

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO**  
**TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT TP.HCM**

**LÊ VĂN AN**

**NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO VÀ TÍNH TOÁN MÔ PHỎNG MÀNG MỎNG**  
**VỚI NỀN CACBON GIỐNG KIM CƯƠNG CÓ TÍNH CHỐNG MÒN**  
**CAO VÀ MA SÁT THẤP**

Chuyên ngành: Kỹ thuật cơ khí

Mã số chuyên ngành: 62520103

**TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ**

**TP. HỒ CHÍ MINH – NĂM 2020**

Công trình được hoàn thành tại **Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM**

Người hướng dẫn khoa học 1: PGS. TS. Bùi Xuân Lâm

Người hướng dẫn khoa học 2: PGS. TS. Lê Hiếu Giang

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án Cấp Cơ sở/Trường học tại

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM

vào ngày      tháng      năm

Có thể tìm hiểu luận án tại thư viện:

- Thư viện Quốc gia Việt Nam
- Thư viện Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM

# MỞ ĐẦU

## 1. Lý do chọn đề tài

Ma sát và mài mòn là nguyên nhân gây thất thoát năng lượng, tăng tiêu hao nhiên liệu, làm giảm hiệu suất và tuổi thọ thiết bị công nghiệp. Đặc biệt với những hệ thống cơ khí hoạt động trong điều kiện không có bôi trơn hoặc bôi trơn kém, các chi tiết trong hệ thống cơ điện tử siêu nhỏ, dao cắt gọt kim loại trên máy CNC siêu tốc. Do đó, việc nghiên cứu các giải pháp chống mòn và giảm ma sát trong điều kiện bôi trơn kém hoặc không bôi trơn đã và đang được nhiều nhà khoa học quan tâm. Ở Việt Nam đã có các công bố về màng chống mòn, giảm ma sát một lớp như TiN, CrN, .. hay màng đa lớp đơn nguyên tố như TiN/TiCN, TiN/CrN, hoặc đa nguyên tố TiAlBN, màng đa lớp đa nguyên tố như TiAlSiN/CrN. Trong các nghiên cứu này đa phần các màng có hệ số ma sát lớn ( $>0,5$ ). Trên thế giới cũng có nhiều công bố về màng mỏng hợp kim nano chống mòn như Ti-Si<sub>x</sub>N<sub>y</sub>, TiCu, NiCr, CrNi,.. tuy nhiên những màng này không ổn định ở nhiệt độ cao, ứng suất dư lớn và hệ số ma sát khá lớn ( $>0,3$ ). Nanocomposite là một dạng màng mỏng có cấu trúc nano được nghiên cứu nhiều trong thời gian gần đây. Đặc biệt, màng nanocomposite có nền cacbon giống kim cương (DLC) được xem là một trong những loại màng tốt nhất dùng trong các ứng dụng chống mòn và giảm ma sát trong điều kiện không bôi trơn do trong quá trình ma sát của loại màng này, một lớp bôi trơn rắn giàu graphite được hình thành ở bề mặt ma sát. Các màng nanocomposite loại này thường được chế tạo bằng phương pháp hóa học (Chemical Vapor Deposition - CVD) hoặc vật lý (Physical Vapor Deposition - PVD). Mỗi phương pháp chế tạo đều có ưu nhược điểm riêng. Phương pháp PVD cho độ cứng của màng cao nhưng tốc độ phủ thấp, ứng suất dư lớn, màng dễ bong tróc. Phương pháp CVD cho màng có ứng suất dư thấp nhưng độ cứng và tính chống mòn kém. Trong nghiên cứu này, PVD và CVD được kết hợp để chế tạo màng nanocomposite với tốc độ phủ cao, có độ cứng cao, tính chống mòn tốt, ma sát thấp, ứng suất nội thấp phù hợp với các ứng dụng chống mài mòn và ma sát cho các chi tiết chuyển động trong điều kiện không bôi

tron hoặc bôi trơn kém. Khả năng chịu tải của màng dưới tác dụng của đầu đâm nano được đánh giá qua mô phỏng bằng phương pháp phần tử hữu hạn (lập trình với code Matlab) là tiền đề để đánh giá khả năng chịu tải và hư hỏng của loại màng này ở các chế độ chịu tải phức tạp trong thực tế. Với nhận thức trên, nghiên cứu sinh lựa chọn đề tài luận án tiến sỹ là **“Nghiên cứu chế tạo và tính toán mô phỏng màng mỏng với nền cacbon giống kim cương có tính chống mòn cao và ma sát thấp”**.

## 2. Mục đích nghiên cứu

- Thiết kế và chế tạo màng mỏng nanocomposite với các tinh thể TiC phân tán trên nền vô định hình carbon giống kim cương (DLC) bằng phương pháp phún xạ magnetron (một dạng PVD) kết hợp CVD. Màng được kỳ vọng có độ cứng cao từ tỷ lệ lớn  $sp^3$  (giống kim cương của carbon) của nền kết hợp với cốt là các tinh thể nano TiC có kích thước vài nm. Hệ số ma sát thấp do có sự chuyển hóa từ cấu trúc  $sp^3$  (kim cương) sang  $sp^2$  (graphite) trong quá trình chịu tải.

- Xây dựng mô hình và lưu đồ giải thuật tính toán mô phỏng màng chịu tải bởi đầu đâm nano. Độ chính của lời giải được phân tích và đánh giá thông qua chuẩn sai số về năng lượng và tốc độ hội tụ.

## 3. Nhiệm vụ nghiên cứu

- Nghiên cứu khả năng kết hợp phương pháp phủ vật lý và hóa học.
- Nghiên cứu thực nghiệm tìm ra thông số chế tạo màng phù hợp.
- Nghiên cứu sử dụng hiệu quả các thiết bị chẩn đoán cao cấp cho màng mỏng nano để xác định thành phần, cấu trúc, độ nhám bề mặt như: GIXRD, XPS, SEM, TEM, AFM.

- Nghiên cứu sử dụng hiệu quả các thiết bị xác định tính chất cơ học và ma sát của màng mỏng: máy độ cứng nano indenter, thiết bị tạo vết xước, thiết bị quét bề mặt để xác định ứng suất dư của màng, thiết bị tạo vết xước, máy đo ma sát cầu hình “bi trượt trên đĩa”.

- Nghiên cứu sử dụng ngôn ngữ lập trình Matlab để lập trình theo mô hình toán được xác lập.

#### 4. Phạm vi nghiên cứu

- Màng mỏng nanocomposite có nền DLC được phủ trên đế Si và thép, sau đó dùng các thiết bị chuyên biệt để xác định cấu trúc, các tính chất cơ học và ma sát của màng.

- Việc tính toán trường chuyển vị, biến dạng, ứng suất khi màng chịu tải được thực hiện trên mô hình 2D.

- Trong quá trình màng chịu tải bởi đầu đâm nano ảnh hưởng của ma sát và nhiệt độ được bỏ qua, liên kết giữa màng và đế là lý tưởng, ma trận độ cứng không đổi.

- Các hạt nano được xem như phân bố đều trong nền vô định hình DLC.

#### 5. Phương pháp nghiên cứu

Luận án được thực hiện bằng phương pháp nghiên cứu lý thuyết kết hợp thực nghiệm và mô phỏng.

#### 6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

- **Về khoa học:** Có được phương pháp chế tạo màng mỏng DLC, màng nanocomposite với các hạt tinh thể nano phân tán trên nền vô định hình DLC có độ cứng cao, ứng suất dư thấp, có khả năng bám dính tốt và hệ số ma sát thấp phù hợp cho ứng dụng chống mòn.

- **Về thực tiễn:** Sản phẩm nghiên cứu của luận án có tác dụng định hướng ứng dụng trong lĩnh vực cơ khí chính xác (dao cắt kim loại có độ cứng cao dùng trên máy CNC, trên các thiết bị bôi trơn kém hoặc không được bôi trơn, ...).

#### 7. Cấu trúc của luận án

Luận án bao gồm mở đầu, 4 chương, kết luận và kiến nghị

##### **Chương 1. Tổng quan về màng mỏng và các phương pháp chế tạo**

Trong chương này, tác giả trình bày tổng quan về màng mỏng và các dạng màng mỏng có cấu trúc nano đã và đang được nghiên cứu của các tác giả trong nước và ngoài nước, đặc biệt đối với màng có nền DLC. Bên cạnh đó, tác giả

trình bày các phương pháp phủ màng bằng PVD và CVD, ưu nhược điểm của từng phương pháp; cơ chế hình thành và phát triển của màng phủ bằng phương pháp phun xạ và ứng suất phát sinh trong màng làm cơ sở cho việc xác định nhiệm vụ nghiên cứu của luận án.

