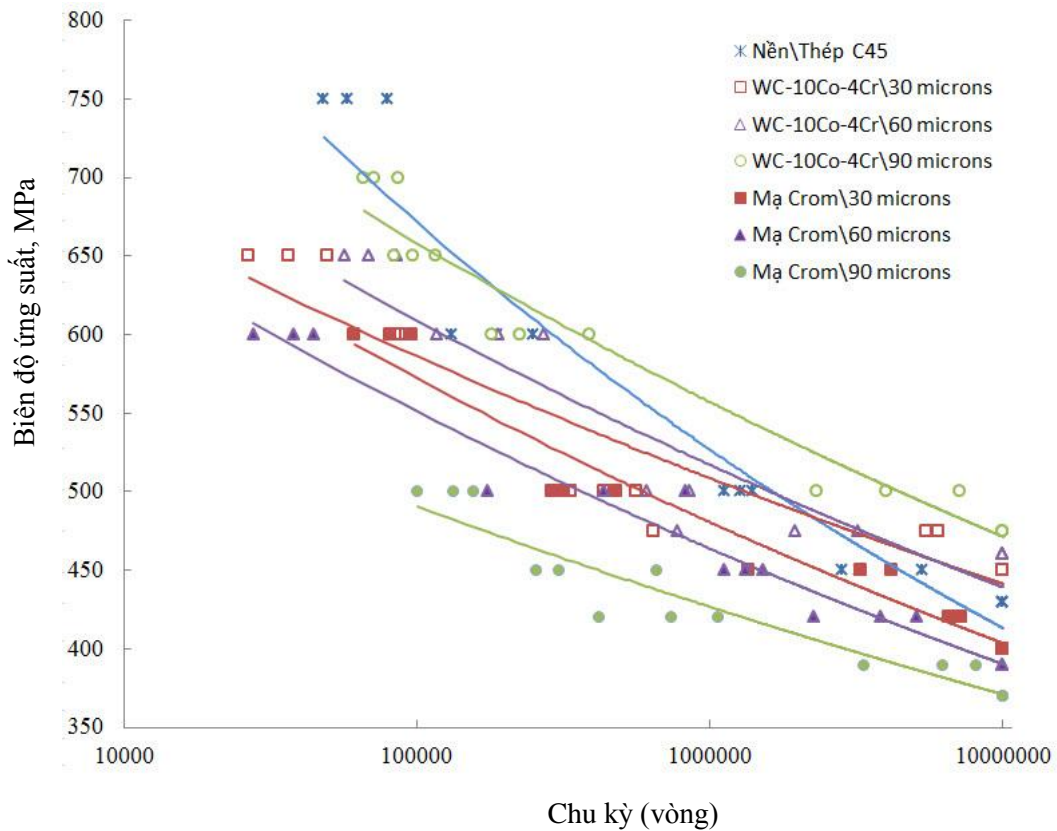
Khi tăng chiều dày lớp phủ, cho thấy ứng suất dư nén tăng. Chính điều này sẽ ngăn cản sự xuất hiện và phát triển của vết nứt ban đầu trong lớp phủ. Kết quả là độ

bền mỏi tăng khi tăng chiều dày lớp phủ.

5.4 Đánh giá ảnh hưởng của lớp mạ crôm và lớp phủ carbide vonfram đến độ bền mỏi và khả năng ứng dụng

5.4.1 So sánh ảnh hưởng của các lớp phủ đến độ bền mỏi

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



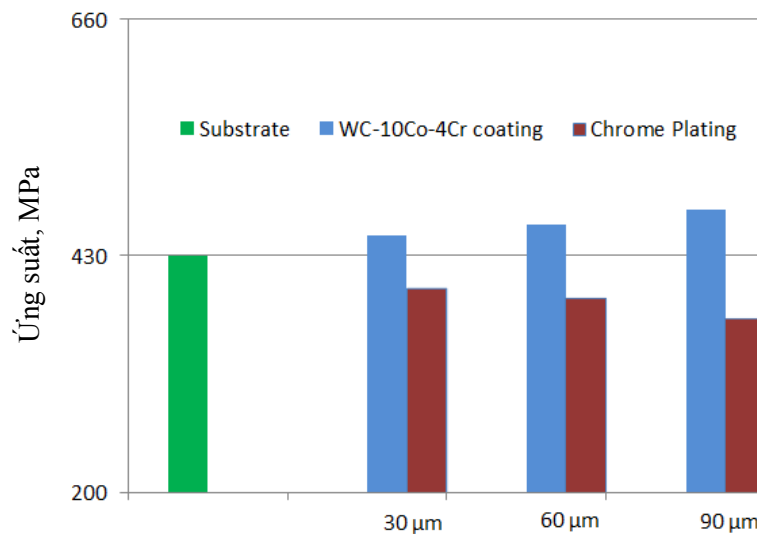
Hình 5.37. Biểu đồ đường cong mỏi cho phương pháp mạ crôm và phủ HVOF

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 cũng 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 độ bền cao AISI 4340

nhưng độ bền mỏi của lớp phủ WC-Co-Cr giảm ít hơn mạ crôm.

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).



Hình 5.38. Giới hạn mỏi của phương pháp mạ crôm và phủ carbide vonfram

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 μm -90 μm trên đường kính chi mẫu ($\text{Ø}7,5$), 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 (ứng với tỷ lệ t/d là 0,0013; 0,004; 0,008; 0,012) 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 30/60/90 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.

So sánh đánh giá giữa hai phương pháp mạ phủ được tổng hợp và thể hiện trong Bảng 5.27.

Bảng 5.27. So sánh giữa mạ crôm và phủ WC-10Co-4Cr

Mẫu phủ	Mạ crôm	Phủ WC-10Co-4Cr
Đặc điểm công nghệ	<ul style="list-style-type: none"> - Sử dụng nguyên lý mạ điện - Hệ thống mạ đơn giản - Các thông số công nghệ chính: nhiệt độ mạ, mật độ dòng điện, nồng độ hóa học dung dịch mạ. - Tẩy dầu mỡ trước khi mạ - Sử dụng nguyên liệu dung dịch axit crômíc (H_2CrO_4) 	<ul style="list-style-type: none"> - Sử dụng nguyên lý phủ nhiệt HVOF - Hệ thống phủ phức tạp - Các thông số công nghệ chính: nhiệt độ phun, tốc độ phun, khoảng cách phun và lưu lượng bột. - Tạo nhám bề mặt trước khi phủ - Sử dụng nguyên liệu bột để phủ

	- Có thể mạ với chiều dày rất mỏng	- Có thể phủ với chiều dày lớn
Ưu điểm	<ul style="list-style-type: none"> - Hệ số ma sát nhỏ - Có độ cứng cao - Chống ăn mòn và mài mòn tốt - Độ bám dính tốt - Giá thành rẻ 	<ul style="list-style-type: none"> - Có độ cứng rất cao - Chống ăn mòn và mài mòn rất tốt - Độ bám dính rất cao - Không gây ô nhiễm môi trường
Nhược điểm	<ul style="list-style-type: none"> - Lớp mạ có tính giòn cao - Ứng suất dư kéo lớn - Gây ô nhiễm môi trường 	<ul style="list-style-type: none"> - Ứng suất dư (kéo/nén) tùy thuộc vào vật liệu phủ và nền - Giá thành cao
Khuyến nghị sử dụng	- Áp dụng với những chi tiết chịu trượt yêu cầu hệ số ma sát nhỏ hoặc chịu uốn dưới mức ứng suất 420/400/390/370 MPa ứng với chiều dày mạ 10/30 /60 /90 μm	- Áp dụng với các chi tiết chịu uốn dưới mức ứng suất 450/460/475 MPa tương ứng với chiều dày phủ 30/60/90 μm

KẾT LUẬN VÀ 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 hàm hấp thụ tia X để hiệu chỉnh đường nhiễu xạ và cách tính toán sai số ứng suất dư.

- 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 nghiên cứu 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.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Ngô Văn Quyết, *Cơ sở lý thuyết mỏi*, Nhà xuất bản Giáo dục, 2000.
- [2] Murakami, Y. Takahashi, K. and Toyama, K. Mechanism of Crack Path Morphology and Branching from Small Fatigue Cracks Under Mixed Loading. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 28 (1-2), pp. 49-60, 2005.
- [3] Schütz, W. A history of fatigue. *Engineering Fracture Mech*, Vol. 54, pp.263-300, 1996.
- [4] Toth, L. and Yarema, S. Ya. Formation of the science of fatigue of metals. Part 1. *Materials Science*, Vol.42, pp.673 – 680, 2006.
- [5] A. Thrope M.L, Richter H.S. Pragmatic Analysis and Comparison of the HVOF Process. *Proc. Int. Thermal Spray Conf. Florida*, pp.137-148, 1992.
- [6] Hoàng Tùng. *Nghiên cứu công nghệ phun phủ nhiệt khí bột nhằm nâng cao tuổi thọ và phục hồi chi tiết*. Đề tài khoa học cấp Nhà nước, Mã số KH-CN 05-07-03, 1999.
- [7] Dominique Poirier, Jean-Gabriel Legoux, and Rogerio S. Lima. Engineering HVOF-Sprayed Cr₃C₂-NiCr Coatings: The Effect of Particle Morphology and Spraying Parameters on the Microstructure, Properties, and High Temperature Wear Performance. *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol 22(2), pp 280-289, 2013.
- [8] Nguyễn Văn Thông. *Công nghệ phủ bảo vệ và phục hồi*. Nhà xuất bản khoa học kỹ thuật, 2006.
- [9] Đỗ Đức Tuấn. *Nghiên cứu đánh giá độ bền và độ bền mỏi kết cấu bộ phận chạy đầu máy, toa xe sử dụng trong ngành đường sắt Việt Nam*. Đề tài NCKH cấp Bộ, 2015.
- [10] Phạm Lê Tiến. *Nghiên cứu đánh giá độ bền mỏi và tuổi thọ mỏi của khung giá chuyển hướng và trục bánh xe đầu máy D19E vận dụng trên đường sắt Việt Nam*. Luận án Tiến sĩ kỹ thuật, ĐH Giao thông vận tải, 2011.
- [11] Trần Hoài Bảo. *Nghiên cứu nứt mỏi trên các chi tiết cơ khí dạng trục và lò xo xoắn*. Luận án Thạc sĩ kỹ thuật, Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. HCM, 2008.

- [12] Bodger, et al. The Evaluation of Tungsten Carbide Thermal Spray Coatings as Replacements for Electrodeposited Chrome Plating on Aircraft Landing Gear. *Plating and Surface Finishing*, Vol 84(9), pp. 28-31, 1997.
- [13] Julieta Torres-González. Study of Chromium Multilayers Properties Obtained by Pulsed Current Density: Residual Stress and Microhardness. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, Issue 17, pp. 117-130, 2010.
- [14] Ning Zhang, Chuanhui Huang, Chunhong Zhang, Na Shi, Anticorrosion property Study on the hard Chrome plating Layer of hydraulic Cylinder Rod, *Advanced Materials Research*, Vols 791-793, pp. 394-397, 2013.
- [15] Abdullah Almotairi, Andrew Warkentin, Zoheir Farhat. Mechanical damage of hard chromium coatings on 416 stainless steel. *Engineering Failure Analysis*, Vol 66, August, pp. 130-140, 2016.
- [16] M. Vidal, M. Ostra, N. Imaz, E. García-Lecina. Analysis of SEM digital images to quantify crack network pattern area in chromium electrodeposits, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 285, pp.289–297, 2016.
- [17] Marcelino P. Nascimento, et al. Effects of tungsten carbide thermal spray coating by HP/HVOF and hard chromium electroplating on AISI 4340 high strength steel. *Surface and Coatings Technology*, Vol.138, pp. 113-124, 2001.
- [18] Jones, A. R.. Microcracks in hard chromium electrodeposits. *Plating and Surface Finishing*, April, pp. 62-66, 1989.
- [19] Voorwald, H. J. C. Influence of shot peening on chromium electroplated AISI 4340 steel fatigue strength. *The 15th European conference of fracture*, August, pp. 11–13, 2004.
- [20] Zeyad D. Kadhim, Mohammed Abdulraoof, Zahraa Naseef Jassim. Effect the coated layer of hard chromium on fatigue behavior for AISI 1039 medium carbon steel. *Journal of Engineering and Sustainable Development* 22 (02 Part-3), pp. 72-85, 2018.
- [21] A.L.M. Carvalho, et al. Influence of shot peening and hard chromium electroplating on the fatigue strength of 7050-T7451 aluminum alloy. *International Journal of Fatigue*, Vol. 29, pp. 1282–1291, 2007.

- [22] H.J.C.Voorwald et al. Improvement in the fatigue strength of chromium electroplated AISI 4340 steel by shot peening. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 32, pp. 97–104, 2009.
- [23] Y. Fouad and Mostafa. Effect of Shot Peening on High Cycling Fatigue of Al 2024-T4. *International Conference on Advanced Materials Engineering*, Vol.15, 2011, Singapore.
- [24] K. A. Soady et al. The Effect of Shot Peening on Notched Low Cycle Fatigue. *Materials Science and Engineering A*, Vol.528, Issues 29-30, pp 8579-8588, 2011.
- [25] Zeyad D. Kadhim, Mohammed Abdulraoof, Sally M. Abd. Comparison of Fatigue Characteristic for AISI 1039 Steel with Surface Treatment, *International Journal of Computational Engineering Research*, Vol. 06, pp. 27-35, 2016.
- [26] M. Korzynski, et al. Fatigue strength of chromium coated elements and possibility of its improvement with slide diamond burnishing. *Surface & Coatings Technology*, Vol.203, pp.1670–1676, 2009.
- [27] H.J.C. Voorwald, R. Padilha, M.Y.P. Costa, W.L. Pigatin, M.O.H. Cioffi. Effect of electroless nickel interlayer on the fatigue strength of chromium electroplated AISI 4340 steel. *International Journal of Fatigue*, Vol.29, pp. 695–704, 2007
- [28] J.A. Picas, A. Forn, and G. Matthaus. HVOF Coatings as an Alternative to Hard Chromium for Pistons and Valves. *Wear*, Vol. 261, pp. 477-484, 2006.
- [29] C. Reigner, A. Sturgeon, D. Lee, and D. De Wet. HVOF Sprayed WC-Co-Cr as a Generic Coating Type for Replacement of Hard Chromium Plating. *Proceedings of the International Thermal Spray Conference*, May 2002 (Dusseldorf, Germany), pp. 12-16, 2002.
- [30] D. Dudzinski, P. Au, J.G. Legoux, and S. Simard. Salt Fog Corrosion Resistance of HVOF WC-10Co-4Cr Coated and Electrolytic Hard Chromium Plated AerMet 100 and 300M Steel Alloys. *Proceedings of the International Thermal Spray Conference*, May 2002 (Dusseldorf, Germany), pp. 686-692, 2002.
- [31] D. Lee, E. Eybel, and R. Evans. Development and Implementation of HVOF WC/Co/Cr Coating as Alternative to Electrolytic Hard Chrome Plate in Landing Gear Applications Using Natural Gas as Fuel. *Thermal Spray 2003*, May 2003 (Orlando, FL), p 371-376, 2003.