## **Chương 2. Chế tạo màng mỏng có nền cacbon giống kim cương phủ bằng phương pháp phun xạ magnetron kết hợp hóa học**

Tác giả trình bày quá trình chế tạo màng mỏng có nền DLC bằng phương pháp phun xạ magnetron kết hợp hóa học. Tốc độ phủ được nghiên cứu và so sánh với chế độ phủ PVD thuần túy. Thành phần, cấu trúc và hình ảnh bề mặt của màng đã chế tạo được xác định bằng các thiết bị XPS, XRD, SEM, TEM, AFM.

## **Chương 3. Các tính chất cơ học và ma sát của màng mỏng có nền cacbon giống kim cương phủ bằng phương pháp phun xạ magnetron kết hợp hóa học**

Các thí nghiệm xác định các tính chất cơ học và ma sát của màng thông qua thiết bị như máy đo ứng suất laser Tencor, máy đo độ cứng nano, máy đo ma sát, kính hiển vi quang học được trình bày một cách chi tiết.

## **Chương 4. Tính toán mô phỏng ứng xử tĩnh của màng nanocomposite có nền cacbon giống kim cương chịu tải bởi đầu đâm nano**

Trong chương này, tác giả trình bày tổng quát về phương pháp đo độ cứng nano, phương pháp phân tử hữu hạn, lý thuyết biến dạng và đánh giá sai số, lập sơ đồ giải thuật để mô phỏng quá trình chịu tải bởi đầu đâm nano của màng có nền DLC. Chương trình tính toán với code Matlab đã được thiết lập. Kết quả mô phỏng được so sánh với kết quả thực nghiệm đã tiến hành trên máy đo độ cứng nano (thực hiện trong chương 3).

**Kết luận và kiến nghị:** tác giả trình bày kết luận chung của luận án và nêu một số kiến nghị để phát triển luận án

# CHƯƠNG 1 TỔNG QUAN VỀ MÀNG MỎNG VÀ CÁC PHƯƠNG PHÁP CHẾ TẠO

## 1.1. Tổng quan về màng mỏng

Màng mỏng có thể ở dạng rắn hoặc dạng lỏng, trong đó một kích thước rất nhỏ so với hai kích thước còn lại. Thông thường màng mỏng có độ dày từ vài nm đến vài  $\mu\text{m}$ . Màng mỏng có cấu trúc nano khác với màng mỏng có độ dày nano. Màng mỏng có cấu trúc nano có thể dày đến vài  $\mu\text{m}$  nhưng trong cấu trúc của nó có các phần tử có kích thước nano. Ví dụ, màng nano nhiều lớp gồm nhiều lớp có chiều dày cỡ nm hoặc màng nanocomposite gồm các hạt nano phân tán trong một chất nền nào đó.

- Màng có cấu trúc nano nhiều lớp được thiết kế từ hai lớp siêu mỏng trở lên (khoảng 5 – 10 nm) theo một chu kỳ được xác lập. Độ cứng của các loại màng này phụ thuộc rất lớn vào chiều dày của mỗi lớp trong màng nano nhiều lớp. Với các thiết bị phủ công nghiệp việc đảm bảo chiều dày của mỗi lớp ở cấp độ vài nm hầu như không thể thực hiện được, vì vậy, độ cứng và tính chống mài mòn của màng nano nhiều lớp không ổn định. Vấn đề này sẽ được khắc phục khi áp dụng cấu hình màng nano một lớp – nanocomposite.

- Nanocomposite là màng có cấu trúc gồm các hạt nano phân tán trong một nền chất vô định hình nào đó. Cacbon giống kim cương (Diamond Like Carbon, thường được viết tắt là DLC hoặc a-C, hoặc a-C:H (nếu có chứa hydro)) là vật liệu vô định hình bao gồm các cấu trúc  $\text{sp}^3$  (giống kim cương) và  $\text{sp}^2$  (giống graphite). DLC được biết đến như là vật liệu có tính chống mòn tốt, ma sát thấp (hệ số ma sát nhỏ hơn 0,2) và có thể chế tạo dưới dạng màng mỏng bằng các kỹ thuật phủ PVD hoặc CVD. Tuy vậy, những bất lợi như ứng suất nội cao, dễ vỡ giòn, tính bền nhiệt kém giới hạn các ứng dụng của cacbon giống kim cương. Việc đưa một số kim loại vào nền DLC để tạo nên màng nanocomposite sẽ vẫn giữ được các tính chất ưu việt của DLC đã được chứng minh, đồng thời, khắc phục những nhược điểm của nó. Nanocomposite với nền DLC là vật liệu rất tiềm năng cho các ứng dụng chống ma sát và mài mòn các chi tiết chuyển động.

## 1.2. Phủ hoá học (CVD)

Phủ hoá học sử dụng khí như là một nguồn của vật liệu cần phủ lên chi tiết. Ví dụ: muốn phủ một lớp DLC lên bề mặt một chi tiết người ta sử dụng nguồn cacbon là khí hydro-cacbon (như  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ , ...). Có nhiều kỹ thuật phủ bằng phương pháp CVD như: CVD nhiệt, CVD plasma (PECVD).

## 1.3. Phủ vật lý (PVD)

PVD là phương pháp phủ màng lên chi tiết cần phủ bằng việc nguyên tử hoá các phân tử từ một nguồn vật liệu (rắn). PVD gồm các kỹ thuật bốc hơi PVD và phun xạ PVD. Trong nghiên cứu này, tác giả sử dụng phương pháp phun xạ PVD kết hợp CVD để phủ màng mỏng có nền cacbon giống kim cương.

## 1.4. Cơ chế hình thành và phát triển của màng phủ bằng phương pháp phun xạ

Các nguyên tử bị phun xạ đến bề mặt để trở thành các phân tử có liên kết yếu. Sau đó, nguyên tử khuếch tán vào lớp trước hoặc chuyển động trên bề mặt của màng tùy thuộc vào năng lượng gia tốc đến. Các nhóm nguyên tử trên bề mặt màng sẽ phát triển lớn dần và từng nhóm nguyên tử nhập vào nhau tạo thành các tinh thể vật liệu đơn lẻ tiếp tục phát triển và tổ hợp với nhau để tạo thành các hạt tinh thể. Các hạt sẽ phát triển lớn dần cho đến khi vùng biên giới giữa các hạt cản cản sự phát triển của hạt tinh thể. Vì vậy, cấu trúc tế vi của màng phụ thuộc rất nhiều vào năng lượng của các nguyên tử hoặc ion bay đến màng, phụ thuộc vào năng lượng các nguyên tử vừa lắng đọng trên bề mặt màng, áp suất buồng phủ (áp suất càng lớn thì năng lượng các hạt đến để càng nhỏ do va chạm và ngược lại), năng lượng của bia, thế điện âm trên đế.

## 1.5. Ứng suất dư của màng mỏng

Màng mỏng dù được phủ bằng phương pháp vật lý hay hóa học đều là kết quả của sự oanh tạc của các nguyên tử lên đế nên việc xuất hiện ứng suất dư là điều không tránh khỏi, đặc biệt, đối với màng phủ bằng phương pháp vật lý. Ứng



suất dư đóng vai trò quan trọng trong tính bám dính và tính chống mài mòn của màng. Ứng suất dư gồm có 3 phần:

- Ứng suất nhiệt (do sự khác biệt về hệ số giãn nở nhiệt giữa đế và màng);
- Ứng suất phát sinh khi màng phát triển hình thành từ sự thay đổi tính sít chặt trong các phần tử của màng khi màng đang phát triển dưới sự oanh tạc của ion và nguyên tử. Những hạt ion hoặc nguyên tử có năng lượng càng cao dẫn đến ứng suất hình thành khi màng phát triển càng lớn;
- Ứng suất phát sinh sau khi màng đã phủ lên đế do ảnh hưởng của môi trường xung quanh.