- [32] Peter Trebuña, Daniel Kottfer, Miriam Pekarčíková, Andrea Petriková. Evaluating the Replacement of Galvanic Cr Coatings, *Polish Journal of Environmental Studies*, Vol. 27(3), pp. 1289-1296, 2018.
- [33] J.Pulsford, F. Venturi, Z. Pala, S. Kamnis, T. Hussain. Application of HVOF WC-Co-Cr coatings on the internal surface of small cylinders: Effect of internal diameter on the wear resistance, *Wear*, Vol.432-433, 202965, 2019.
- [34] Kaushal Kumar, Satish Kumar, Gurprit Singh, Jatinder Pal Singh and Jashanpreet Singh. Erosion Wear Investigation of HVOF Sprayed WC-10Co-4Cr Coating on Slurry Pipeline Materials, *Coatings*, Vol. 7(4), 54, 2017.
- [35] E. Altuncu and S. İric. Evaluation of Fracture Toughness of Thermal Sprayed and Hard Chrome Coated Aluminium-Zinc Alloy, *Acta Physica Polonica Series A*, Vol.132(3-II), pp. 926-929, 2017.
- [36] O.P. Oladijo, A.M. Venter, L.A. Cornish, N. Sacks. X-ray diffraction measurement of residual stress in WC-Co thermally sprayed coatings onto metal substrates. *Surface & Coatings Technology*, Vol.206, pp. 4725–4729, 2012.
- [37] Hamed Masoumi et al. Effect of Grinding on the Residual Stress and Adhesion Strength of HVOF Thermal ly Sprayed WC–10Co–4Cr Coating. *Materials and Manufacturing Processes*, Vol.29. pp. 1139–1151, 2014.
- [38] M. Jalali Azizpour, H. Mohammadi Majd. Residual Stress in Ground WC-Co Coatings. *International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*, Vol.8(3), pp.529-531, 2014.
- [39] Maedeh Sadat Zoei, Tara Farizeh, Mohammad Hosein Sadeghi and Mehdi Salehi, Residual Stress Distribution Through the Thickness of WC-10Co-4Cr Coating Deposited by HVOF: Experimental and Simulation Study, *Journal of Thermal Spray Technology*, 2020.
- [40] C. J. Villalobos-Gutiérrez et al. Fatigue and corrosion fatigue behavior of an AA6063-T6 aluminum alloy coated with a WC–10Co–4Cr alloy deposited by HVOF thermal spraying. *Surf. Coat. Technol.*, Vol.202, pp.4572-4577, 2008.
- [41] M.Y.P. Costa et al. Effect of WC–10%Co–4%Cr coating on the Ti–6Al–4V alloy fatigue strength. *Materials Science and Engineering A*, Vol. 507, pp.29–36, 2009.
- [42] H.J.C. Voorwald, R.C. Souza, W.L. Pigatin, M.O.H. Cioffi. Evaluation of WC–17Co and WC–10Co–4Cr thermal spray coatings by HVOF on the fatigue and

- corrosion strength of AISI 4340 steel. *Surface & Coatings Technology*, Vol. 190, pp.155– 164, 2005.
- [43] J.G. La Barbera-Sosa. Fatigue behavior of a structural steel coated with a WC–10Co–4Cr/Colmonoy 88 deposit by HVOF thermal spraying. *Surface & Coatings Technology*, Vol.220, pp. 248–256, 2013.
- [44] Anael Preman Krelling, Matheus Machado de Souza, Cesar Edil da Costa, Julio César Giubilei Milan. HVOF-sprayed Coating Over AISI 4140 Steel for Hard Chromium Replacement. *Materials Research*, Vol. 21(4): e20180138, 2018.
- [45] A. Ibrahim, C.C. Berndt. Fatigue and deformation of HVOF sprayed WC–Co coatings and hard chrome plating. *Materials Science and Engineering A*, Vol. 456, pp.114–119, 2007.
- [46] A. Agüero et al. HVOF-Deposited WCCoCr as Replacement for Hard Cr in Landing Gear Actuators. *Journal of Thermal Spray Technology*, Volume 20(6), pp.1292-1309, 2011.
- [47] Aw Poh Koon, Tan Boon Hee, Michael Taylor, Marcus Weston, Jimmy Yip. Hard Chrome Replacement by HVOF Sprayed Coatings. *Technical Report PT/99/002/ST*, Singapore Institute of Manufacturing Technology.
- [48] Gilson Silva Junior, Herman J.C. Voorwald, Maria Odila Hilário Cioffi. Evaluation Of HVOF Sprayed WC-13Co-4Cr and Hard Chromium Electroplated on Stainless Steel 15-5PH Fatigue Strength. *Proceedings of the 7th International Conference on Mechanics and Materials in Design*, Albufeira/Portugal 11-15 June 2017.
- [49] M.Jalali Azizpour, S.norouzi, H.mohammadi majd, H.Talebi and A.Ghamari. Application of HVOF Thermal Spraying in High Speed Gas Compressor Shafts. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, Vol.4, No.9, pp.859-861, 2010.
- [50] M. Jalali Azizpour, S. Norouzi, H. Mohammadi Majd. Mechanical Properties of WC-12Co HVOF Coatings. *Journal of American Science*, Vol.7(9), pp.609-614, 2011.
- [51] E.S. Puchi-Cabrera et al. Fatigue performance of a SAE 1045 steel coated with a Colmonoy 88 alloy deposited by HVOF thermal spraying. *Surface & Coatings Technology*, Vol. 201, pp.2038 – 2045, 2006.

- [52] W.A. González-Hermosilla et al. Effect of substrate roughness on the fatigue behavior of a SAE 1045 steel coated with a WC–10Co–4Cr cermet, deposited by HVOF thermal spray. *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, pp. 6551–6561, 2010.
- [53] Trương Đức Thiệp. *Nghiên cứu công nghệ mạ composite và ứng dụng mạ thử nghiệm các chi tiết nhằm nâng cao chất lượng bề mặt*. Luận án Tiến Sĩ, Đại học Thái Nguyên, 2013.
- [54] Đào Khánh Dur. *Nâng cao tính năng ma sát của lớp mạ xoa đồng và niken*. Luận án Tiến Sĩ, Đại học Bách khoa Hà Nội, 2007.
- [55] Nguyễn Duy Kết. *Công nghệ mạ hợp kim vàng hai nguyên tố*. Luận án Tiến Sĩ, Trung tâm Khoa học kỹ thuật-công nghệ Quân sự, 2008.
- [56] Thân Xuân Tinh. *Nghiên cứu chế tạo lớp mạ Crôm gia cường bằng ống nano cacbon*. Luận Văn Thạc Sĩ, Đại học công nghệ - Đại học Quốc Gia Hà Nội, 2007.
- [57] Trần Văn Dũng. *Nghiên cứu ứng dụng công nghệ phun phủ để nâng cao chất lượng bề mặt chi tiết máy*. Luận án Tiến sĩ, Viện Cơ Khí, 2013.
- [58] Phạm Văn Liệu. *Nghiên cứu ảnh hưởng của một số thông số công nghệ đến chất lượng phục hồi bề mặt trục có hình dạng phức tạp bị mòn bằng công nghệ phun phủ*. Luận án Tiến sĩ kỹ thuật, Trường Đại học Mỏ- Địa chất Hà Nội, 2016.
- [59] Nguyễn Chí Bảo. *Nghiên cứu ảnh hưởng của lưu lượng và tốc độ chuyển động tương đối giữa đầu phun với chi tiết đến chất lượng bề mặt phun phủ bằng công nghệ phun nhiệt khí tốc độ cao – HVOF*. Luận Án Tiến Sĩ Kỹ Thuật, Trường Đại Học Mỏ - Địa Chất, 2017.
- [60] Nguyễn Thanh Phú. *Nghiên cứu ảnh hưởng của một số thông số công nghệ phun phủ HVOF đến chất lượng lớp phủ bề mặt chi tiết làm việc trong điều kiện khắc nghiệt bị mòn*. Luận án Tiến sĩ Kỹ thuật Cơ Khí, Viện Nghiên Cứu Cơ Khí, 2019.
- [61] Nguyễn Trọng Hiệp. *Chi tiết máy, Tập 1*. Nhà xuất bản Giáo Dục, 2003
- [62] ISO 19207:2016(E) *Thermal spraying – Classification method of adhesive strength by indentation*, 2016.
- [63] ISO 1143:2010(E) *Metallic materials-Rotating bar bending fatigue testing*, 2010
- [64] Trần Minh Hoàn. *Mạ crôm-lý thuyết và ứng dụng*. Nhà xuất bản Bách khoa Hà Nội, 2007.