### **1.6. Các kết quả từ các công trình đã công bố**

- Đã có được bức tranh tổng quát về các loại màng mỏng, trong đó có thể kể đến các loại như: màng ceramic đa tinh thể MeC, MeN, MeC<sub>x</sub>N<sub>y</sub>; màng hợp kim nano tinh thể có cấu trúc phụ thuộc vào hàm lượng và loại nguyên tố thêm vào nguyên tố chính; màng có cấu trúc nano nhiều lớp được thiết kế từ hai lớp siêu mỏng trở lên; màng nanocomposite

- Một số phương pháp chế tạo màng mỏng theo các kỹ thuật khác nhau
- Một số kết quả nghiên cứu thực nghiệm xác định cấu trúc màng bằng nhiễu xạ tia X, kính hiển vi điện tử truyền qua (TEM), xác định hệ số ma sát của màng bằng mô hình bi trượt trên màng với vận tốc không đổi; xác định độ cứng của màng bằng thiết bị nanoindenter XP

### **1.7. Các vấn đề cần được tiếp tục nghiên cứu**

- Nghiên cứu chế tạo các loại màng mỏng có nền DLC tính bám dính tốt, độ bền cao, chống mòn cao và ma sát thấp.
- Nghiên cứu thực nghiệm xác định thành phần, cấu trúc, bề mặt, ứng xử cơ học của các loại màng mỏng.
- Nghiên cứu phương pháp tính toán, mô phỏng lựa chọn các thông số hợp lý, tối ưu đối với các loại màng mỏng chịu tải bởi đầu đâm nano ứng dụng trong thực tiễn.

### **1.8. Kết luận rút ra từ tổng quan**

Màng mỏng có cấu trúc nano cho độ cứng cao nhưng hệ số ma sát lớn (>0,3). Các màng nanocomposite với các hạt nano phân tán trong nền vô định

hình cho phép nâng cao độ cứng và tính chống vỡ giòn của màng. DLC là vật liệu tiềm năng cho ứng dụng giảm ma sát vì sự chuyển hóa  $sp^3 \rightarrow sp^2$  trong quá trình chịu tải giúp hình thành một lớp bôi trơn rắn giàu graphite. Việc đưa các tinh thể nano của một pha cứng vào nền DLC cho phép chế tạo loại màng nanocomposite có nền DLC với các tính chất lý tưởng cho ứng dụng chống mài mòn và giảm ma sát. Các màng mỏng loại này có thể được chế tạo bằng phương pháp PVD hoặc CVD. Tuy nhiên, sự kết hợp hai phương pháp trên chưa được nghiên cứu chi tiết và có hệ thống. Việc khảo sát màng nanocomposite có nền DLC được phủ bằng phương pháp kết hợp giữa PVD và CVD cho phép tận dụng tối đa các ưu điểm của từng phương pháp trong thực tế chế tạo màng.

## **CHƯƠNG 2 CHẾ TẠO MÀNG MỎNG CÓ NỀN CACBON GIỐNG KIM CƯƠNG BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHÚN XẠ MAGNETRON KẾT HỢP HÓA HỌC**

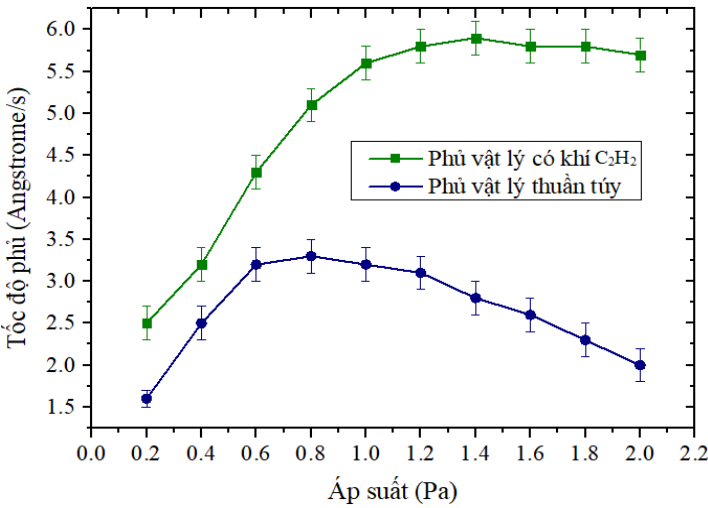
Các màng có nền cacbon giống kim cương được chế tạo trên hệ thống E303A phún xạ magnetron (Penta Vacuum)

### **2.1. Chế tạo màng mỏng cacbon giống kim cương**

Hệ số phún xạ của cacbon rất thấp, vì vậy, tốc độ phủ màng DLC bằng phún xạ magnetron thấp. Một số tác giả đã trộn các nguyên tố khác vào bia graphite để tăng hệ số phún xạ của cacbon, tuy nhiên, màng DLC có được sau khi phủ sẽ bị lẫn các chất đưa vào. Trong nghiên cứu này, để tăng tốc độ phủ, khí  $C_2H_2$  được đưa vào buồng phủ. Việc đưa  $C_2H_2$  vào buồng phủ làm tăng tốc độ phủ một cách đáng kể nhờ có sự kết hợp cả hai quá trình phủ vật lý (phún xạ) và hóa học diễn ra trên đế.

Từ hình 2.1 có thể thấy khi phủ màng DLC không có  $C_2H_2$  thì tốc độ phủ lớn nhất đạt khoảng  $3,2 \text{ \AA}/s$  khi áp suất buồng phủ ở khoảng  $0,8 \text{ Pa}$ . Khi đưa khí  $C_2H_2$  vào buồng phủ thì tốc độ phủ màng DLC tăng rất mạnh. Đặc biệt, khi áp suất buồng phủ tăng từ  $0,2$  đến  $1,2 \text{ Pa}$ , tốc độ phủ tăng mạnh từ  $2,5$  đến

5,6A<sup>0</sup>/s. Và duy trì tốc độ phủ được duy trì ở khoảng 5,5 - 6 A<sup>0</sup>/s khi áp suất phủ tăng từ 1,2 đến 2 Pa. Có thể thấy rằng, việc đưa C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> vào buồng phủ làm tăng tốc độ phủ lên gần gấp 2 lần.



Hình 2.1. Tốc độ phủ của màng DLC ở các áp suất phủ từ 0.2 đến 2.0 Pa khi có và không có C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>

## 2.2. Chế tạo màng mỏng có nền DLC

Màng mỏng có nền DLC được chế tạo bằng phương pháp phún xạ magnetron 2 bia cacbon và Ti cùng lúc trong plasma Ar (40 cm<sup>3</sup>/phút) có khí C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> (10 cm<sup>3</sup>/phút). Áp suất buồng phủ được duy trì không đổi ở giá trị 0,8 Pa. Mật độ năng lượng trên bia graphite được giữ không đổi là 10,5 W/cm<sup>2</sup> còn mật độ năng lượng trên bia Ti được điều chỉnh nhằm tạo màng với các cấu trúc tế vi và tính chất khác nhau. Thế điện âm trên đế là 120V được lựa chọn khi chế tạo màng nanocomposite.

### 2.2.1. Thành phần của màng

Thành phần màng được xác định bằng thiết bị XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy) với Kratos-Axis spectrometer, nguồn tia X Al K $\alpha$  (1486.71 eV,

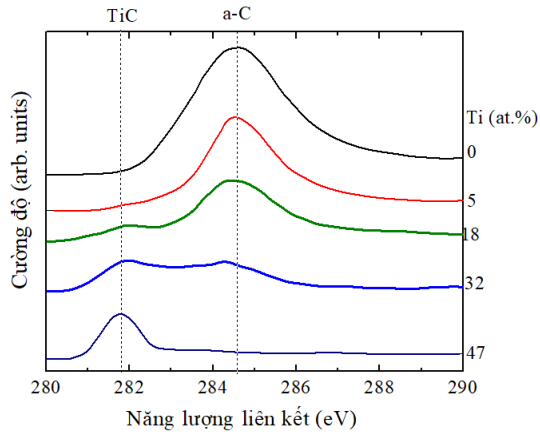
15 kV/10 mA). Bảng 2.1 thể hiện thành phần của màng phụ thuộc vào mật độ năng lượng trên bia Ti.

**Bảng 2.1.** Hàm lượng at.% của Ti và C trong màng thay đổi theo mật độ năng lượng trên bia Ti

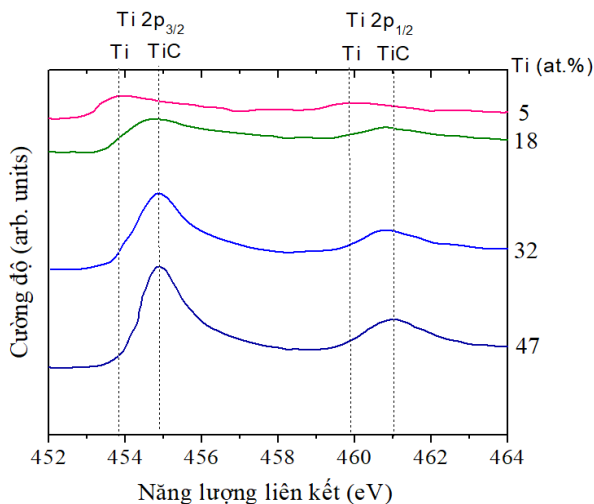
Mật độ năng lượng trên bia Ti (W/cm <sup>2</sup> )	Ti (at.%)	C (at.%)
0	0	100
1	5	95
2	18	82
3	32	68
4	47	53

Các đỉnh C 1s và Ti 2p<sub>3/2</sub> cho phép phân biệt các pha tồn tại trong màng: C, TiC và Ti. Vị trí C 1s thể hiện liên kết C-C trong cacbon vô định hình (tại 284,6 eV) và C-Ti trong TiC (tại 281,8 eV). Đỉnh Ti 2p<sub>3/2</sub> của Ti trong TiC tại vị trí 454,9 eV và của Ti tại vị trí 453,8 eV.

Phổ XPS của màng nanocomposite có nền cacbon giống kim cương được thể hiện trên hình 2.2 và hình 2.3.



Hình 2.2. Phổ XPS C 1s của màng Ti-DLC ở các hàm lượng Ti khác nhau



Hình 2.3. Phổ XPS Ti 2p của màng Ti-DLC ở các hàm lượng Ti khác nhau

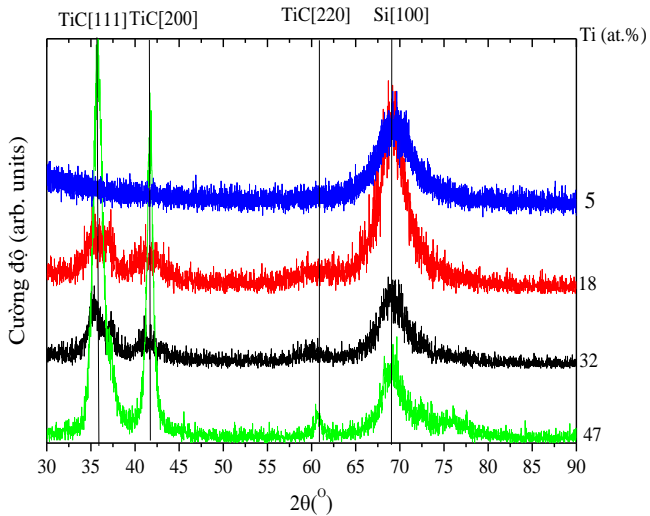
Từ hình 2.2 và hình 2.3, có thể thấy rằng ở hàm lượng Ti 5 at.%, chưa có liên kết Ti-C, hay nói cách khác là chưa có TiC trong màng, lúc này Ti tồn tại trong màng như một pha độc lập. Từ hàm lượng Ti 18 at%, trở lên, toàn bộ Ti đã liên kết với C để hình thành TiC và không có Ti độc lập trong màng. Ở 32 at% Ti, TiC cùng tồn tại với a-C:H nhưng khi hàm lượng Ti đạt đến 47 at.%, gần như không còn có sự tồn tại của a-C:H mà toàn bộ C đã liên kết với Ti để tạo thành TiC. Lúc này, màng có thể được xem là màng TiC.

### 2.2.2. Cấu trúc của màng

Để xác định sự tồn tại của tinh thể TiC trong màng, phổ nhiễu xạ tia X với góc tới nhỏ (GIXRD) được thực hiện trên máy Philips PW-1710 40 kV/30 mA với nguồn tia X  $\text{CuK}\alpha=0.15406\text{nm}$ ). Kích thước tinh thể được ước lượng bởi công thức Debye-Scherrer:

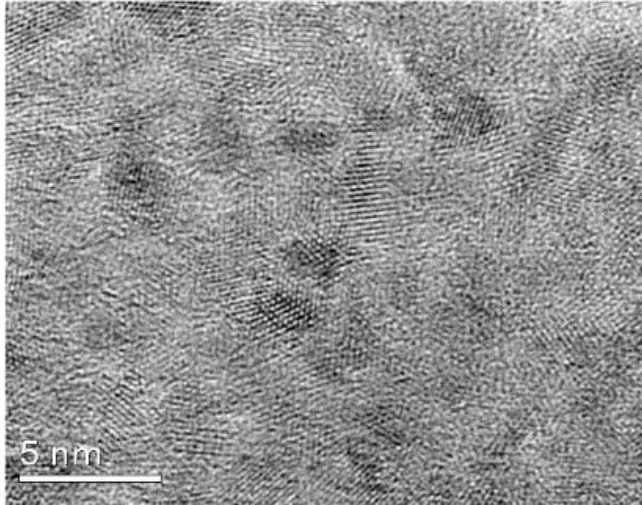
$$D = \frac{K \cdot \lambda}{\beta \cos(\theta)} \quad [\text{nm}] \quad (2.1)$$

trong đó  $D$  là kích thước trung bình của tinh thể,  $K= 0.91$  là hằng số,  $l$  là bước sóng tia X,  $\beta$  bán độ rộng của đỉnh tín hiệu nhiễu xạ,  $\theta$  là góc nhiễu xạ Bragg.



Hình 2.4. Phổ nhiễu xạ tia X của màng ở các hàm lượng Ti khác nhau

Từ hình 2.4 cho thấy vị trí các đỉnh tương ứng với tinh thể TiC [111], TiC [200] và TiC [220] lần lượt là  $35.9$ ,  $41.7$ , và  $60.4^\circ 2\theta$ , vị trí đỉnh ứng với Si [100] (vật liệu của đế) là  $69,8^\circ 2\theta$ . Ở hàm lượng Ti 5 at.%, chỉ duy nhất đỉnh Si[100] tồn tại, nghĩa là không có tinh thể TiC trong màng. Ở hàm lượng 18 at.%Ti, ngoài đỉnh Si[100], các đỉnh tương ứng với TiC [111] và TiC [200] xuất hiện, điều này chứng minh sự tồn tại của các tinh thể TiC trong màng. Ở các hàm lượng 32 và 47 at.%Ti, ngoài các đỉnh của TiC [111] và TiC [200], đỉnh tương ứng với TiC [220] cũng có thể quan sát được. Từ công thức Debye-Scherrer, kích thước các hạt tinh thể trong màng với 18 và 32 at.%Ti trong khoảng 2-6 nm còn với màng 47 at.%Ti là 4-16 nm.



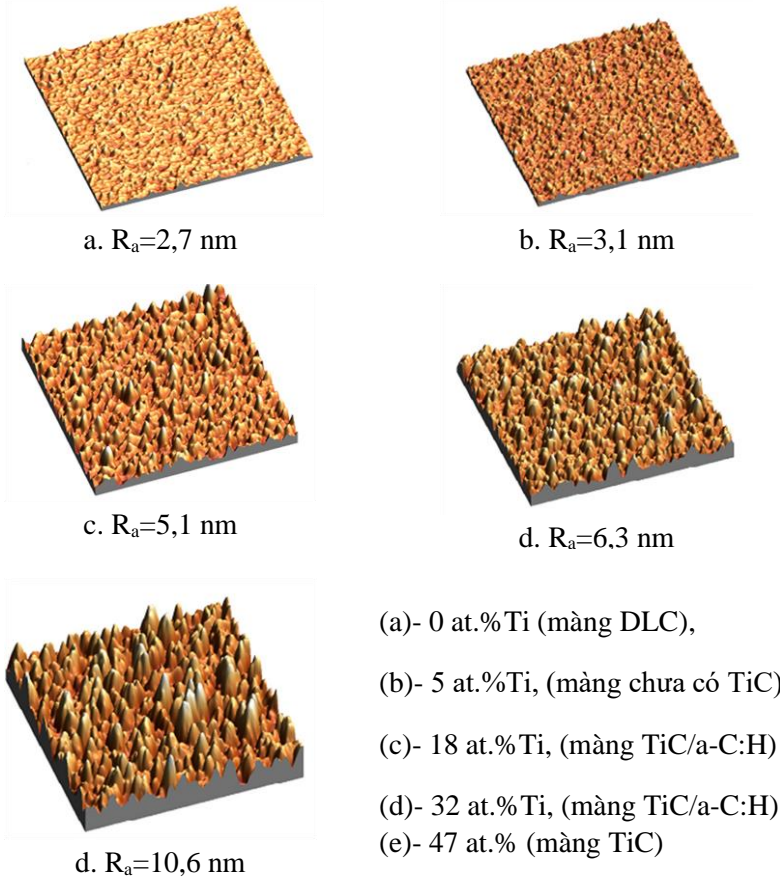
Hình 2.5. Cấu trúc nanocomposite của màng 18at.%Ti được quan sát bằng kính hiển vi điện tử truyền qua TEM