- [65] Đinh Văn Chiển, Đinh Bá Trụ. *Kỹ Thuật phun nhiệt tốc độ cao HVOF, HVAF, D-Gun*. NXB Khoa học & Kỹ thuật, Hà Nội, 2014.
- [66] Guilemany JM, Ferna'ndez J, Delgado J, Benedetti AV, Climent F. Effects of thickness coating on the electrochemical behaviour of thermal spray Cr₃C₂-NiCr coatings. *Surf. Coat. Technol*, Vol.153, pp. 107–113, 2002.
- [67] Kowalsky K.A., Marantz D.R. et.at.HVOF Particle, Flame Diagnostics and Coating Characteristics. *Proc. 3rd National Thermal Spray Conf.*, pp. 587-596, 1990.
- [68] Maria Oksa. Optimization and Characterization of High Velocity Oxy-fuel Sprayed Coatings: Techniques, Materials, and Applications. *Coatings*, Vol 1, pp.17-52, 2011.
- [69] Datta P.K. et.al. Fundamentals of Coatings. *Surface Eng.* Vol 3, Royal Soc. Of Chemistry, Cambridge.1985.
- [70] Parker D. W, Kutner G, L. HVOF-Spray Technology-Poised for Growth. *Journal of Advanced Materials and Processes*, Vol. 139(4), pp. 68-72, 1991.
- [71] Pawlowski L. *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*. 2nd, Wiley. 2008.
- [72] Kroupa F. Stresses in Coatings on Cylindric al Surfaces. *Report from Institute of Electric al Engineering of Academy of Science*. Czech Republic, Vol. 39, pp. 243-274, 1994.
- [73] Roemer, T. J, et al. Surface Roughness of Thermal Spray Coatings Made with Off-Normal Spray Angles. *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 7, Issue 2, pp. 219-228, 1998.
- [74] Wang BQ. Effect of post heat treatment and sealing on erosion resistance of several thermal sprayed coatings. *Proceedings of ICSE*, Southwest Jiaotong University Press, Chengdu, China, pp. 138–143, 2002.
- [75] D. Sen, Naveen M. Chavan, D.S. Rao, and G. Sundararajan. Influence of Grit Blasting on the Roughness and the Bond Strength of Detonation Sprayed Coating. *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol.19, pp. 805-815, 2010.

- [76] Le C. Cuong. *Development of Automated X – Ray Stress Analyzer and Its Applications in Stress Measurement of Textured Materials*. Doctoral Thesis, Nagaoka University of Technology, Japan, 2004.
- [77] Nghiêm Hùng. *Vật liệu học cơ sở*. NXB Khoa học và kỹ thuật, 2000.
- [78] J.K.Dennis and T.E.Such. *Nickel and chromium plating*. Third edition Woodhead Publishing Limited, pp.89-90, 1993.
- [79] Bùi Minh Trí, *Xác suất thống kê và quy hoạch thực nghiệm*, Nhà xuất bản Khoa học và kỹ thuật Hà nội, 2005.
- [80] A Wolfenden et al. Probability, confidence, and sample size in fatigue testing. *Journal of Testing and Evaluation*, Vol.18(6), 1990.
- [81] *Guidance for evaluation of Fatigue Tests*. International council on combustion engines, 2009.
- [82] Sheng-Kuei Lin, Yung-Li Lee, Ming-Wei Lu. Evaluation of the staircase and the accelerated test methods for fatigue limit distributions. *International Journal of Fatigue* , Vol.23, pp. 75–83, 2001.
- [83] Sule Yildiz Sirina, Kahraman Sirinb, Erdinc Kaluc. Effect of the ion nitriding surface hardening process on fatigue behavior of AISI 4340 steel. *Materials Characterization*, Vol. 59, pp. 351 – 358, 2008.
- [84] K. Genel. Estimation method for the fatigue limit of case hardened steels. *Surface & Coatings Technology*, Vol 194, pp. 91–95, 2005.
- [85] J. Tuominen, J. Nakki, H. Pajukoski, J. Miettinen, T. Peltola, P. Vuoristo. Wear and corrosion resistant laser coatings for hydraulic piston rods. *Journal of Laser Applications*, Vol. 27, 2015.
- [86] M.J. Ortiz-Mancilla, C.Marino-Berroteran, J.A.Berrios-Ortiz, G.Mesmacque and E. S. Puchi-Cabrera. Effect of a thin hard chromium coating on fatigue behaviour of 4140 steel. *Surface Engineering*, Vol. 20, pp.345-352, 2004.
- [87] J.Pina, A. Dias, M. Francois, J.L. Lebrun. Residual stresses and crystallographic texture in hard-chromium electroplated coatings. *Surface and Coatings Technology*, Vol.96, pp.148-162, 1997.
- [88] E. Maleki and K. Reza Kashyzadeh. Effects of the Hardened Nickel Coating on the Fatigue Behavior of CK45 Steel: Experimental, Finite Element Method, and

- Artificial Neural Network Modeling. *Iranian Journal of Materials Science & Engineering*, Vol. 14, No. 4, 2017.
- [89] M.A. Eder, P.U. Haselbach, and O.V. Mishin. Effects of Coatings on the High-Cycle Fatigue Life of Threaded Steel Samples. *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol.27, pp.3184–3198, 2018.
- [90] T. Prosek, A. Nazarov, H.B. Xue, S. Lamaka, D. Thierry. Role of steel and zinc coating thickness in cut edge corrosion of coil coated materials in atmospheric weathering conditions; Part 1: Laboratory study. *Progress in Organic Coatings*, Vol. 99, pp. 356–364, 2016.
- [91] Dongxing Du, Daoxin Liu, Xiaohua Zhang, Jingang Tang and Baoli Meng. Effects of WC-17Co Coating Combined with Shot Peening Treatment on Fatigue Behaviors of TC21 Titanium Alloy. *Materials*, Vol.9, 865, 2016.
- [92] Basquin, O.H. The exponential law of endurance tests. Proceedings of the Annual Meeting. *American Society for Testing and Materials*, Vol.10, pp. 625-630, 1910.
- [93] Y. Liu, J.J. Yu, Y. Xu, et al. High Cycle Fatigue Behavior of A Single Crystal Superalloy at Elevated Temperatures. *Materials Science and Engineering A*, Vol 454–455, pp. 357–366, 2007.
- [94] G. Chen, Y. Zhang, D.K. Xu, et.al. Low Cycle Fatigue and Creep-Fatigue Interaction Behavior of Nickel-Base Super alloy GH4169 at Elevated Temperature of 650°C. *Materials Science & Engineering A*, Vol. 655, pp.175–182, 2016.
- [95] Raif Sakin. Investigation of Bending Fatigue - Life of Aluminum Sheets Based on Rolling Direction. *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 57, pp.35-47, 2018.
- [96] Hao Jiang, Guangyao Li, Xu Zhang, Junjia Cui. Fatigue and failure Mechanism in Carbon Fiber Reinforced Plastics/Aluminum Alloy Single Lap Joint Produced by Electromagnetic Riveting Technique. *Composites Science and Technology*, Vol.152, pp. 1-10, 2017.
- [97] Sebastian Myslicki, Till Vallee, Frank Walther. Short-Time Procedure for Fatigue Assessment of Beech Wood and Adhesively Bonded Beech Wood Joints. *Materials and Structures*. Vol. 49, pp. 2161–2170, 2016.

- [98] L.B. Winck , J.L.A. Ferreira, J.A. Araujo. Surface Nitriding Influence on the Fatigue Life Behavior of ASTM A743 Steel Type CA6NM. *Surface & Coatings Technology*, Vol. 232 , pp.844–850, 2013.
- [99] Issam S.Jalham, Ahmad O.Hasan. Modeling and Studying of the Fatigue Behavior of the Composite Coated Steel. *Materials Science:An Indian Journal*. Vol.4(1), pp. 33-40, 2008.
- [100]Asim Bader and Ali Mohammed Ali. Influence of Coating with Nano Particles on Fatigue Properties of Plain Low Carbon Steel Beam. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. Vol. 9(9), pp.77–89, 2018.
- [101]E. Poursaiedi & A. Salarvand. Effect of Coating Surface Finishing on Fatigue Behavior of C450 Steel CAPVD Coated with (Ti,Cr)N. *Journal of Materials Engineering and Performance*. Vol.25, pp. 3448–3455, 2016.
- [102]D. P. Koistinen and R. E. Marburger. A Simplified Procedure for Calculating Peak Position in X-ray Residual Stress Measurements of Hardenel Steel. *Trans. ASM*, Vol.51, pp.537-555, 1959.
- [103]Viktor Hauk. Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods. Elsevier, 1997.
- [104]Lê Chí Cương, Nguyễn Vĩnh Phối. 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.
- [105]Nguyen Vinh Phoi, 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*, pp.104-109, ISBN: 978-604-73-2817-8, 2014.
- [106]Maedeh Sadat Zoei, Mohammad Hosein Sadeghi, Mehdi Salehi. Effect of grinding parameters on the wear resistance and residual stress of HVOF-deposited WC-10Co-4Cr coating. *Surface & Coatings Technology*, Vol. 307, Part A, pp. 886-89115, 2016.
- [107]Younis Fakher Aoda, Dr. Lattif Shekher Jabur. Effect of the Rolling Direction and Draft on Some of The Mechanical Properties for the Medium Carbon Steel.

- International Journal of Science and Research (IJSR)*, Vol. 3, Issue 12, pp. 2425 – 2431, 2014.
- [108] Oyetunji A. . Effects of Microstructures and Process Variables on the Mechanical Properties of Rolled Ribbed Medium Carbon Steel. *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences (JETEAS)*, Vol.3, pp.507- 512, 2012.
- [109] Akpan, Emmanuel Isaac and Haruna, Idoko Andrew. Structural Evolution and Properties of Hot Rolled Steel Alloys. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, Vol. 11, No. 4, pp. 417-426, 2012.
- [110] I. Schindler, M. Mistecky, M. Ruzicka, L. Cizek. Effect of Cold Rolling and Annealing on Mechanical Properties of HSLA Steel. *International Scientific Journal*, Vol. 36, Issue 1, 2009.
- [111] A. M. Abrão, B. Denkena, J. Köhler, B. Breidenstein, T. Mörke, P. C. M. Rodrigues. The Influence of Heat Treatment and Deep Rolling on The Mechanical Properties and Integrity of AISI 1060 Steel. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.214, Issue 12, pp. 3020-3030, 2014.
- [112] ASM International. *ASM Handbook: Heat Treatment*. Vol. 4, American Society for Metals Park, Ohio, 1991.
- [113] 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
- [114] 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.
- [115] B. Eigenmann, B. Scholtes, and E. Macherauch. X-Ray Residual Stress Determination in Thin Chromium Coatings on Steel. *Surface Engineering*, Vol. 7 No.3, pp.221-224,1991.
- [116] A. Rodríguez et al. Surface Improvement of Shafts By the Deep Ball-Burnishing Technique. *Surface & Coatings Technology*, Vol. 206, pp.2817–2824, 2012.
- [117] J. Stokes and L.Looney. Residual Stress in HVOF Thermally Sprayed Thick Deposits. *Surface and Coatings Technology* , Vol.177, pp.18-23, 2004.

- [118] M. Jalali Azizpour. Evaluation of Through Thickness Residual Stresses in Thermal Sprayed WC–Co Coatings. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol.39, pp.613-620, 2016.
- [119] M.Gui, R.Eybel, S.Radhakrishnan, F.Monerie-Moulin, R.Raininger, P. Taylor. Residual Stress in HVOF Thermally Sprayed WC-10Co-4Cr Coating in Landing Gear Application. *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 28, pp. 1295–1307, 2019.
- [120] Tatsunori Sunouchi, Hideo Cho, Kenichi Sakaue, Takeshi Ogawa, Yoshifumi Kobayashi. Evaluations of Fatigue Crack Growth Characteristics of Sintered and Thermal-Sprayed WC-Co Materials. *Journal of the Society of Materials Science, Japan*. Volume 58, Issue 12, pp. 1037-1043, 2009.

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 Vĩnh Phôi**. *Khảo Sát Hàm Hấp Thụ Trong Tính Toán Ứng Suất Vật Liệu Phi Đẳng Hướng Bằng Nhiễu 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.

PHỤ LỤC

1. Chương trình Matlab nội suy phương trình mũ theo mô hình Basquin

```
clear all;
close all;
clc;
%substrate
X = [48090 248754 1398117 2842300 10000000;
     79165 132063 1276863 3241326 10000000;
     57808 187643 1117555 5321223 10000000]
Y = [750 600 500 450 430;
     750 600 500 450 430;
     750 600 500 450 430]
semilogx(X,Y,'sb','LineWidth',2);
hold on;
x=[35000:50:10000000];
p=polyfit(log(X),log(Y),1)
m=p(1)
b=exp(p(2))
y=b*x.^(m);
plot(x,y);
set(gca,'FontSize',12);
hold on;
%HVOF Coating
%30 microns
X = [49245 87261 435431 644648 10000000;
     36457 82436 335431 5507343 10000000;
     26707 84924 559442 6000023 10000000]
Y = [650 600 500 475 450;
     650 600 500 475 450;
     650 600 500 475 450]
semilogx(X,Y,'sb','LineWidth',2);
hold on;
x=[35000:50:10000000];
p=polyfit(log(X),log(Y),1)
m=p(1)
b=exp(p(2))
y=b*x.^(m);
plot(x,y);
set(gca,'FontSize',12);
hold on;
%60 microns
X = [56547 190420 471232 1949652 10000000;
     68820 272406 857927 7778234 10000000;
     85517 117562 612341 3214654 10000000]
Y = [650 600 500 475 450;
     650 600 500 475 450;
     650 600 500 475 450]
semilogx(X,Y,'sb','LineWidth',2);
hold on;
x=[35000:50:10000000];
p=polyfit(log(X),log(Y),1)
m=p(1)
b=exp(p(2))
y=b*x.^(m);
```

```

plot(x,y);
set(gca,'FontSize',12);
hold on;
%90 microns
X = [86382 83352 180572 7101245 10000000;
     65937 97012 387242 2321897 10000000;
     71382 115370 225271 4012456 10000000]
Y = [700 650 600 500 475;
     700 650 600 500 475;
     700 650 600 500 475]
semilogx(X,Y,'sb','LineWidth',2);
hold on;
x=[35000:50:10000000];
p=polyfit(log(X),log(Y),1)
m=p(1)
b=exp(p(2))
y=b*x.^(m);
plot(x,y);
set(gca,'FontSize',12);
hold on;
%Chrome Plating
%10 microns
X = [176426 913376 2018324 6122947 9300000;
     141388 768921 3210442 4013145 10000000;
     161690 674248 2201234 3876544 10000000]
Y = [600 500 450 430 420;
     600 500 450 430 420;
     600 500 450 430 420]
semilogx(X,Y,'sb','LineWidth',2);
hold on;
x=[35000:50:10000000];
p=polyfit(log(X),log(Y),1)
m=p(1)
b=exp(p(2))
y=b*x.^(m);
plot(x,y);
set(gca,'FontSize',12);
hold on;
%30 microns
X = [81190 476792 1358774 6585961 10000000;
     61190 317928 3284999 6595861 10000000;
     96362 288302 4178228 7243189 10000000]
Y = [600 500 450 420 400;
     600 500 450 420 400;
     600 500 450 420 400]
semilogx(X,Y,'sb','LineWidth',2);
hold on;
x=[35000:50:10000000];
p=polyfit(log(X),log(Y),1)
m=p(1)
b=exp(p(2))
y=b*x.^(m);
plot(x,y);
set(gca,'FontSize',12);
hold on;