Hình 2.5 đã xác nhận bằng hình ảnh cấu trúc nanocomposite của màng như đã phân tích từ phổ XPS và XRD cho thấy các tinh thể nano TiC phân tán trong nền vô định hình DLC (a-C:H) theo các hướng khác nhau. Ở hàm lượng 47 at.%Ti, màng có cấu trúc đa tinh thể TiC với kích thước tinh thể khá lớn.

### 2.2.3. Hình ảnh bề mặt của màng

Từ hình 2.6 có thể dễ dàng nhận thấy khi hàm lượng Ti càng nhiều thì bề mặt của màng càng nhám hơn ( $R_a$  tăng). Với màng DLC, độ nhám đo được là 2,7 nm. Ở hàm lượng 5at.% Ti, chưa có các tinh thể nano TiC, màng vẫn là vô định hình, chưa có nhiều các cụm nguyên tử tạo nên sự lồi lõm trên bề mặt màng, vì vậy, độ nhám chỉ tăng nhẹ,  $R_a = 3,1$  nm. Khi hàm lượng Ti đạt từ 18 at.% đến 32 at.%, trong màng có các tinh thể nano TiC, độ nhám tăng lên rõ rệt ( $R_a = 5,1$  nm đến 6,3 nm). Đặc biệt, khi không còn a-C:H vô định hình (ở 47 at.%Ti), các đỉnh nhám xuất hiện trên toàn bộ bề mặt màng và độ nhám tăng đến giá trị rất lớn ( $R_a = 10,6$  nm). Hiện tượng tăng độ nhám của màng khi tăng hàm lượng Ti do sự

hình thành các tinh thể trong màng và việc giảm năng lượng các ion tới để của các nguyên tử do tăng va chạm.



Hình 2.6. Bề mặt của các màng có được từ kính hiển vi lực nguyên tử (AFM)

## 2.4. Kết luận chương 2

- Kết hợp phún xạ và phủ hóa học là phương pháp hiệu quả để chế tạo màng DLC thuần khiết và màng nanocomposite có nền DLC. Đây là phương pháp đơn giản, có tốc độ phủ màng lớn, hiệu quả trong áp dụng ở quy mô công nghiệp.



- Dưới 5 at.%Ti, màng vẫn là vô định hình; trong khoảng 18-32 at.%Ti, màng có cấu trúc nanocomposite với các hạt nano TiC phân tán trong nền vô định hình DLC; ở hàm lượng 47 at.%Ti hoặc lớn hơn, màng xem như chỉ có các tinh thể TiC.

- Màng nanocomposite có độ nhám bề mặt trong khoảng 5-6 nm (phủ trên các tấm Si). Độ nhám bề mặt thấp là ưu thế lớn cho loại màng này trong các ứng dụng kỹ thuật, trong đó có các ứng dụng giảm ma sát và chống mòn.

### **CHƯƠNG 3 CÁC TÍNH CHẤT CƠ HỌC VÀ MA SÁT CỦA MÀNG MỎNG CÓ NỀN CACBON GIỐNG KIM CƯƠNG PHỦ BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHÚN XẠ MAGNETRON KẾT HỢP HÓA HỌC**

#### **3.1. Ứng suất dư và tính bám dính**

Ứng suất dư của màng được xác định thông qua việc thay đổi bán kính cong của tấm Si [100] có đường kính 100 mm trước và sau khi được phủ màng. Sự thay đổi bán kính cong của tấm Si được xác định bằng máy quét bề mặt laser Tencor. Ứng suất dư trong màng sau khi phủ được xác định từ công thức:

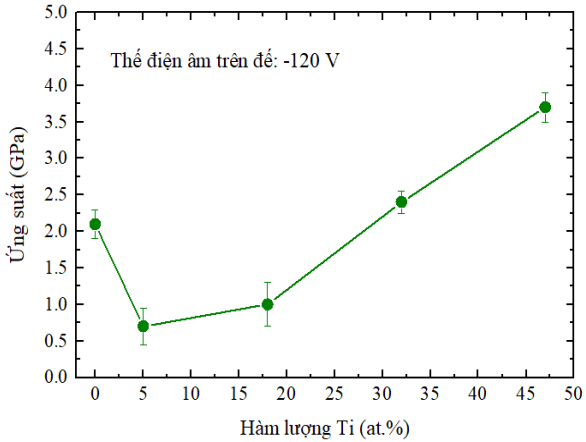
$$\sigma = \frac{E_s}{6(1-\nu_s)} \frac{t_s^2}{t_c} \left( \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) \quad [\text{GPa}] \quad (3.1)$$

trong đó  $E_s/(1-\nu_s) = 180,5$  GPa đối với Si [100]),  $t_s$  và  $t_c$  là chiều dày của tấm Si và của màng,  $R_1$  và  $R_2$  là bán kính cong của Si trước và sau khi phủ màng.

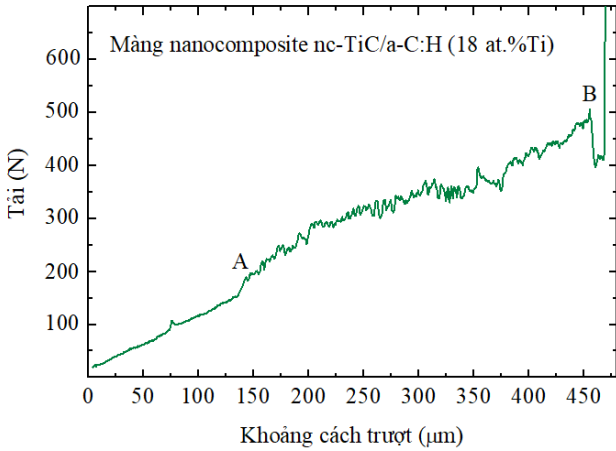
Hình 3.1 thể hiện ứng suất dư của màng phụ thuộc vào hàm lượng Ti. Với màng DLC, ứng suất dư là 2,1 GPa. Ở 5 at.%Ti, ứng suất dư giảm còn 0,7 GPa. Khi hàm lượng Ti là 18 at.%, các tinh thể TiC hình thành, đây là một pha cứng, ứng suất dư khó được giải tỏa hơn nên giá trị ứng suất dư đo được là 1,0 GPa, lớn hơn một chút so với màng 5 at.%Ti. Khi hàm lượng Ti tăng lên đến 32 at.% và 47 at.% ứng suất dư tăng tương ứng đến 2,4 GPa và 3,7 GPa.

Để đánh giá độ bám dính của màng vào đế thép, thí nghiệm trên máy tạo vết xước (Shimadzu SST-101) được tiến hành. Mũi kim cương có bán kính 15  $\mu\text{m}$  được cho trượt trên bề mặt màng. Để có thể quan sát được vết xước dưới kính

hiển vi, mũi kim cương được đặt ở chế độ dao động với biên độ 50  $\mu\text{m}$ . Tốc độ tịnh tiến của mũi kim cương là 10  $\mu\text{m/s}$  (mũi kim cương vừa tịnh tiến vừa dao động). Tín hiệu ma sát được chuyển thành tín hiệu điện. Khi màng bị tróc, tín hiệu này thay đổi đột biến, tải ứng với thời điểm này được xem là tải phá hủy màng (hình 3.2).



Hình 3.1. Ứng suất dư của màng thay đổi theo hàm lượng Ti



Hình 3.2. Đồ thị có được từ thí nghiệm vết xước đối với màng nanocomposite 18 at.%Ti

Kết quả thí nghiệm vết xước đối với màng nanocomposite nc-TiC/a-C:H (18 at.%Ti) được thể hiện trên hình 3.2. Màng DLC thuần khiết và màng vô định hình Ti-DLC (5 at.%Ti) đều có tải phá hủy từ 300 N đến 350 N. Các màng có cấu trúc nanocomposite (18 at.% Ti và 32 at.%Ti) có tính bám dính tốt nhất (đều trên 450 N) ở tất cả các lần thí nghiệm. Màng TiC (47 at.%Ti), tải phá hủy nhỏ hơn 200 N.

### 3.2. Độ cứng và mô đun đàn hồi của màng

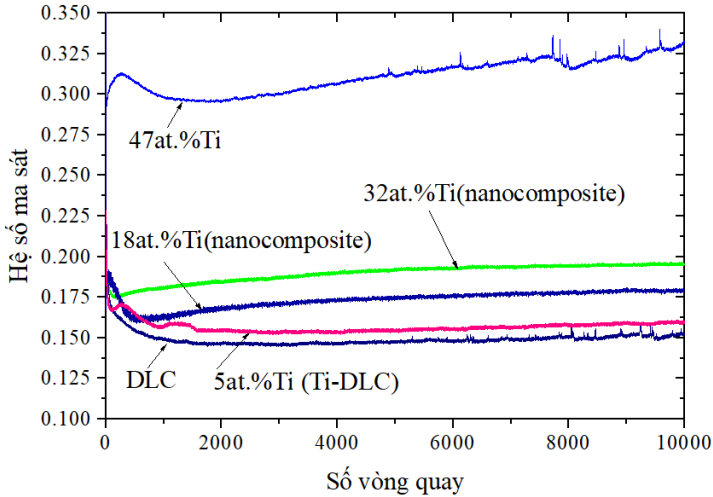
Với màng DLC thuần khiết, độ cứng và mô đun đàn hồi lần lượt là 18 GPa (215 GPa). Khi 5at.% Ti được thêm vào, độ cứng và mô đun đàn hồi giảm còn 14 GPa (153 GPa). Việc đồng phún xạ Ti làm giảm năng lượng các nguyên tử (ion) gia tốc đến màng, đồng thời, các tinh thể cứng TiC chưa được hình thành nên độ cứng của màng bị giảm. Các màng có cấu trúc nanocomposite (18 at.%Ti và 32 at.% Ti) có độ cứng và mô đun đàn hồi lần lượt là 22 GPa (241 GPa) và 28 GPa (272 GPa), đây là giá trị lý tưởng làm màng phủ bảo vệ cho các chi tiết máy chịu ma sát. Với màng TiC (47 at.%Ti), độ cứng và mô đun đàn hồi là 35 GPa (325 GPa).

### 3.3. Tính chất ma sát và mòn của màng

Tính chất ma sát và mòn của màng được nghiên cứu bằng máy thử ma sát (CSEM) với cấu hình bi trượt trên đĩa. Màng được phủ trên các đĩa thép 440C (đường kính 55 mm, bề dày 5,5 mm, độ bóng đến  $R_a=60$  nm), bi được sử dụng trong thí nghiệm làm từ thép AISI 52100 (100Cr6) có đường kính 6 mm, độ nhám bề mặt  $R_a=30$  nm, độ cứng 8 GPa. Các thí nghiệm được thực hiện ở nhiệt độ 22°C, độ ẩm không khí 75% trong điều kiện không bôi trơn. Tốc độ trượt được đặt ở giá trị không đổi là 20 cm/s, tải tác dụng 5 N.

Từ hình 3.3 có thể thấy màng 47at.%Ti có hệ số ma sát lớn hơn 0,3 và không ổn định ở giai đoạn cuối của quá trình thử. Màng DLC thuần khiết và 5at.%Ti có hệ số ma sát thấp nhất (0,15-0,16). Tuy nhiên, ở giai đoạn cuối của quá trình thử (từ 9000 vòng), có thể thấy rõ sự dao động của hệ số ma sát của màng DLC. Các màng nanocomposite có hệ số ma sát cao hơn một chút nhưng

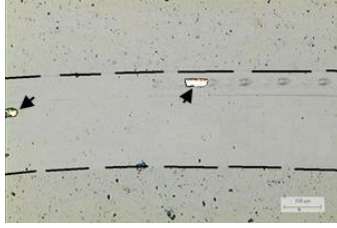
cũng ở mức rất thấp (0,17-0,19) và hoàn toàn không có sự dao động của hệ số ma sát.



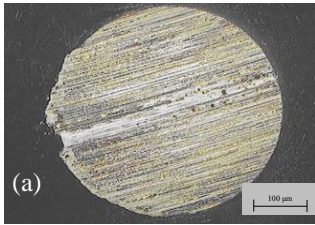
Hình 3.3. Hệ số ma sát của màng khí trượt với bi thép 100Cr6

Độ mòn của bi trượt trên màng cũng là một thông số quan trọng để đánh giá chất lượng của màng. Để đánh giá độ mòn của bi, các vết mòn trên bi được quan sát dưới kính hiển vi quang học (hình 3.5).

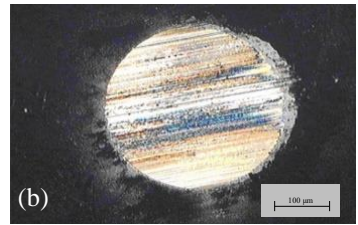
Vết mòn hình tròn có thể dễ dàng ước lượng lớn nhỏ thông qua đường kính của vết. Vết mòn của bi trượt trên màng TiC (47at.%Ti) là lớn nhất do nhấp nhô bề mặt lớn, không có lớp bôi trơn rắn graphite và sự bong tróc một phần của màng trong quá trình trượt tương đối với bi tạo ra các hạt mài. Các hạt này tồn tại ở vị trí tiếp xúc của hai bề mặt ma sát dẫn đến hậu quả bề mặt bi bị mài mòn nhanh chóng (hình 3.5a). Đường kính vết mài của bi trượt trên bề mặt màng DLC thuần khiết (hình 3.5b) nhỏ hơn rất nhiều so với vết tạo ra bởi màng TiC, tuy nhiên, vẫn lớn hơn vết mòn trên bi trượt với màng nanocomposite (18at.%Ti) (hình 3.5c). Dù DLC có bề mặt nhẵn, có lớp bôi trơn rắn được hình thành do sự graphite hóa a-C nhưng do bị tính chống vỡ giòn kém dẫn đến vết nứt vỡ tế vi dẫn đến việc bi bị mài mòn nhanh.



Hình 3.4. Các vết bong tróc trên vùng ma sát của màng TiC (47at.%Ti) sau khi trượt 10000 vòng với bi 100Cr6

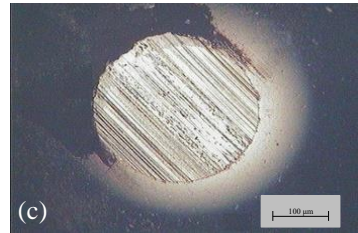


(a) Vết mòn trên bi trượt với màng TiC



(b) Vết mòn trên bi trượt với màng DLC thuần khiết

(c) Vết mòn trên bi trượt với màng nanocomposite (18at.%Ti)



Hình 3.5. Vết mòn trên bi trượt trên các màng

### 3.4. Kết luận chương 3

- Màng nanocomposite với cấu hình các hạt nano TiC phân tán trong nền vô định hình DLC (hàm lượng at.%Ti trong khoảng 18-32) có ứng suất dư tương đối thấp (1-2,4 GPa) và tính bám dính trên đế hơn hẳn các loại màng DLC thuần khiết và TiC ( tải phá hủy trong thí nghiệm bám dính >450 N so với <350N của DLC và <200N của TiC).