```

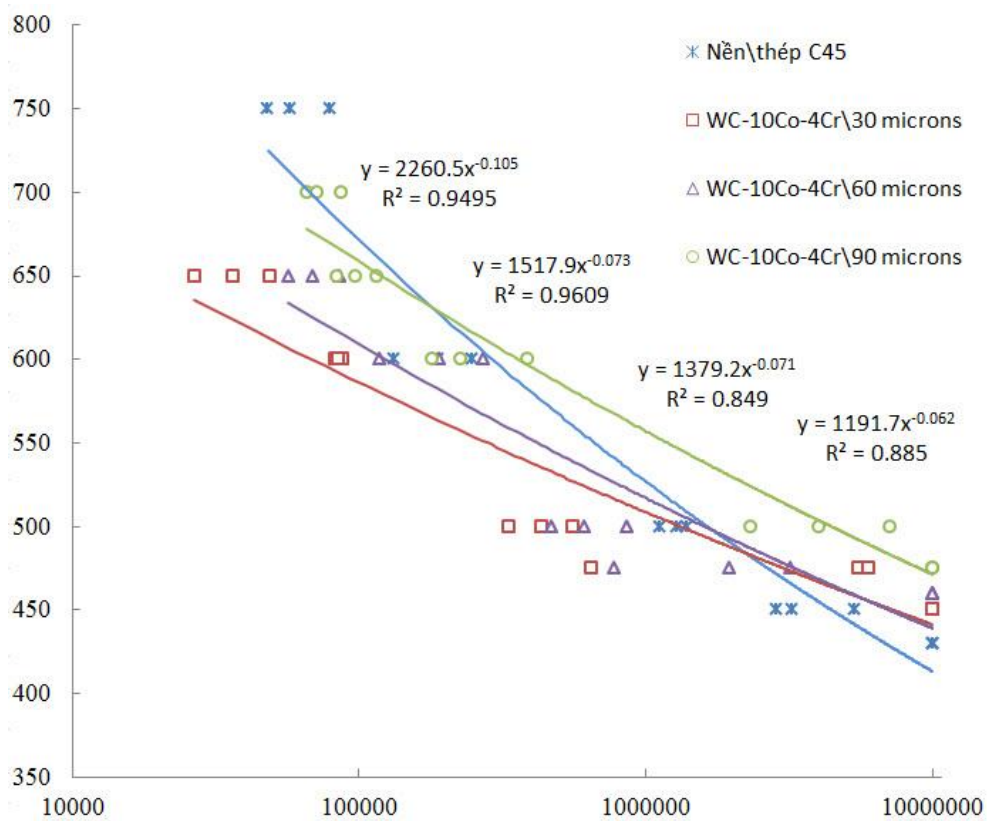
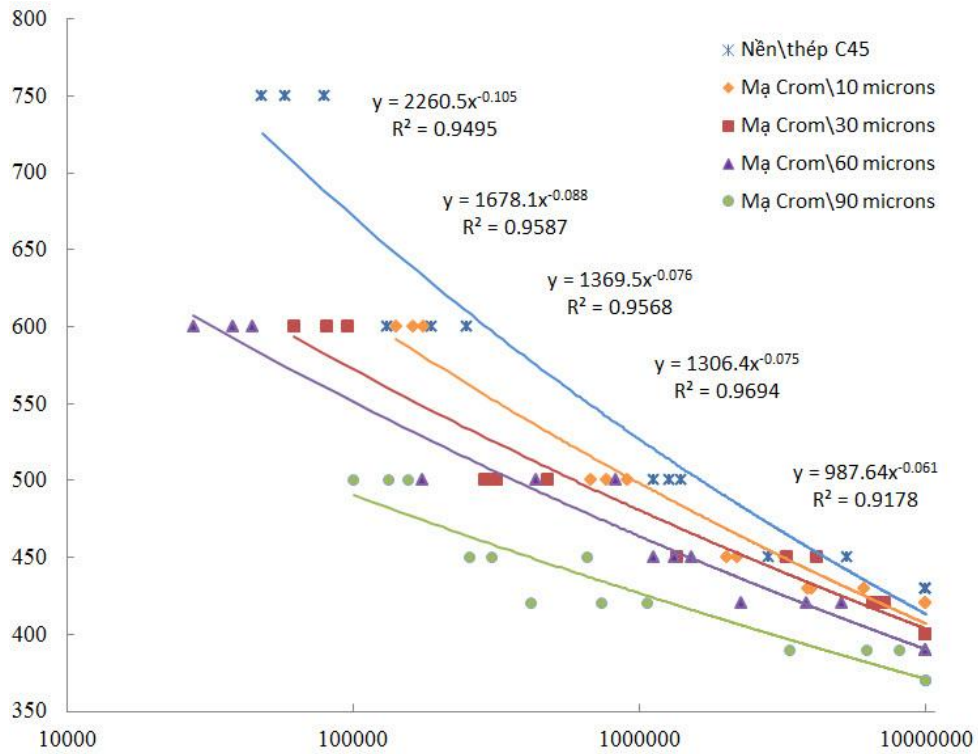


```


%60 microns
X = [37864 174874 1516085 5100977 10000000;
     27636 823974 1126191 3851022 10000000;
     44576 436987 1328597 2259432 10000000]
Y = [600 500 450 420 390;
     600 500 450 420 390;
     600 500 450 420 390]
semilogx(X,Y, 'sb', 'LineWidth',2);
hold on;
x=[35000:50:10000000];
p=polyfit(log(X),log(Y),1)
m=p(1)
b=exp(p(2))
y=b*x.^(m);
plot(x,y);
set(gca, 'FontSize',12);
hold on;
%90 microns
X = [100436 304064 418080 8069241 10000000;
     133051 254547 1064605 6248132 10000000;
     155227 655227 735764 3356792 10000000]
Y = [500 450 420 390 370;
     500 450 420 390 370;
     500 450 420 390 370]
semilogx(X,Y, 'sb', 'LineWidth',2);
hold on;
x=[35000:50:10000000];
p=polyfit(log(X),log(Y),1)
m=p(1)
b=exp(p(2))
y=b*x.^(m);
plot(x,y);
set(gca, 'FontSize',12);
hold on;

```

2. Kiểm chứng kết quả nội suy bằng phần mềm Excel dùng hàm mũ Power



3. Giấy chứng nhận hiệu chuẩn thiết bị đo chiều dày lớp phủ (Quatest 3)



TỔNG CỤC TIÊU CHUẨN ĐO LƯỜNG CHẤT LƯỢNG
TRUNG TÂM KỸ THUẬT TIÊU CHUẨN ĐO LƯỜNG CHẤT LƯỢNG 3
QUALITY ASSURANCE & TESTING CENTER 3

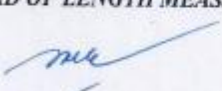
KT3-2091ADD7/6	GIẤY CHỨNG NHẬN HIỆU CHUẨN CERTIFICATE OF CALIBRATION <small>Số giấy chứng nhận đăng ký cung cấp dịch vụ/ Service License N°: DK 03</small>	22/12/2017 Page: 01/03
----------------	---	---------------------------