- Khi hàm lượng Ti chưa đủ lớn để hình thành các tinh thể nano TiC thì việc thêm Ti làm giảm độ cứng và mô đun đàn hồi của màng. Tuy nhiên, khi đã hình thành các tinh thể nano TiC thì độ cứng của màng tăng lên khi có thêm Ti. Độ cứng và mô đun đàn hồi của màng TiC (47 at.%Ti) là lớn nhất (35 và 325

GPa). Màng nanocomposite có độ cứng và mô đun đàn hồi trong khoảng 22-28 GPa và 241-272 GPa, kết hợp với độ nhám bề mặt thấp và tính chống vỡ giòn, tính bám dính tốt cho thấy đây là loại màng rất phù hợp cho các ứng dụng kỹ thuật.

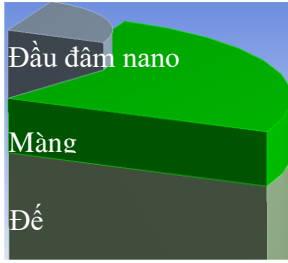
- Hệ số ma sát của màng nanocomposite khi trượt trên bi thép ở chế độ không bôi trơn trong khoảng 0,17-0,19. Đây là giá trị lý tưởng cho các ứng dụng kỹ thuật. Các màng nanocomposite vẫn bám dính tốt trên bề mặt đế sau 10000 vòng quay trên máy ma sát (trong khi màng DLC và TiC cho thấy có những vết tróc). Ngoài ra, độ mòn của bi thép khi trượt trên màng nanocomposite nhỏ hơn rất nhiều so với khi trượt trên màng DLC thuần khiết và màng TiC.

## **CHƯƠNG 4 TÍNH TOÁN MÔ PHỎNG ỨNG XỬ TÍNH CỦA MÀNG MỎNG NANOCOMPOSITE CÓ NỀN CACBON GIỐNG KIM CƯƠNG CHỊU TẢI BỞI ĐẦU ĐÂM NANO**

### **4.1. Mô hình toán màng chịu tải**

Vết lõm là một phương pháp đơn giản và thường được áp dụng để kiểm tra tính chất cơ học của các vật liệu. Gần đây, vết lõm nano (vết lõm có chiều sâu thâm nhập được đo ở mức độ nano) đã được thiết lập như một công cụ cơ bản cho việc nghiên cứu, kiểm tra tính chất cơ học của vật liệu thể tích nhỏ. Kỹ thuật vết lõm nano có thể được dùng không chỉ để tính toán độ cứng, mô đun đàn hồi mà còn tính các chỉ số biến dạng – sự hóa cứng, độ bền chống nứt (cho vật liệu giòn) và các tính chất đàn hồi. Trong nghiên cứu này, trường chuyển vị, biến dạng, ứng suất phân bố trong màng sẽ được phân tích.

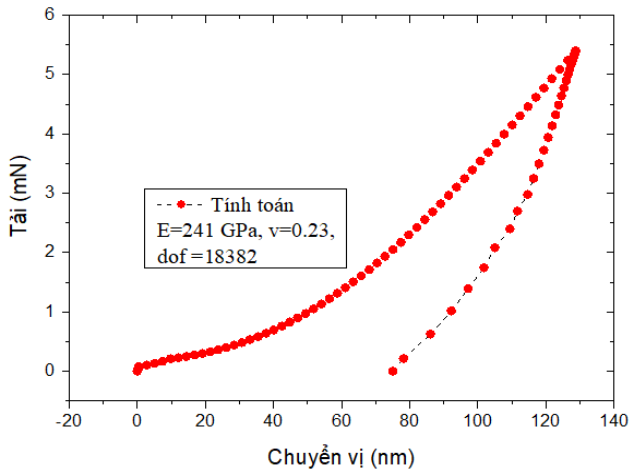
Mô hình toán màng mỏng chịu tải bởi đầu đâm nano được xây dựng như hình 4.1. Màng mỏng phủ lên đế Si [100] có đường kính 100 mm, dày 450  $\mu\text{m}$ , chiều dày của màng là 1,3  $\mu\text{m}$ . Giả thiết liên kết giữa màng và đế là lý tưởng, quá trình chịu tải của màng không bị ảnh hưởng bởi ma sát, nhiệt độ. Đầu đâm nano là mũi kim cương Berkovich có mô đun đàn hồi 1040 GPa, hệ số Poisson 0.07. Tuy nhiên, để thuận lợi trong tính toán, mũi Berkovich được qui đổi về dạng đối xứng trục hình nón tương đương có nửa góc  $70.3^\circ$ .



Hình 4.1. Mô hình màng chịu tải

## 4.2. Kết quả tính toán với Matlab

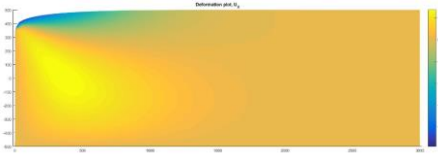
Trên cơ sở mô hình toán đã xây dựng, chương trình tính được lập trình bằng phần mềm Matlab để tính toán chuyển vị, biến dạng và ứng suất bên trong khi màng chịu tải bởi đầu đâm nano.



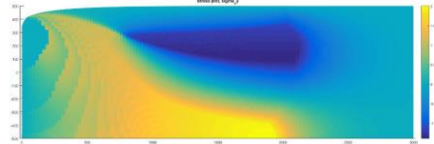
Hình 4.2. Kết quả mô phỏng có được đường cong gia tải và giảm tải của màng chịu tác dụng của đầu đâm nano

Hình 4.2 thể hiện mối quan hệ giữa gia tải và giảm tải với chuyển vị khi màng chịu tải bởi đầu đâm nano. Màng mỏng nanocomposite chuyển vị dưới tác dụng của tải. Khi gia tải gần đến 5,5 mN, đầu đâm nano sẽ đâm sâu vào màng khoảng 130 nm, sau đó giảm tải và rút đầu đâm nano khỏi bề mặt màng thì đường cong giảm tải đàn hồi dần đến 74,3 nm, mức độ biến dạng và đàn hồi thể hiện cơ tính của màng.

Hình 4.3 và 4.4 thể hiện trường biến dạng và trường ứng suất bên trong màng. Khi gia tải bằng đầu đâm nano lên bề mặt, màng bị biến dạng. Sự biến dạng lan truyền vào bên trong màng và phát sinh ứng suất. Phương pháp tuyến với bề mặt đầu đâm có giá trị ứng suất lớn dần, ứng suất này truyền qua màng tới bề mặt phân cách giữa màng và đế.



Hình 4.3. Trường biến dạng của màng nanocomposite



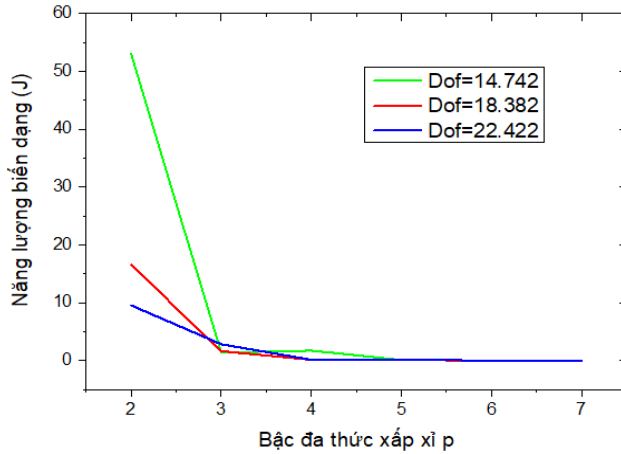
Hình 4.4. Trường ứng suất của màng nanocomposite

Quan sát biểu thị màu cho thấy ứng suất nén (ứng suất âm) xảy ra tại vùng màu vàng, ứng suất kéo (ứng suất dương) xảy ra tại vùng màu xanh đậm lân cận mặt trên của màng. Khi tải tác dụng lớn, màng có thể hình thành vết nứt, phát triển vết nứt để giải tỏa ứng suất tại đường giao thoa giữa vùng chịu ứng suất nén và vùng chịu ứng suất kéo. Vết nứt cũng có thể hình thành tại bề mặt phân cách giữa màng và đế - nơi chịu ứng suất nén lớn nhất.