1. Phương tiện đo: <i>Object</i>	MÁY ĐO CHIỀU DÀY LỚP PHỦ COATING THICKNESS GAGE
2. Nơi sản xuất: <i>Manufacturer</i>	ELEKTROPHYSIK GERMANY
3. Kiểu: <i>Type</i>	MINITEST 600B SN: 158338 ID: EQQ0031
4. Đặc trưng kỹ thuật: <i>Specifications</i>	- Phạm vi đo/ <i>Range</i> : 1500 µm - Độ phân giải/ <i>Resolution</i> : 1 µm / 5 µm / 10 µm - Đầu dò/ <i>Probe</i> : N/A
5. Khách hàng: <i>Customer</i>	CÔNG TY TNHH VIVABLAST VIỆT NAM Lô B1, Đường số 2, KCN Bình Chiểu, Bình Chiểu, Thủ Đức, TP Hồ Chí Minh
6. Nơi hiệu chuẩn: <i>Place of Calibration</i>	TRUNG TÂM KỸ THUẬT 3/QUATEST 3 7 Đường 1, KCN Biên Hòa 1, Đồng Nai
7. Phương pháp hiệu chuẩn <i>Method of Calibration</i>	QTHC/KT3 033:2013 - Máy đo chiều dày lớp phủ - Quy trình hiệu chuẩn <i>Coating Thickness Gage - Calibration Procedure</i>
8. Chuẩn sử dụng: <i>Standards Used</i>	

ID	Description	Traceable to	Cal. Date	Due Date
DD1855	Reference Thickness Foil	METAS-SWISS	04/2017	04/2018


9. Môi trường hiệu chuẩn/ <i>Calibration Environment</i> :	[25 ± 2] °C	[45 ± 10] %RH
10. Hiệu chỉnh phương tiện đo/ <i>Adjustment</i> :	<input checked="" type="checkbox"/> Không/ <i>No</i>	<input type="checkbox"/> Có/ <i>Yes</i>
11. Ngày hiệu chuẩn/ <i>Date of Calibration</i> :	19/12/2017	
12. Tem hiệu chuẩn/ <i>Calibration Label</i> :	KT3-2091ADD7/6	

TRƯỞNG PBL ĐỘ DÀI
HEAD OF LENGTH MEAS. LAB.



Huỳnh Thị Thu Vân

TL. GIÁM ĐỐC/PP. DIRECTOR
TRƯỞNG PHÒNG ĐO LƯỜNG
HEAD OF MEASUREMENT LAB.



Nguyễn Anh Triết

1. Các kết quả hiệu chuẩn ghi trong giấy chứng nhận này chỉ có giá trị đối với phương tiện đo đã được hiệu chuẩn nêu trên.
The calibration results in this certificate are applicable to the above calibrated instrument only.

2. Không được tái sản xuất bất kỳ phần nào của giấy chứng nhận hiệu chuẩn này nếu không có sự đồng ý bằng văn bản của Trung tâm Kỹ thuật 3.
This certificate shall not be reproduced, except in full, without the written approval of Quatest 3.


3. Tên khách hàng được ghi theo yêu cầu của nội ghi mẫu / *Name of customer is written at customer's request.*

4. Độ không đảm bảo do mở rộng ước lượng được tính với k = 2, mức tin cậy 95%. Khách hàng có thể liên hệ theo địa chỉ dưới để biết thêm thông tin.
Estimated expanded uncertainty of measurement with k = 2, at 95% confidence level. Please contact Quatest 3 at the below address for further information.

5. Ngày hiệu chuẩn kế tiếp tùy thuộc vào khách hàng / *Recalibration date depends on the customer.*

Head Office: 49 Pasteur, Q1, Hồ Chí Minh City, VIỆT NAM Tel: (84-28) 3829 4274 Fax: (84-28) 3829 3012 Website: www.quatest3.com.vn
 Testing: 7 Road 1, Biên Hòa 1 Industrial Zone, Đồng Nai Tel: (84-251) 383 6212 Fax: (84-251) 383 6298 E-mail: tn-ckh@quatest3.com.vn

4. Giấy chứng nhận kết quả độ bền kéo của mẫu



LAS - XD 259

CÔNG TY CỔ PHẦN TƯ VẤN KIỂM ĐỊNH HƯNG THỊNH
TRUNG TÂM TƯ VẤN THÍ NGHIỆM
KIỂM ĐỊNH CHẤT LƯỢNG XÂY DỰNG

PTN: 214 Ung Văn Khiêm, P.25, Q.Bình Thạnh, TP.HCM
ĐT: 08 6 258 7662 Fax: 08 6 258 7661
Email: kdhungthinh@yahoo.com

- Theo PYC/HĐ số:...../HT Số/ Ref : *HTK-AT* / LAS - XD 259

KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM CƯỜNG ĐỘ THÉP


- Tên mẫu: Thép C45
- Nguồn gốc mẫu: Mẫu thép được khách hàng mang đến phòng thí nghiệm
- Thiết bị TN: Máy kéo-uốn thép WE-1000B, KH: 71009
- Người thử nghiệm: Tôn Thất Nhật Triều, Nguyễn Hoàng Hà
- Tiêu chuẩn áp dụng thử nghiệm : TCVN 197-1:2014
- Ngày nhận mẫu: 18 / 11/ 2017 • Ngày thí nghiệm: 18 /11 /2017

KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM KÉO THÉP

Mẫu thử					Thí nghiệm kéo					Ghi chú
Tên mẫu	Ký hiệu	Chiều dài	Đ.kính thực đo	T.diện thực đo	Lực chảy	Ứng suất chảy	Lực bền	Ứng suất bền	Độ giãn dài tương đối	
		(mm)	(mm)	(mm ²)	(kN)	(Mpa)	(kN)	(Mpa)	(%)	
Thép C45	1	-	9.60	72.38	77.20	1066.56	81.35	1123.89	14.925	
	2	-	9.60	72.38	78.90	1090.04	82.18	1135.36	14.776	
	3	-	9.60	72.38	79.00	1091.42	84.57	1168.38	13.433	
	4	-	9.60	72.38	82.90	1145.31	86.61	1196.56	14.925	


Tp.HCM, ngày 18 tháng 11 năm 2017

ĐD Thí Nghiệm




Nguyễn Hoàng Hà

Trưởng Phòng TN




Bùi Châu Nghị

Tổng Giám Đốc



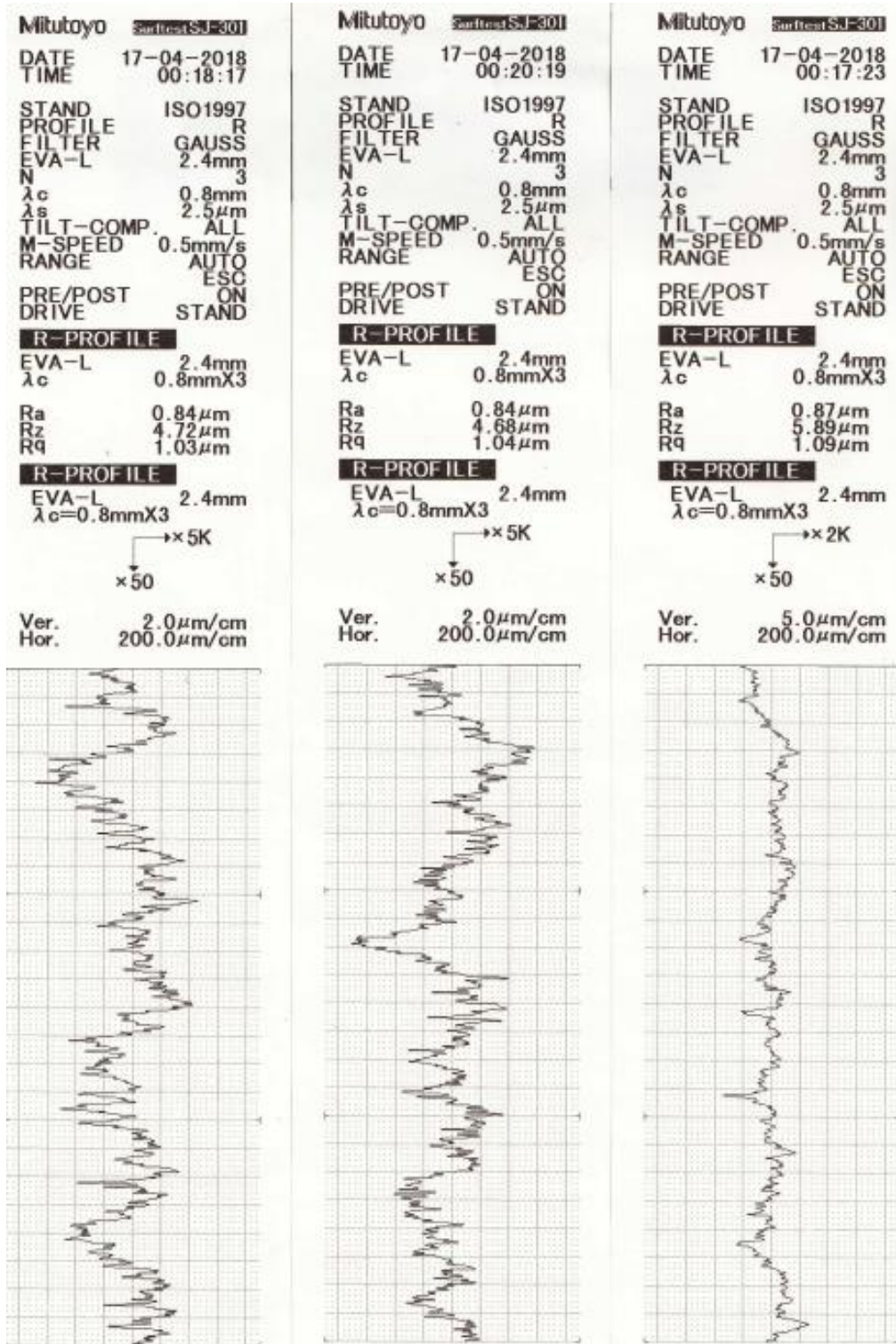
Phạm Văn Phúc




Ghi chú / Remark:
- Mẫu do khách hàng cung cấp, kết quả thử chỉ có giá trị cho mẫu thử.
(Specimens were supplied by client, testing results is valid namely submitted specimens only)
- Thông tin về mẫu, tên khách hàng, tên công trình, hạng mục do khách hàng cung cấp.
(Information of specimens, client, project, item were supplied by client)

Trang 1/1

5. Kết quả đo độ nhám của nền thép C45



6. Kết quả đo độ nhám của lớp mạ crôm cứng

Mitutoyo 

DATE 24-10-2017
TIME 14:17:10

STAND ISO1997
PROFILE R
FILTER GAUSS
EVA-L 4.0mm
N 5
 λ_c 0.8mm
 λ_s 2.5 μ m
TILT-COMP. ALL
M-SPEED 0.5mm/s
RANGE AUTO
PRE/POST ESC
DRIVE ON
STAND

R-PROFILE

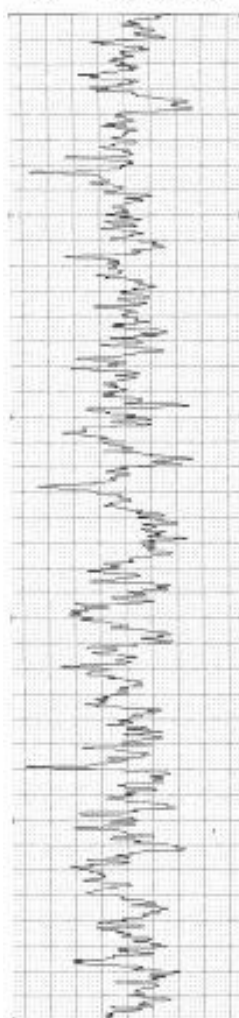
EVA-L 4.0mm
 λ_c 0.8mmX5

Ra 0.75 μ m
Rz 5.51 μ m
Rq 0.95 μ m

R-PROFILE

EVA-L 4.0mm
 λ_c 0.8mmX5

Ver. 2.0 μ m/cm
Hor. 200.0 μ m/cm



Mitutoyo 

DATE 24-10-2017
TIME 14:15:16

STAND ISO1997
PROFILE R
FILTER GAUSS
EVA-L 4.0mm
N 5
 λ_c 0.8mm
 λ_s 2.5 μ m
TILT-COMP. ALL
M-SPEED 0.5mm/s
RANGE AUTO
PRE/POST ESC
DRIVE ON
STAND

R-PROFILE

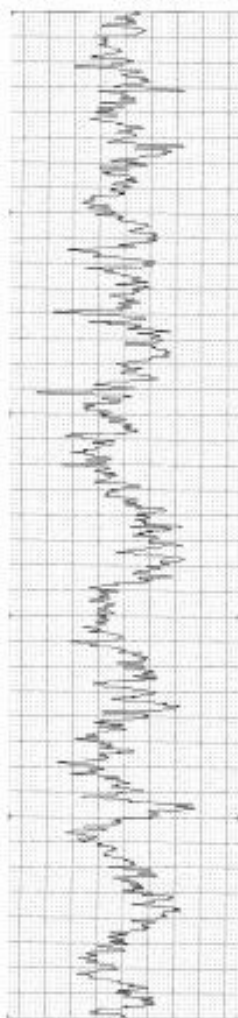
EVA-L 4.0mm
 λ_c 0.8mmX5

Ra 0.77 μ m
Rz 4.84 μ m
Rq 0.94 μ m

R-PROFILE

EVA-L 4.0mm
 λ_c 0.8mmX5

Ver. 2.0 μ m/cm
Hor. 200.0 μ m/cm



Mitutoyo 

DATE 24-10-2017
TIME 14:08:31

STAND ISO1997
PROFILE R
FILTER GAUSS
EVA-L 4.0mm
N 5
 λ_c 0.8mm
 λ_s 2.5 μ m
TILT-COMP. ALL
M-SPEED 0.5mm/s
RANGE AUTO
PRE/POST ESC
DRIVE ON
STAND

R-PROFILE

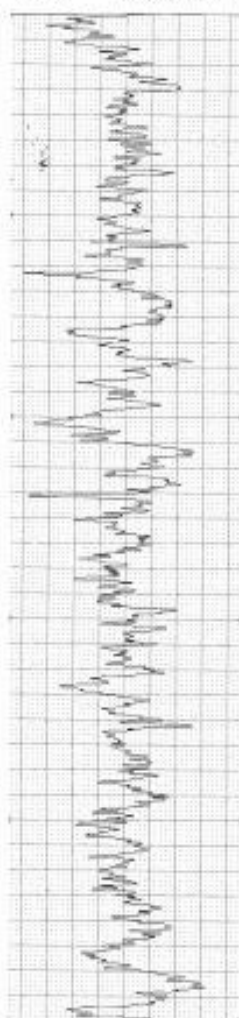
EVA-L 4.0mm
 λ_c 0.8mmX5

Ra 0.82 μ m
Rz 5.75 μ m
Rq 1.05 μ m

R-PROFILE

EVA-L 4.0mm
 λ_c 0.8mmX5

Ver. 2.0 μ m/cm
Hor. 200.0 μ m/cm



7. Kết quả đo độ nhám của lớp phủ cacbide vonfram