### 4.3. Phân tích và đánh giá sai số theo chuẩn năng lượng khi màng mỏng nanocomposite chịu tải bởi đầu đâm nano

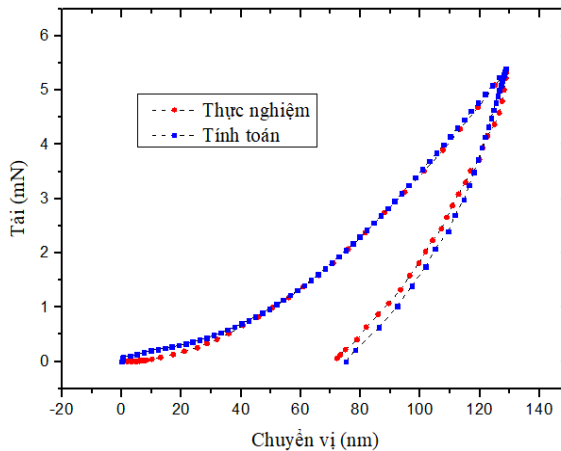
Nhằm đánh giá độ chính xác lời giải của mô hình toán và lưu đồ giải thuật đã xây dựng, các phương pháp làm mịn lưới kiểu h-refinement, tăng bậc đa thức xấp xỉ p-refinement, và tổ hợp h-p refinement được sử dụng. Từ hình 4.5 có thể thấy rằng, khi thực hiện tính toán với lưới càng mịn và bậc đa thức xấp xỉ lớn thì chuẩn năng lượng biến dạng giảm nhanh về gần 0. Khi tính toán đến bậc đa thức 4 tốc độ hội tụ giảm. Điều này chứng tỏ rằng lưới càng mịn và tăng bậc đa thức thì sự mất mát năng lượng trong mỗi phần tử càng nhỏ. Khi năng lượng trong mỗi phần tử đạt trạng thái cân bằng thì lời giải bằng phương pháp PTHH sẽ gần với giải tích.





Hình 4.5. Chuẩn năng lượng biến dạng theo tổ hợp độ mịn h-p

#### 4.4. So sánh kết quả tính toán mô phỏng và thực nghiệm trên thiết bị đo độ cứng nano



Hình 4.6. Đường cong gia tải và giảm tải dưới tác dụng của đầu đâm nano theo tính toán và thực nghiệm

Hình 4.6 cho thấy khi mũi đột đâm sâu vào màng 130 nm, sau đó rút tải thì màng vẫn bám dính tốt trên đế (đường cong gia tải và dỡ tải không xuất hiện

những điểm kỳ dị). Kết quả tính toán và thực nghiệm gần như trùng khớp, điều này cho thấy thuật toán và chương trình tính đã lập có cơ sở tin cậy cao.

#### **4.5. Kết luận chương 4**

- Phương pháp sử dụng đầu đâm nano cho thấy hiệu quả trong việc xác định cơ tính của màng mỏng.

- Thuật toán và chương trình tính nhằm phân tích ứng xử tĩnh phi tuyến của màng nanocomposite với nền cacbon giống kim cương đã được thiết lập, chương trình tính được kiểm chứng với kết quả thực nghiệm cho thấy tính tin cậy cao. Mô phỏng số đã xác định trường ứng suất, biến dạng của màng nanocomposite với nền cacbon giống kim cương chịu tác dụng của đầu đâm nano.

- Chương trình tính toán, mô phỏng được thiết lập là công cụ tốt cho việc khảo sát độ bền và tính tin cậy của màng mỏng phủ trên các loại vật liệu khác nhau.

## **KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ**

### **1. Kết luận**

- Phương pháp kết hợp PVD và CVD cho tốc độ phủ màng nanocomposite có nền DLC cao hơn nhiều (gấp 2 lần) so với phún xạ magnetron thuần túy. Màng được chế tạo có độ cứng và tính chống mòn tốt hơn rất nhiều so với màng phủ bằng phương pháp hóa học.

- Thông qua các thí nghiệm, tác giả đã xác định được các thông số phù hợp để phủ màng có cấu trúc nanocomposite. Cấu trúc tế vi của màng dễ dàng được thay đổi thông qua việc thay đổi mật độ năng lượng của bia Ti.

- Các màng nanocomposite có độ cứng cao (20-30 GPa), ứng suất dư thấp (1-2 GPa), bám dính lên bề mặt chi tiết phủ rất tốt và hệ số ma sát với thép trong điều kiện không bôi trơn khi trượt rất nhỏ (0,17-0,19). Điều này cho thấy màng nanocomposite có nền DLC vượt trội so với các màng chống mòn thông thường đang được sử dụng, như: carbide hoặc nitride.

- Thuật toán và chương trình tính được lập cho phép phân tích ứng xử tĩnh phi tuyến của màng nanocomposite với nền cacbon giống kim cương là công cụ hữu hiệu để tính toán, khảo sát, lựa chọn các thông số hợp lý phục vụ chế tạo màng nanocomposite nền cacbon giống kim cương ứng dụng trong thực tiễn.

## 2. Kiến nghị

Đề tài có thể phát triển tiếp theo những hướng sau đây:

- Nghiên cứu thực nghiệm màng nanocomposite phủ trên các chi tiết cụ thể (vòng răng động cơ, bánh răng, thiết bị cắt và gia công kim loại, ...).

- Nghiên cứu thực nghiệm tính chất của màng nanocomposite khi được phủ lên các vật liệu không kim loại (nhựa, cao su).

- Phát triển lý thuyết và xây dựng phần mềm lên cấp độ cao hơn để tính toán và mô phỏng màng nanocomposite khi chịu tải phức tạp (quá trình ma sát, ảnh hưởng của nhiệt, ...).

### DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

<i>TT</i>	<i>Tên tác giả, tên bài viết, tên tạp chí và số của tạp chí, trang đăng bài viết, năm xuất bản</i>	<i>Sản phẩm của đề tài/ dự án (chỉ ghi mã số)</i>	<i>Số hiệu ISSN</i>	<i>Điểm IF</i>
1	Lê Văn An, Bùi Xuân Lâm, Ảnh hưởng của mật độ và năng lượng ion đến tính chất của màng Ti-DLC phủ bằng phương pháp plasma tăng cường, Tạp chí Giao thông vận tải, số 10, pp 53-54, 2015	Bài báo khoa học (0,5 điểm theo HĐCDGSNN)	2354-0818	
2	Lê Văn An, Bùi Xuân Lâm, Màng mỏng nanocomposite ma sát thấp, Tạp chí Giao thông vận tải, số 12, pp 45-	Bài báo khoa học (0,5 điểm theo	2354-0818	

	47, 2015	HĐCDGSNN)		
3	Lê Văn An, Bùi Xuân Lâm, Lê Hiếu Giang, Trịnh Thái Hưng, Mô phỏng quá trình chịu tải của màng nanocomposite TiC/a-C phủ bằng phương pháp phun xạ magnetron, Tạp chí Giao thông vận tải, số 4, pp 78-82, 2019	Bài báo khoa học (0,5 điểm theo HĐCDGSNN)	2354-0818	
4	Lê Văn An, Bùi Xuân Lâm, Lê Hiếu Giang, Trịnh Thái Hưng, Phân tích, đánh giá sai số trên chuẩn năng lượng theo sự phân bố ứng suất cho màng mỏng nano chịu tải bằng phương pháp phần tử hữu hạn, Tạp chí Giao thông vận tải, số 5, pp 119-122, 2019.	Bài báo khoa học (0,5 điểm theo HĐCDGSNN)	2354-0818	
5	Lê Văn An, Bùi Xuân Lâm, Lê Hiếu Giang, Trịnh Thái Hưng, Phân tích và đánh giá sai số theo chuẩn năng lượng với độ mịn lưới p-refinement cho màng mỏng nanocomposite khi chịu tải bởi đầu đâm nano, Tạp chí Giao thông vận tải, số 10, pp 48-53, 2019.	Bài báo khoa học (0,5 điểm theo HĐCDGSNN)	2354-0818	
6	Lê Văn An, Bùi Xuân Lâm, Lê Hiếu Giang, Màng cacbon giống kim cương phủ bằng phương pháp phun xạ magnetron kết hợp hóa học, Tạp chí Giao thông vận tải, số 7, 2020.	Bài báo khoa học (0,5 điểm theo HĐCDGSNN)	2354-0818	

7	Lê Văn An, Bùi Xuân Lâm, Lê Hiếu Giang, Cấu trúc tế vi của màng phủ bằng phun xạ magnetron các bia graphite và titan trong môi trường khí C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , Tạp chí Giao thông vận tải, số 8, 2020.	Bài báo khoa học (0,5 điểm theo HƣCĐGSNN)	2354-0818	
---	---	---	-----------	--